PUBLICATIONS
DE
L'OBSERVATOIRE ASTRONOMIQUE DE L'UNIVERSITÉ DE TARTU
TOME XXIX № 7

WEITERE BEITRÄGE ZU DER ELEMENTAREN EXPANSIONSTHEORIE DES UNIVERSUMS

VON

WILHELM ANDERSON

TARTU 1937

Acta et Commentationes Universitatis Tartuensis (Dorpatensis) A XXXIII. 3.

K. Mattiesens Buchdruckerei Ant.-Ges., Tartu 1937.

In meinem vorigen Aufsatz [1]), in dem ich die Einwände von B. Jung zurückwies, habe ich gleichzeitig eine elementare Expansionstheorie des Universums entwickelt. Unter anderem gelang mir eine ganz elementare Ableitung der Einstein-de Sitterschen Gleichung:

$$a^2 = \frac{1}{3} \varkappa \varrho c^2 = \frac{8 \pi G \varrho}{3} \cdot \tag{1}$$

Inzwischen hat Prof. Milne die Freundlichkeit gehabt, mir einige seiner Schriften zuzusenden, darunter einen mir bis jetzt unbekannt und unzugänglich gewesenen Artikel vom Jahre 1934, wo er die Einstein-de Sittersche Gleichung ebenfalls auf elementare Weise ableitet [2]). Ich bedaure es sehr, diesen Artikel nicht rechtzeitig gelesen zu haben.

Wie ich jetzt sehe, ist Milne's Ableitung identisch mit der unsrigen, bis auf folgenden Unterschied. Milne sagt: „Consider the particular case in which the distant particle has the *parabolic* velocity of escape from the mass contained in the sphere of radius r" [3]). Bei Milne spielt also die parabolische Geschwindigkeit nur die Rolle einer ad hoc gemachten Voraussetzung, in unserer Theorie hingegen erscheint die parabolische Geschwindigkeit als notwendige Konsequenz des anfänglichen „Lichtstadiums" des Universums. Wir haben ja angenommen, daß im Anfangsstadium die Ruhemasse des Universums gleich

---

[1]) W. Anderson, Public. de l'Observ. de l'Univ. de Tartu $\mathbf{29}_6$ = Acta et Comm. Univ. Tartuensis (Dorpatensis) A $\mathbf{33}_2$.

[2]) E. A. Milne, The Quarterly Journal of Mathematics (Oxford series) **5**, 70, 1934. — Diese Zeitschrift ist weder in unserer Universitätsbibliothek, noch in irgendeiner anderen hiesigen Institution vorhanden.

[3]) Ebenda, S. 67.

Null gewesen ist, so daß seine Gesamtmasse gleich seiner kinetischen Masse war, nach der Gleichung:

$$M = \frac{3\,GM^2}{5\,Rc^2}, \tag{2}$$

wo R den Gleichgewichtsradius bedeutet. Dies Gravitationsgleichgewicht erweist sich aber als ein labiles. Während der Expansion nimmt die kinetische Energie ab, kann dabei jedoch nicht spurlos verschwinden, sondern muß sich in potentielle Energie verwandeln. Diese Vergrößerung der potentiellen Energie muß sich in einer entsprechenden Vergrößerung des Ruhemasse manifestieren. Mit anderen Worten: die Abnahme an kinetischer Masse wird genau kompensiert durch die Zunahme an Ruhemasse, so daß die Gesamtmasse des Universums konstant bleibt. Bei unendlicher Expansion wird das Universum gar keine kinetische, sondern nur Ruhemasse besitzen. Die anfängliche kinetische Energie $\frac{3\,GM^2}{5\,R}$ reicht also genau dazu aus, um das Universum bis zur Unendlichkeit auszudehnen. Die notwendige Konsequenz davon ist, daß die Expansionsgeschwindigkeit eines jeden Partikelchens immer eine parabolische bleiben muß. Nun haben wir im vorigen Aufsatz auf Grund elementarer geometrischer Überlegung gezeigt (S. 12), daß ein jeder Beobachter genau dieselbe Expansion um sich sehen wird. Deshalb muß für einen eden Beobachter die Expansionsgeschwindigkeit eines jeden Punktes immer eine parabolische bleiben. (Selbstverständlich bezieht sich diese Regel nicht auf die „ungeordneten" Partikelchen.)

Hinsichtlich der „ungeordneten" Partikelchen ist mir im vorigen Aufsatz bei der Berechnung der unteren Energiegrenze eine Ungenauigkeit untergelaufen, die ich gleich berichtigen werde. Ein und derselbe Körper von der Masse m kann dem einen Beobachter als ruhend erscheinen, dem anderen als bewegt. Der erstere wird sagen, daß m nur Ruhemasse sei, der letztere hingegen wird m als Summe von Ruhemasse und von kinetischer Masse ansehen. Sollte sich endlich ein Beobachter mit Lichtgeschwindigkeit hinsichtlich des Körpers bewegen, so wird er m als reine kinetische Masse ansehen[4]). Solange die Ge-

[4]) Somit erscheint einem jeden Beobachter die Gesamtmasse des Körpers immer gleich m, aber die Ruhemasse verschieden. Dieselbe Konstanz der

schwindigkeit eines Protons (oder Neutrons) relativ zu uns gering ist, können wir seine Ruhemasse gleich $1{,}66.10^{-24}$ setzen. Dies ist aber bei den schnell bewegten „ungeordneten" Partikelchen nicht mehr zulässig. Das hatte ich nicht in Betracht gezogen, weshalb ich für die untere Energiegrenze einen etwa um 24% zu hohen Wert erhalten habe.

Ich will aber jetzt zeigen, daß man nicht nur die untere Grenze, sondern auch den genaueren Wert der durchschnittlichen kinetischen Energie berechnen kann. Der Gleichge-

---

Gesamtmasse finden wir auch beim freien Fallen eines Körpers, wo die Zunahme an kinetischer Energie durch die Abnahme an potentieller Energie genau kompensiert wird. Für ein Anwachsen der Gesamtmasse ist hier kein Grund vorhanden, da ja der Körper die entstandene kinetische Energie bereits schon früher in potentieller Form besessen hat. Wenn wir aber denselben Körper etwa mit der Hand in Bewegung setzen (und zwar in einer zum Gravitationsfelde senkrechten Richtung), so führen wir dadurch eine ganz neue Energiemenge dem Körper zu, welche er vorher weder in potentieller, noch in kinetischer Form besessen hatte. Dadurch haben wir die ursprüngliche Gesamtmasse des Körpers vergrößert. Da nun hier die kinetische Masse von außen hinzugekommen und nicht anf Kosten der Ruhemasse entstanden ist, so bleibt letztere unverändert. Wir haben also hier eine Bewegung „mit konstanter Ruhemasse" vor uns, während unser erstes Beispiel eine Bewegung „mit konstanter Gesamtmasse" darstellte. Natürlich sind auch gemischte Fälle möglich.

Ist v die Geschwindigkeit des Partikelchens, m_0 seine Ruhemasse und m seine Gesamtmasse, so müssen die beiden relativistischen Gleichungen:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

und

$$\text{kinetische Energie} = (m - m_0)\, c^2 = m_0\, c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

selbstverständlich immer erfüllt sein, ganz unabhängig davon, ob bei der Bewegung m_0 oder m konstant bleibt.

Ist nun die Bewegung von einer solchen Art, daß die Ruhemasse m_0 konstant bleibt, so muß bei $v = c$ sowohl die kinetische Energie als auch die Gesamtmasse m unendlich werden. Nach der traditionellen Auffassung trifft dies bei einer jeden Art von Bewegung ohne Ausnahme zu, sobald $v = c$ wird. Diese traditionelle Auffassung stellt aber in Wirklichkeit eine unerlaubte Verallgemeinerung eines Spezialfalles dar.

wichtsradius des im „Lichtstadium“ sich befindenden Universums ist nach (12) des vorigen Aufsatzes gleich

$$R = \frac{3\,GM}{5\,c^2} \tag{3}$$

gewesen. Außer diesem anfänglichen Radius R müssen wir noch den augenblicklichen Radius R_t kennen. Wenn a den augenblicklichen Wert des Expansionskoeffizienten bezeichnet, so ist nach (1) die augenblickliche Dichte des Universums gleich $\frac{3\,a^2}{8\pi\,G}$, und daher haben wir:

$$\frac{4}{3}\pi R_t^3 \cdot \frac{3a^2}{8\pi\,G} = M,$$

oder:

$$R_t = \left(\frac{2G}{a^2}\right)^{1/3} M^{1/3}. \tag{4}$$

Setzt man $a = 1{,}8.10^{-17}$, $G = 6{,}66.10^{-8}$, $c = 3.10^{10}$, und $M = 2.10^{55}$, so erhält man aus (3) und (4):

$$\left.\begin{aligned} R &= 8{,}88.10^{26}, \\ R_t &= 2{,}018.10^{27}. \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Die vom expandierenden Universum bis jetzt verbrauchte kinetische Masse ist gleich

$$\frac{3\,GM^2}{5\,R\,c^2} - \frac{3\,GM^2}{5\,R_t\,c^2} = \frac{3\,GM^2}{5\,R\,c^2}\left(1 - \frac{R}{R_t}\right) =$$

$$= \frac{3\,GM^2}{5\,R\,c^2}\left(1 - \frac{8{,}88.10^{26}}{2{,}018.10^{27}}\right) = \frac{3\,GM^2}{5\,R\,c^2} \cdot \frac{1130}{2018},$$

oder im Hinblick auf (2) gleich $\frac{1130}{2018}\,M$. Sie ist natürlich nicht spurlos verbraucht worden, sondern hat sich in Ruhemasse verwandelt. Die im Universum noch verbliebene kinetische Masse ist daher gleich $\frac{888}{2018}\,M$. Ist nun die Gesamtmasse eines Partikelchens gleich m, so besteht sie durchschnittlich aus $m_0 = \frac{1130}{2018}\,m$

Ruhemasse und $m - m_0 = \frac{888}{2018} m$ kinetischer Masse. Die durchschnittliche Geschwindigkeit v_m kann aus folgender Gleichung gefunden werden:

$$\frac{888}{2018} mc^2 = \frac{1130}{2018} mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_m^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Man erhält:

$$\frac{v_m}{c} = 0{,}828 . \tag{6}$$

Wenn das Partikelchen ein Proton (oder ein Neutron) mit der Gesamtmasse $1{,}66.10^{-24}$ ist, so beträgt seine kinetische Masse $\frac{888}{2018} \cdot 1{,}66.10^{-24}$ Gramm, was einer kinetischen Energie von $\frac{888}{2018} \cdot 1{,}66.10^{-24}.9.10^{20} \doteq 6{,}57.10^{-4}$ Erg $= 413$ Millionen e-Volt entspricht. Nimmt man wie früher an, daß die Zahl der „ungeordneten" leichten Partikelchen gleich der Zahl der „ungeordneten" schweren sei, und daß sich eine genügende Äquipartition der Energie eingestellt habe, so beträgt die durchschnittliche kinetische Energie bei beiden Arten der Partikelchen 207 Millionen e-Volt.

Wir wollen wie früher die normale Maxwellsche Streuung der individuellen kinetischen Energien um ihren Durchschnittswert voraussetzen [5]). Diese „normale" Maxwellsche Energieverteilung soll weder durch ein absorbierendes Medium, noch durch irgendeinen anderen Faktor beeinflußt werden. Wie früher nehmen wir an, daß jede Sekunde 100 Partikelchen auf 10 cm² fallen. Dies bedeutet einen Energiestrom von $3{,}29.10^{-3}$ Erg.

---

[5]) Die weiter folgenden Berechnungen sind am einfachsten mit Hilfe einer von K. K. Järvinen zusammengestellten Tabelle durchzuführen (ZS. f. physikalische Chemie **93**, 747 [Tabelle 3], 1919). So z. B. entnehmen wir ihr, daß $5{,}887.10^{-6}$ aller Moleküle individuelle Geschwindigkeiten besitzen, die mehr als um das 3-fache die mittlere (quadratische) Geschwindigkeit übersteigen. Eine 3-fache Geschwindigkeit bedeutet aber eine 9-fache kinetische Energie. Wenn die mittlere Molekulargeschwindigkeit mit Lichtgeschwindigkeit vergleichbar ist, so wird die „normale" Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung gröblich falsche Resultate ergeben. Die „normale" Maxwellsche Energieverteilung hingegen wird vielleicht auch in diesen extremen Fällen ihre Gültigkeit beibehalten. Jedenfalls wollen wir eine solche Annahme machen.

$cm^{-2}.sec^{-1}$. Es läßt sich dann berechnen, daß alle 1,4 Sekunden ein Partikelchen von über 828 Millionen e-Volt auf die erwähnte Fläche fällt. Alle 28 Minuten fällt ein Partikelchen von über 1,86 Milliarden e-Volt, und alle 6,7 Jahre eins von über 3,31 Milliarden.

Wollen wir nun aber annehmen, daß die Äquipartition der Energie keine vollständige ist: 10% aller Partikelchen sind solche schwere Partikelchen, die der Äquipartition entgangen sind. Die durchschnittliche kinetische Energie dieser schweren Partikelchen ist also gleich 413 Millionen e-Volt geblieben. Dann fällt (speziell von diesen Partikelchen) alle 14 Sekunden ein Partikelchen von über 1,65 Milliarden e-Volt auf unsere Fläche, alle 280 Minuten eins von über 3,72 Milliarden e-Volt, und alle 67 Jahre eins von über 6,61 Milliarden.

Wir hatten das vorige Mal angenommen, daß seit Beginn der Expansion 3 Milliarden Jahre $= 9{,}468 . 10^{16}$ Sekunden verflossen sind, wobei wir uns auf die Radioaktivität der Meteorite stützten. Diese Zahl muß jedoch vergrößert werden, da nach unserer Theorie Meteorite nicht gleich beim Beginn der Expansion entstanden sein können, sondern erst nachdem die Expansion einige Zeit angedauert hat. Wir wollen daher die Sekundenzahl nach oben abrunden und $t = 10^{17}$ Sekunden annehmen. Der Weltradius hat sich in diesen t Sekunden von R bis R_t vergrößert. Somit ist die durchschnittliche Expansionsgeschwindigkeit gleich

$$u_m = \frac{R_t - R}{t},$$

oder in Hinblick auf (5):

$$u_m = \frac{2{,}018 . 10^{27} - 8{,}88 . 10^{26}}{10^{17}} = 1{,}13 . 10^{10}\,\mathrm{cm.\,sec^{-1}}.$$

Dies bedeutet, daß

$$\frac{u_m}{c} = 0{,}377 \tag{7}$$

ist. Diese Zahl macht keinen besonders unwahrscheinlichen Eindruck. Natürlich darf u_m in (7) nicht mit v_m in (6) verwechselt werden!

Alle diese Zahlen sind unter der Voraussetzung berechnet, daß die Masse des Universums gleich $2 . 10^{55}$ Gramm ist; andere

Voraussetzungen würden zu anderen Zahlen führen. Schreibt man aber der Masse des Universums einen gar zu großen Wert zu, so erhält man ein unwahrscheinlich kleines u_m. Bei einer Masse von etwa $6{,}85 \cdot 10^{-55}$ Gramm wird $u_m = 0$, was bedeuten würde, daß das Universum überhaupt nicht expandiert. Bei noch größeren Massen erhält man sogar negative Werte für u_m. Ist hingegen die Masse übermäßig klein angesetzt, so erhält man für den augenblicklichen Radius des Universums (R_t) einen unwahrscheinlich kleinen Wert, der in extremen Fällen sogar kleiner ausfallen kann, als die tatsächlich beobachtete Entfernung der weitesten Spiralnebel [6]).

Hier sei noch auf folgende scheinbare Diskrepanz zwischen unserer Theorie und der Beobachtung hingewiesen. Nach den Beobachtungen von Shapley und Miss Ames kann die durchschnittliche Dichte der inneren Metagalaxis gleich 10^{-30} g.cm^{-3} angenommen werden [7]). Wenn wir aber andererseits den beobachteten Expansionskoeffizienten $a = 1{,}8 \cdot 10^{-17}$ in (1) einführen, so erhalten wir $\varrho = 5{,}8 \cdot 10^{-28}$ g.cm^{-3}, also einen 580 mal größeren Wert als Shapley und Miss Ames. Wie soll man diese 580-fache Diskrepanz erklären? — Eine Antwort auf diese Frage könnte man vielleicht in der Untersuchung von S. Smith erblicken [8]). Dieser Forscher hat gefunden, daß die Masse des „Virgo cluster" $2 \cdot 10^{47}$ Gramm oder $10^{14}\, M_\odot$ betrage. Da man im „cluster" 500 Nebel unterscheiden kann, so ist die durchschnittliche Masse eines jeden Nebels $2 \cdot 10^{11}\, M_\odot$ Dies ist 200 mal mehr als der gewöhnlich angenommene Wert von $10^9\, M_\odot$. Smith hält es für möglich, diese 200-fache Diskrepanz durch Anwesenheit von internebularer Materie zu erklären. Mit anderen Worten: dank dem Vorhandensein von internebularer Materie erweist sich

[6]) „Boötes cluster" und „Ursa Major cluster No. 2" sind etwa 70 megaparsec von uns entfernt. Da ihre Expansionsgeschwindigkeiten etwa 40000 km. sec^{-1} betragen, so ist damit erwiesen, daß selbst bei diesen Entfernungen das Hubble'sche Expansionsgesetz noch seine Geltung beibehält (M. L. Humanson, Astrophys. Journ. **83**, 10, 1936). Man darf jedoch nicht vergessen, daß wir unsere Expansionsformel (1) unter der Voraussetzung abgeleitet haben, daß die Expansionsgeschwindigkeit beträchtlich kleiner als Lichtgeschwindigkeit ist. Daher haben wir nicht das Recht zu erwarten, daß das Hubble'sche Gesetz auch für mit R_t vergleichbare Entfernungen noch gelte.

[7]) Ich zitiere nach Arthur Haas, „Kosmologische Probleme der Physik", Leipzig 1934, S. 10.

[8]) S. Smith, Astrophys. Journ. **83**, 23, 1936.

die tatsächliche Dichte 200 mal größer als die scheinbare. Wenn nun im Falle des „Virgo cluster“ die 200-fache Diskrepanz durch Anwesenheit von internebularer Materie erklärt werden kann, warum könnte nicht auch unsere obenerwähnte 580-fache Diskrepanz auf analoge Weise erklärt werden? — Jedenfalls wäre eine solche Erklärung sehr naheliegend.

Bei unserer Berechnung der kinetischen Energien der „ungeordneten“ Partikelchen sind nur die Gravitationspotentiale des Universums während des Anfangsstadiums und während der Jetztzeit maßgebend. Unsere Theorie der kosmischen Partikelchen könnte man daher als „Gravitationstheorie“ bezeichnen. Es sei hier aber darauf hingewiesen, daß auch E. A. Milne die Energie der kosmischen Partikelchen als Gravitationsenergie auffaßt, wie er dies darlegt in seinem (mir bis jetzt leider noch unzugänglich gebliebenen) Buche: „Relativity, Gravitation and World-Structure“.

Nicht nur Protonen, Neutronen, Elektronen und Positronen unterliegen der Gravitation, sondern auch größere Körper, wie etwa Meteorite. Es taucht nun die scheinbar sehr berechtigte Frage auf: warum auf unsere Erde niemals Meteorite von solchen Geschwindigkeiten fallen, wie sie bei den kosmischen Partikelchen beobachtet werden? — Auf diese Frage gibt unsere Theorie eine sehr einfache Antwort. Das Sichzusammenballen von Partikelchen zu einem größeren Körper ist nur dann denkbar, wenn ihre relativen Geschwindigkeiten gering sind, wie dies bei den „geordneten“ Partikelchen der Fall ist. Wenn sich aber ein größerer Körper aus „geordneten“ Partikelchen gebildet hat, so wird seine relative Geschwindigkeit hinsichtlich eines in gleicher Weise entstandenen Nachbarkörpers gering sein. Die relative Geschwindigkeit eines Meteorits hinsichtlich unserer Erde ist rein „lokaler“ Natur, hervorgerufen durch ungenügende Homogenität in der Verteilung der Materie im Raume. Bei den „ungeordneten“ Partikelchen hingegen ist die Sachlage eine prinzipiell verschiedene. Selbst ein in nächster Nähe befindliches „ungeordnetes“ Partikelchen kann hinsichtlich der Erde eine relative Geschwindigkeit aufweisen, die an Lichtgeschwindigkeit grenzt. Die kosmischen Partikelchen sind die bis jetzt „ungeordnet“ gebliebenen Partikelchen jenes anfänglichen „Lichtstadiums“ des Universums, wo eine Bildung komplizierterer Atome noch undenkbar war. Dank der bis jetzt stattgehabten Expansion hat sich

die durchschnittliche kinetische Energie der Partikelchen zwar verringert, sie ist aber immer noch sehr viel größer geblieben, als die beim „Einfangen“ eines Neutrons oder Protons durch einen Atomkern frei werdende Energie. Unter solchen Bedingungen ist die Bildung von Elementen undenkbar. (Ganz so, wie in einem gewöhnlichen völlig ionisierten Gase keine Vereinigung der Elektronen mit den positiven Ionen zu bemerken sein wird, wenn die durchschnittliche kinetische Energie das entsprechende Ionisationspotential um ein Vielfaches übertrifft, und wenn dazu noch die Dichte des ionisierten Gases extrem klein ist.) Es ist klar, daß nur Elementarteilchen die Rolle von kosmischen Partikelchen spielen können; kompliziertere Atomkerne hingegen sind ausgeschlossen, und von Meteoriten kann erst recht keine Rede sein.

Die Form der Spiralnebel läßt sich auf Grund des gewöhnlichen Newtonschen Gravitationsgesetzes schwer erklären. Es macht den Endruck, als ob das Gravitationspotential im Spiralnebel zu rasch abnehme, was man als Überlagerung der Gravitationskraft durch eine „innere kosmische Repulsion“ deuten könnte. Es ist der Gedanke aufgetaucht, daß bei den Spiralnebeln ein analoges Expansionsbestreben vorhanden sei wie bei dem Universum als Ganzes [9]). Lambrecht, der diese Frage ebenfalls untersucht, spricht folgende Meinung aus: „Eine neue Theorie von Milne, die Fluchtbewegung mit Hilfe der klassischen Mechanik zu erklären, muß hier unberücksichtigt bleiben, da sie keine Anwendungsmöglichkeit auf das uns in erster Linie interessierende Problem der Entstehung der Spiralarme bietet“ [10]). Lambrecht irrt sich aber: die „elementare“ Expansionstheorie läßt sich ganz ungezwungen auch auf einzelne Spiralnebel anwenden! — Wir haben oben gesehen (S. 4), daß die Expansionsgeschwindigkeit eines jeden Partikelchens für einen jeden Beobachter eine parabolische sein muß. Dies ist aber nur bei absoluter Homogenität streng richtig. Entsteht hingegen eine große lokale Verdichtung (ein Nebel), so tritt eine entsprechende lokale Gravitationssteigerung auf. Die Gravitation dominiert jetzt in kleinen Entfernungen, in größeren hingegen gewinnen die Expansionsgeschwindigkeiten mehr und mehr an Bedeutung, da ja

[9]) Vgl. H. Vogt, Astron. Nachr. **243**, 405, 1931, und andere Stellen.
[10]) H. Lambrecht, Astron. Nachr. **254**, 119, 1935.

eine lokale Gravitationssteigerung nur eine lokale Bedeutung haben kann. Dies muß den Eindruck erwecken, als ob die (lokale) Gravitationskraft von einer mit der Entfernung wachsenden „inneren kosmischen Repulsionskraft“ überlagert würde. Sollten sich im Nebel noch weitere kleine, aber sehr kompakte Verdichtungen (Sterne) ausbilden, so wird dadurch die Sachlage nicht im geringsten geändert: man darf ja nicht vergessen, daß wenn eine gewisse Menge Nebelmaterie sich zu einem Stern verdichtet, dies keinen Einfluß auf den Bewegungszustand des Schwerpunkts dieser Menge haben kann.

Nach unserer „Gravitationstheorie“ beträgt die durchschnittliche kinetische Energie der primären kosmischen Partikelchen 207 Millionen *e*-Volt. Die individuellen kinetischen Energien können dabei natürlich bedeutend größer sein. Aber das Vorhandensein einer merklichen Anzahl solcher Partikelchen, deren individuelle kinetische Energien 10^{10} *e*-Volt beträchtlich übersteigen, läßt sich mit unserer „Gravitationstheorie“ nicht in Einklang bringen. Bei direkter Beobachtung mit der Wilson-Kammer hat man auch keine derartig großen Energien konstatieren können. Auf indirektem Wege hingegen will man das Vorhandensein primärer Partikelchen von 10^{11} *e*-Volt, ja selbst solcher von 10^{12} konstatiert haben. Dies zwingt uns auf die betreffende Frage und auf ihre Literatur näher einzugehen. Außerdem wollen wir noch untersuchen, ob nicht irgendeine andere in der Literatur vorgeschlagene Theorie die beobachteten Tatsachen besser erklären kann als unsere „Gravitationstheorie“. Wir schreiten also zur Übersicht der Literatur, wobei wir aber selbst auf eine entfernte Vollständigkeit unserer Durchmusterung verzichten wollen; außerdem wollen wir nur die neuere Literatur (seit 1929) in Betracht ziehen.

Bothe und Kolhörster fassen kosmische Strahlung als Korpuskularstrahlung auf: „Eine Korpuskularstrahlung könnte ... ihre Energie in sehr schwachen, dafür aber ungeheuer ausgedehnten Kraftfeldern erlangen, rechnet doch beispielsweise die Entfernung der „nichtgalaktischen Nebel“ nach heutigen Vorstellungen nach Millionen Lichtjahren“ [11]).

Carlson und Oppenheimer nehmen (noch vor Entdeckung

[11]) W. Bothe und W. Kolhörster, ZS. f. Phys. **56**, 777, 1929.

des „Breiteneffekts") an, daß die kosmischen Partikelchen Neutronen seien [12]). Die gleiche Ansicht äußert auch Swinne [13]).

Lemaître sagt: „If the cosmic rays originated chiefly before the actual expansion of the space, their original energy was even bigger, and it has been reduced by the expansion in the ratio of the change of the radius of the universe . . ." [14]). Dies steht in vollem Einklange mit unserer „Gravitationstheorie". Wir können jedoch Lemaître's weitere Gedanken nicht akzeptieren, wenn er sagt: „The only energy we know which is comparable to the energy of the cosmic rays is the matter of the stars. Therefore it seems that the cosmic rays must have originated from the stars". Da jeder Stern eine Atmosphäre besitzt, die das Entweichen der kosmischen Partikelchen verhindern könnte, so meint Lemaître: „The stars are borne without atmosphere; the atmosphere evolved after the escape of the cosmic rays". (Dazu sei zu bemerken, daß bei einem Stern „ohne Atmosphäre" seine äußeren Schichten die Rolle einer Atmosphäre übernehmen würden. Außerden müßte die Absorption einer aus dem Inneren ausgehenden Strahlung hauptsächlich schon in tieferen Schichten stattfinden, und nicht erst in der Atmosphäre des Sterns.) Die Energie der kosmischen Partikelchen erklärt Lemaître durch super-radioaktive Prozesse. Er hält es sogar für nicht unmöglich, daß das Gewicht eines super-radioaktiven Atoms mit dem Gewichte des ganzen Sterns vergleichbar wäre. Lemaître meint, daß die kosmische Strahlung α-, β- und γ-Strahlen enthalten müsse.

Millikan behauptet, „that there is no atomic transformation whatever that can furnish the necessary energy except an atom-building process" [15]). Millikan weist außerdem die Unmöglichkeit kosmischer elektrischer Felder mit gewaltiger Potentialdifferenz nach (vgl. oben über Bothe und Kolhörster).

---

[12]) J. F. Carlson and J. R. Oppenheimer, Phys. Rev. (2) **38**, 1788, 1931.

[13]) R. Swinne, ZS. f. technische Phys. **13**, 279, 1932.

[14]) G. Lemaître, Nature **128**, 705, 1931. — In einem späteren Artikel (Phys. Rev. (2) **43**, 87, 1933) faßt er die kosmischen Partikelchen als Sprengstücke von der „kosmischen Explosion" auf, welche die Expansion des Universums verursacht hat.

[15]) R. A. Millikan, Nature **128**, 713, 1931.

A. K. Das [16]) betrachtet die kosmische Strahlung als Temperaturstrahlung von 5.10^{12} Grad. Da eine solche Temperatur nur im Inneren der Sterne existieren kann, nimmt Das an, daß die entsprechenden energiereichen Strahlungsquanten von dort in Form kosmischer Strahlung nach außen gelangen.

Laue [17]) sieht in der Entstehung von Elementen die Ursache der kosmischen Strahlung (vgl. oben Millikans Ansicht).

Wegen des inzwischen entdeckten „Breiteneffekts" nimmt Swann [18]) an, daß die kosmischen Partikelchen Elektronen seien. Swann weist darauf hin, daß die Energie dieser Elektronen mindestens 10^{10} *e*-Volt betragen müsse, damit sie die Erdoberfläche beim magnetischen Äquator erreichen können.

In einem späteren Artikel erklärt Swann die Energie der kosmischen Partikelchen durch Änderung des stellaren lokalen Magnetismus. „It would be difficult to realize energies as 10^{10} volts from the magnetic fields of spots such as occur on the sun. Energies corresponding to 10^9 volts are, however, within the range of possibility, and it is suggested that electrons projected from such spots may play a part in auroral phenomena. For cosmic rays one must, however, probably look to the stars for the necessary conditions" [19]).

Pollard glaubt feststellen zu können, daß 16,7 % der kosmischen Strahlung die Maxwellsche Energieverteilung aufweisen [20]).

Bethe leitet eine Bremsformel für Elektronen relativistischer Geschwindigkeit ab [21]).

C. D. Anderson teilt mit: „Fig. 8 shows an electron of 113 million volts initial energy which loses 27 million volts in passing through 13.4 mm of lead. This corresponds to an energy loss close to 20 million volts per cm which is good accord with the calculated value of 19.4 million volts per cm of lead for electrons of 100 million volts energy given by Bethe. The mean value for energy loss in lead on the basis of our present data is, however, greater than this and is approximately

---

[16]) A. K. Das, Naturwissenschaften **19**, 305, 1931.
[17]) M. v. Laue, ebenda S. 530.
[18]) W. F. S. Swann, Phys. Rev. (2) **41**, 540, 1932.
[19]) W. F. S. Swann, Phys. Rev. (2) **43**, 217, 1933.
[20]) W. G. Pollard, Phys. Rev. (2) **44**, 703, 1933.
[21]) H. Bethe, ZS. f. Phys. **76**, 293, 1932.

35 million volts"[22]). Anderson weist noch darauf hin, daß in der kosmischen Strahlung Elektronen und Positronen in gleichen Mengen auftreten. Nach Andersons Meinung wird dadurch die hervorragende Rolle erwiesen, welche die „Paarbildung" bei der Absorption der kosmischen Strahlen spielt.

Heitler[23]) berechnet auf Grund der Diracschen relativistischen Wellengleichung (in erster Annäherung) die Bremsstrahlung eines Partikelchens, dessen Energie groß gegenüber mc^2 ist. Die berechnete Bremsung sei im Einklang mit den Messungen an kosmischer Strahlung. Auch Weizsäcker macht Berechnungen[24]). Sein Resultat sei innerhalb der verwendeten Näherungen mit den früheren Rechnungen identisch. Oppenheimer bestreitet Weizsäckers Ansichten, spricht von „an uncritical application of quantum mechanics to these problems"[25]), und weist darauf hin, daß Weizsäckers Formel mit der Beobachtung nicht im Einklange sei.

Bowen, Millikan und Neher[26]) schätzen die auf die irdische Atmosphäre einfallende kosmische Strahlung auf $3{,}2 \cdot 10^{-3}$ Erg . cm^{-2} . sec^{-1}, während sämtliche Sterne der Erde $6{,}91 \cdot 10^{-3}$ Erg . cm^{-2} . sec^{-1} gewöhnlicher strahlender Energie zusenden (also nur etwa doppelt so viel).

Compton und Stephenson[27]) sind zu der Überzeugung gelangt, daß Photonen keine merkliche Rolle in der primären kosmischen Strahlung spielen. Wahrscheinlich bestehe letztere zum größten Teil aus Protonen.

Williams[28]) findet, daß positive und negative Protonen die Rolle der energiereichsten kosmischen Partikelchen spielen.

C. D. Anderson und Neddermeyer[29]) stellen eine große Fluktuation in dem spezifischen Energieverlust der (positiven und negativen) Elektronen fest (bei manchen bis 10^8 e-Volt pro cm). Sie erklären dies durch die Entstehung eines oder mehrerer Photonen.

---

22) C. D. Anderson, Phys. Rev. (2) **44**, 409, 1933.
23) W. Heitler, ZS. f. Phys. **84**, 145, 1933.
24) C. F. v. Weizsäcker, ZS. f. Phys. **88**, 612, 1934.
25) J. R. Oppenheimer, Phys. Rev. (2) **47**, 44, 1935.
26) I. S. Bowen, R. A. Millikan and H. V. Neher, Phys. Rev. (2) **44**, 252, 1933.
27) A. H. Compton and R. J. Stephenson, Phys. Rev. (2) **45**, 441, 1934.
28) E. J. Williams, Phys. Rev. (2) **45**, 729, 1934.
29) C. D. Anderson and S. H. Neddermeyer, Phys. Rev. (2) **46**, 325, 1934.

Steinke veröffentlicht einen zusammenfassenden Bericht[30]). Er weist darauf hin[31]), daß eine Wasserschicht von 200 Meter nach Bethe (s. oben) nur von einem solchen Elektron durchdrungen werden könne, dessen Energie wenigstens 10^{11} *e*-Volt beträgt. Es seien aber Partikelchen beobachtet worden, die sogar eine Wasserschicht von 500 Meter durchdrungen haben. „Als abschließendes Ergebnis der bisherigen Betrachtungen können wir feststellen, daß die Ultrastrahlung aus diskreten Komponenten besteht, deren Energien im Falle einer Wellenstrahlung zwischen 10^7 und 10^{10} *e*-Volt, im Falle einer Korpuskularstrahlung zwischen 10^9 und 10^{12} *e*-Volt liegen.“ Weiter sagt er: „Außerdem geht aus dem Vorhandensein von Strahlung in äquatorialen Gegenden hervor, daß diese entweder nicht beeinflußbar ist (Photonen, Neutronen) oder daß sie Energien von mehr als $4 \cdot 10^{10}$ *e*-Volt besitzt[32]). Hinsichtlich der sogen. „Hoffmannschen Stöße“ sagt Steinke: „Die größten bisher gemessenen Stöße (etwa 200 000 000 Ionen) stellen bei Annahme einer Bildungsenergie von 32 *e*-Volt für ein Ionenpaar bereits Energien von $6 \cdot 10^9$ *e*-Volt dar. Hierbei ist in der Kammer nur ein kleiner Teil der Korpuskelreichweite zur Wirksamkeit gekommen. Bei einer Reichweite von 5 cm Pb ($3{,}5 \cdot 10^4$ cm Luft) und einer noch häufig beobachteten mittleren spezifischen Ionisation von 10^5 Ionen/cm Luft ergibt sich bereits eine Energie von $1 \cdot 10^{11}$ *e*-Volt“[33]). Für den gesamten Energiefluß der Ultrastrahlung akzeptiert Steinke die Zahl $3{,}5 \,.\, 10^{-3}$ Erg.cm^{-2}.sec^{-1}[34]) (vgl. oben die Schätzung von Bowen, Millikan und Neher).

Auch Geiger hat einen zusammenfassenden Bericht veröffentlicht[35]). Er unterscheidet 5 Arten von Strahlen, wobei er die primären als A-Strahlen bezeichnet. Er hält letztere für geladene Massenteilchen[36]). Er hat auch die mit der Wilson-Kammer beobachtete Energieverteilung der Ultrateilchen in einer

---

[30]) E. G. Steinke, „Die kosmische Ultrastrahlung“, Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften **13**, 89, 1934.

[31]) Ebenda, S. 106.

[32]) Ebenda, S. 108.

[33]) Ebenda, S. 128 f.

[34]) Ebenda, S. 132.

[35]) H. Geiger, „Die Sekundäreffekte der kosmischen Strahlung“, Ergebn. d. exakten Naturw. **14**, 42, 1935.

[36]) Ebenda, S. 46.

Tabelle zusammengestellt[37]). Da diese Tabelle für uns Interesse hat, reproduzieren wir sie teilweise.

Energien in 10^6 *e*-Volt	P. Kunze		C. D. Anderson	
	Zahl der positiven Partikelchen	Zahl der negativen Partikelchen	Zahl der positiven Partikelchen	Zahl der negativen Partikelchen
unter 500	15	16	14	15
500—1000	10	7	9	11
1000—1500	9	2	5	3
1500—2000	5	1	4	1
2000—2500	1	1	4	3
2500—3000	1	1	3	3
über 3000	—	—	0	1

In dieser Tabelle wird vorausgesetzt, daß die Partikelchen Elektronen seien. Sollten sie aber Protonen sein, so verschiebt sich die Energieskala in folgender Weise[38]):

Elektronen:	500	1000	1500	2000	2500	3000.10^6 *e*-Volt
Protonen:	120	440	840	1270	1740	2210.10^6 *e*-Volt

Bei Kunze sind 6 Strahlen nicht eingetragen, bei denen wegen zu hoher Energie die Krümmung nicht mit Sicherheit meßbar war.

Nach Newman und Walke[39]) lassen sich zwei scharf getrennte Gruppen von kosmischen Partikelchen beobachten: solche, die nur einige Zentimeter Blei durchdringen können, und solche, die viele Meter durchdringen. Da es bis jetzt noch nie gelungen sei eine Entstehung von Partikelchen der „härteren" Gruppe in der Luft oder in anderer Materie zu beobachten, müßten diese Partikelchen als die primären angesehen werden. Sie seien wahrscheinlich schwere Ionen.

Kolhörster will im Dezember 1934 bei der kosmischen

[37]) Ebenda, S. 72, Tabelle 11.

[38]) Ebenda, S. 73.

[39]) F. H. Newman and H. J. Walke, Phil. Mag. (7) **20**, 263, 1935.

Strahlung „ungewöhnliche Schwankungen“ konstatiert haben, und zwar ungefähr gleichzeitig mit dem Aufflammen der Nova Herculis. „Es ist daher nicht ganz unwahrscheinlich, daß die Nova für die beobachtete Zunahme der Höhenstrahlung in Betracht zu ziehen wäre, zumal ja bei diesen Sternen genügend große Energiemengen zur Erzeugung von Höhenstrahlen verfügbar sein sollen. Die Nova Herculis würde also zur Zeit 1 bis 2% der gesamten Höhenstrahlung liefern“ [40]). Hess und Steinmaurer finden jedoch, daß „The effect, if it is real, certainly does not exceed 2 per thousand of the total radiation“ [41]). Barnóthy und Forró finden, daß der problematische Effekt „does not exceed in any case four times the mean error“ [42]).

Schon etwas früher haben Baade und Zwicky [43]) die Frage aufgeworfen, ob nicht in den sogen. „Super-Novae“ die Quelle der kosmischen Strahlung zu suchen sei. Durchschnittlich erscheint in einem jeden Nebel alle 1000 Jahre eine Super-Nova. Die sichtbare Strahlung einer Super-Nova übertrifft etwa um das 10^8-fache die Sonnenstrahlung, und die „Lebensdauer“ beträgt ungefähr 20 Tage.

McCrea untersucht rein theoretisch Kolhörsters Nova-Hypothese [44]). Er kommt zu dem Schluß, daß eine durchschnittliche Nova, die im Verlaufe ihres „Lebens“ (nach Unsöld) 6.10^{44} Erg gewöhnlicher strahlender Energie aussendet, während derselben Zeitspanne etwa 10^{49} Erg an kosmischer Strahlung aussenden muß. In einem weiteren Artikel [45]) sagt McCrea, daß er die Super-Nova-Hypothese von Baade und Zwicky übersehen hatte. Er sagt weiter: „I offered no theory of the origin of cosmic rays... It turned out in point of fact that, on the present knowledge of stellar structure, one cannot definitely exclude the possibility of this source of the radiation, *on energy considerations alone*“.

Walke [46]) äußert die Meinung, „that the cosmic ray ions are mainly emitted from the heavier stars“.

---

40) W. Kolhörster, ZS. f. Phys. **93**, 431, 1935.
41) F. Hess and R. Steinmaurer, Nature **135**, 618, 1935.
42) J. Barnóthy and M. Forró, ebenda.
43) W. Baade and F. Zwicky, Phys. Rev. (2) **45**, 138, 1934; **46**, 76, 1934.
44) W. H. McCrea, Nature **135**, 371, 1935.
45) Ebenda S. 821.
46) H. J. Walke, ebenda S. 36.

Milne weist nach, daß die hohe kinetische Energie der kosmischen Partikelchen durch die im Universum wirkenden Gravitationskräfte erklärt werden könne: „The identification accounts for the observed isotropy; and it provides the origin of the high energies, predicting indeed that there is no upper limit to the energy of a single 'ray' ... Lastly, identification removes the old impasse to which other theories of the origin of cosmic radiation have appeared to lead: that if the primary rays were born in the interiors of stars, it is difficult to see how they could ever get out; yet if they were born as a result of multiple collisions in inter-galactic space, it is difficult to see how the inter-galactic density of matter could be high enough“ [47]).

H. Nie teilt mit: „Versuche, die ... unter 400 m Gestein angestellt worden sind, zeigen, daß dort keine Stöße mehr auftreten .... Neuere Forschungen lassen auch vermuten, daß die Häufigkeit der Stöße mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel sehr stark ansteigt“ [48]). „Die Neuartigkeit der Erscheinung kommt vor allem in der großen Ionenmenge [nämlich 10^8 bis 10^9] zum Ausdruck ... Selbst im günstigsten Falle aber können Elementarpartikeln auf einer Gasstrecke von 1000 cm LÄ [dies ist die Länge der Ionisationskammer] insgesamt nur rund 10^6 Ionenpaare erzeugen. Aber wenn auch Mitwirkung von schwereren Partikeln (insbesondere bei großen Stößen) nicht ausgeschlossen ist, wird man gezwungen sein, den gleichzeitigen Durchgang von einer großen Partikelzahl (bei großen Stößen bis zu mehreren 1000) anzunehmen. Ob es sich hier um etwas Ähnliches handelt wie bei den später entdeckten Elektronenschauern in Wilson-Kammern, ist eine zunächst noch offene Frage“ [49]).

Die beiden Montgomery weisen auf die hohe Energie der erwähnten Schauer hin: „... we see that at least half of the rays of the shower which emerge from the chamber have energies greater than 3×10^8 electron volts, and that the total energy in the showers which we observe must often exceed 3×10^{10} electron volts“ [50]).

Rumbaugh und Locher machen Mitteilung über Neutronen

[47]) E. A. Milne, ebenda S. 183.

[48]) H. Nie, ZS. f. Phys. **99**, 454, 1936.

[49]) Ebenda S. 455.

[50]) C. G. and D. D. Montgomery, Phys. Rev. (2) **49**, 711, 1936.

in der Stratosphäre: „If these neutrons are primary constituents of cosmic radiation, as the present evidence indicates, the free neutron must be comparatively stable.... The suggestion that primary cosmic radiation at high altitudes contains a strong component of α-particles whose effects are conspicuous at about 1 meter of water, is inconsistent with our observations... Moreover, the absence of observable primary α-particles cannot be explained by their disappearance through nuclear collisions“ [51]).

Millikan, Neher und Korff sagen: „Airplane measurements on cosmic-ray intensities to altitudes up to more than 26,000 feet have been made both in South America and in Asia, with results which show close agreement on the two sides of the earth, the apparent absorption coefficient in both localities being only slightly different from its value in the temperate latitudes. These results remove one of the chief arguments that has in the past been advanced for the great predominance of the corpuscular component of the incoming cosmic rays“ [52]).

Swann macht auf folgendes aufmerksam: „A charged particle is characterized by the fact that its ionization increases enormously towards the end of its range, so that, in the case of protons and alpha-particles, large and measurable spurts of ionization should be produced in relatively short distances by those rays which are ending their journeys“ [53]).

Compton ist für geladene Partikelchen [54]).

C. D. Anderson und Neddermeyer machen Mitteilung über folgende Beobachtungen: „Evidence is here found for the first time that electrons also can occasionally disintegrate nuclei and eject from them massive particles. In Fig. 10 an electron apparently disintegrates a lead nucleus, ejecting protons from it. Some evidence is found of disintegrations which seem to be produced by neutrons occurring as secondaries in the cosmic rays... Practically all the heavy particles can be interpreted only as secondaries produced within the atmosphere or material surrounding the cloud chamber. Certain types of disintegrations, here-

---

[51]) L. H. Rumbaugh and G. L. Locher, ebenda S. 855.

[52]) R. A. Millikan, H. V. Neher and S. Korff, ebenda S. 871.

[53]) W. F. G. Swann, ebenda S. 478. Vgl. auch: S. 650; C. G. and D. D. Montgomery, W. E. Ramsey and W. F. G. Swann, ebenda S. 890; W. F. G. Swann, Phys. Rev. (2) **50**, 1103, 1936.

[54]) A. H. Compton, Phys. Rev. (2) **50**, 1119, 1936.

tofore unobserved, in which the summed energies of the ejected particles exceed 1000 MEV show that at these high energies the ejection of several particles is common"[55]).

Sawyer spricht über Absorption der schauererregenden kosmischen Strahlen: „The coefficients of absorption .... are nearly equal to 0.018 cm^{-1} times the density"[56]).

Hsiung bestimmt den Absorptionskoeffizienten mit Hilfe dreier Geiger-Müllerscher Zähler[57]) zu $\mu = 2{,}2 \,.\, 10^{-3}\, cm^{-1}$, während die Ionisationskammer $\mu = 1{,}90 \,.\, 10^{-3}\, cm^{-1}$ ergibt.

Heisenberg sagt: „Die bisherige Quantenelektrodynamik gibt keine Erklärung für die Tatsache, daß sehr energiereiche Teilchen in einem einzigen Akt eine große Anzahl von Sekundärteilchen erzeugen können"[58]). Heisenberg gibt nun eine qualitative Erklärung der Schauerbildung, wobei er sich auf Fermis Theorie des β-Zerfalls stützt.

Aus Anlaß von Ultrastrahlungsmessungen im Bodensee erinnert Weischedel daran, daß schon in 150 m Wassertiefe die Ultrastrahlungsintensität nur noch etwa 1% des Wertes an der Seeoberfläche und nur etwa den 10000-sten Teil des Wertes in großen Höhen beträgt[59]).

Pfotzer berichtet über Messungen bei einem Aufstieg bis 29 km Höhe (10 mm Hg), und sagt unter anderem: „In diesen 115 Teilchen pro 4 min haben wir die Korpuskeln der Ultrastrahlung vor Eintritt in die Atmosphäre vor uns. Es sind dieselben Teilchen, welche außerhalb der Erdatmosphäre der Ablenkung durch das Magnetfeld der Erde unterworfen sind und den Breiteneffekt hervorrufen"[60]).

Messerschmidt sagt: „Bei einer Reichweite der Garben von 5 cm in Blei berechnet sich die Energie der häufigsten Stoßgröße aus Blei zu $5 \cdot 10^9$ e-Volt. Der größte überhaupt beobachtete Stoß hat eine Energie von etwa $5 \cdot 10^{11}$ e-Volt. Da die Energien um zwei bis drei Größenordnungen höher liegen als bei

---

[55]) C. D. Anderson and S. H. Neddermeyer, ebenda S. 271.
[56]) J. H. Sawyer, ebenda S. 25.
[57]) D. S. Hsiung, Phys. Rev. (2) **46**, 653, 1934.
[58]) W. Heisenberg, ZS. f. Phys. **101**, 533, 1936.
[59]) F. Weischedel, ebenda S. 754.
[60]) G. Pfotzer, ZS. f. Phys. **102**, 39 f., 1936.

den Schauern, erscheint es nicht mehr gegeben zu sein, die Stöße direkt mit den Schauern in Beziehung zu setzen“ [61]).

Regener bringt einen zusammenfassenden Bericht [62]). Er hält es für erwiesen, daß die primären Strahlen aus geladenen Partikelchen bestehen, denn neutrale würden keinen Breiteneffekt hervorrufen. Auch müssen sie aus kosmischen Räumen kommen (und nicht erst in unserer Atmosphäre entstehen), denn auf einer kurzen Strecke könnte sich das irdische Magnetfeld nicht auswirken. Auch müssen sie schon von Anfang an verschiedene kinetische Energien besitzen, denn der Breiteneffekt zeigt ein allmähliches Ansteigen der Ultrastrahlungsintensität vom Äquator bis zu einer Breite von 50^0. Die Ultrastrahlung erweist sich als um so durchdringender, je größere Schichtdicken sie passiert hat. „Man findet . . . noch Intensitäten in Tiefen, wo man, nach dem Absorptionskoeffizient am Erdboden gerechnet, überhaupt nichts mehr finden sollte. So erhält man in 200 m Wassertiefe noch etwa $4^0/_{00}$ des Wertes an der Meeresoberfläche, und in einer Tiefe gleich 700 m Wasseräquivalent . . . der Größenordnung nach etwa $1^0/_{00}$. Rechnet man die formalen Absorptionskoeffizienten aus, so findet man in 700 m Wassertiefe nur den 100. Teil des Absorptionskoeffizienten wie in der Atmosphäre (in mittleren Höhen), d. h. die Strahlung ist 100 mal durchdringender geworden. Oder, besser gesagt, hinter diesen Absorberdicken beobachtet man nur den kleinen Anteil der Strahlung, der ganz durchdringend ist; die weicheren sind schon früher absorbiert worden“ [63]). „Das eine kann man jedenfalls von vornherein sagen, daß die härtesten Anteile der Strahlung, soweit sie (wahrscheinlich) aus Elektronen bestehen, außerordentlich nahe an die Lichtgeschwindigkeit heranreichen müssen. Ihre Energie ist mindestens 10^{11} *e*-Volt“ [64]). „Mit ziemlicher Sicherheit kann man . . . annehmen, daß die primäre Ultrastrahlung, wenigstens in unseren Breiten, *ohne* Sekundärstrahlung aus dem Weltenraum in die Atmosphäre einfällt. Es ist zwar zu vermuten, daß die Ultrastrahlung entweder an ihrem Entstehungsorte oder aber auf ihrem

[61]) W. Messerschmidt, ZS. f. Phys. **103**, 55, 1936.

[62]) E. Regener, „Die kosmische Ultrastrahlung“, Naturwissenschaften **25**, 1—11, 1937.

[63]) Ebenda S. 2.

[64]) Ebenda S. 3.

Wege durch den Weltenraum bei der Begegnung mit kosmischen Staubmassen Sekundärstrahlen erzeugt hat. Diese Sekundärstrahlen werden aber, da sie wesentlich weicher als die primären Strahlen sind, durch das Magnetfeld der Erde weiter nach den Polen zu abgelenkt, wo in der Tat in größeren Höhen in der Atmosphäre größere Ultrastrahlungsintensitäten gemessen werden als in unseren Breiten" [65]). „Berücksichtigt man, daß bei den Wilson-Aufnahmen, die mit zwar breiten, aber nur ein paar Zentimeter tiefen Kammern gemacht werden, meist nur ein Bruchteil aller Einzelstrahlen eines Schauers erfaßt wird, so kann man schätzen, daß in den strahlenreichsten Garben mehr als 1000 Einzelstrahlen enthalten sind. Rechnet man die mittlere Energie eines Einzelstrahles zu 10^8 *e*-Volt, so kommt man zu dem Schluß, daß die Energie, die in den strahlenreichsten Garben steckt, bis an 10^{11} *e*-Volt heranreicht. Auch in der Ionisationskammer machen sich solche großen Schauer als „Hoffmannsche Stöße", als plötzliches Auftreten großer erzeugter Ionenmengen, bemerkbar" [66]). „Wie schon erwähnt, haben Wilson-Kammeraufnahmen in starken Magnetfeldern ergeben, daß ziemlich genau gleich viel positive wie negative Teilchen in der primären Ultrastrahlung enthalten sind.... Ob dieses *Elektronen* oder *Protonen* sind, ist nicht so leicht zu entscheiden.... Trotzdem glaubt man heute, daß die primäre Ultrastrahlung in der Hauptsache aus positiven und negativen Elektronen besteht. Die harte Komponente dagegen, welche bis in tiefe Wasserschichten hinabdringt, wird von vielen Autoren als Protonenstrahlung aufgefaßt. Doch ist das letzte Wort in dieser Angelegenheit noch nicht gesprochen... Die am zahlreichsten auftretenden Teilchen mit geringer Energie, bis etwa $3 \cdot 10^9$ *e*-Volt, sind dabei noch als sekundäre Teilchen aufzufassen, da Teilchen mit einer kleineren Energie als etwa $3 \cdot 10^9$ *e*-Volt die Atmosphäre nicht durchdringen können. Im übrigen geht die Verteilung auf die verschiedenen Energiestufen etwa mit der reziproken Energie im Quadrat" [67]). Regener ist der Super-Nova-Theorie der Ultrastrahlung (s. oben über Baade und Zwicky) nicht abgeneigt. „Die Lokalisierung des Entstehungsorte der Ultrastrahlung in die Nova- bzw. Super-Nova-Ausbrüche

[65]) Ebenda S. 4.
[66]) Ebenda S. 6.
[67]) Ebenda S. 6 f.

der Sterne wäre jedenfalls am besten verträglich mit den beobachteten zeitlichen Änderungen der Ultrastrahlungsintensität... Nach freundlicher brieflicher Mitteilung von Prof. Clay gab es sogar am 20. Mai dieses Jahres [Regener meint 1936] in mehreren Apparaten (Ionisationskammern und Zählrohren) gleichzeitig eine ziemlich plötzliche Erhöhung der Ultrastrahlungsintensität von etwa 10%, die im Juni ähnlich abklang wie die Helligkeit einer Nova" [68]).

Die beiden Montgomery sagen in einem neuen Artikel: „The conclusion is reached that the most likely entities are *protons* which lose energy according to the relation

$$-dE/dx = \lambda E + a,$$

where a represents the energy lost per unit path by ionization, and λE the energy which goes into the production of secondaries in the amount that is actually observed in the form of showers" [69]).

Bhabha hält es für erwiesen, daß zu dem Bestande der durchdringlichen primären Strahlen auch negative Partikelchen (Elektronen, oder auch negative Protonen) gehören [70]).

Ganz vor kurzem hat Cosyns die Ionisationsfähigkeit extrem schneller Partikelchen gemessen. Das Resultat ist unerwartet: „THEORETICAL calculation of the interaction between fast electrons and hydrogen atoms (Bethe, Williams, etc.) predict an increase of primary ionization when the energy of the incident particle exceeds about one million electron-volts ... Contrary to theory, we find that the primary ionization *decreases* for high-energy particles" [71]).

Bevor wir weitergehen, wollen wir einige Bemerkungen zu mehreren in der Literatur hie und da geäußerten Ansichten machen. Regener ist der Ansicht, daß Teilchen mit unter 3.10^9 e-Volt Energie als sekundäre anzusehen seien. Dagegen bemerken wir, daß diese Zahl sich doch offenbar nur auf die ursprüngliche Energie des Partikelchens, bevor noch letzteres die Atmosphäre durchdrungen hat, bezieht. Am Meeres-

[68]) Ebenda S. 10.

[69]) C. G. and D. D. Montgomery, Phys. Rev. (2) **51**, 217, 1937.

[70]) H. J. Bhabha, Nature **139**, 415, 1937.

[71]) M. G. E. Cosyns, Nature **139**, 802, 1937.

niveau hingegen können auch die primären Partikelchen beliebig kleine Geschwindigkeiten aufweisen, bis Null inklusive (letzteres, wenn die ursprüngliche Energie des primären Partikelchens zur Durchdringung der Atmosphäre knapp ausgereicht hat). Wollen wir aber trotzdem für einen Augenblick annehmen, daß alle Partikelchen mit unter 3.10^9 e-Volt Energie als sekundäre zu betrachten seien. Wie kann in einem solchen Falle Regener behaupten, daß die Wilson-Kammer uns Aufklärung über die Zusammensetzung der primären Strahlung gebracht habe? Zuverlässige Messungen kann man mit der Wilson-Kammer nur bei Energien unter 3.10^9 e-Volt ausführen, d. h. (nach Regeners Ansicht) nur bei sekundären Strahlen.

Nach Messerschmidt beträgt die häufigste Energie der Stöße 5.10^9 e-Volt, die maximale beobachtete Energie hingegen 5.10^{11} e-Volt. Andererseits berechnet Regener die Energie eines großen Schauers zu 10^{11} e-Volt. Dies bedeutet, daß die stärksten Stöße und die stärksten Schauer Energien von gleicher Größenordnung aufweisen. Wie ist dies mit Messerschmidts Behauptung in Einklang zu bringen, daß „die Energien [der Stöße] um zwei bis drei Größenordnungen höher liegen als bei den Schauern"?

H. Nie hält es für erwiesen, daß bei den großen Stößen mehrere tausend Partikelchen gleichzeitig in die Ionisationskammer eindringen, denn ein einzelnes Partikelchen wäre zur Erzeugung der beobachteten Ionenzahl völlig ungenügend. Es muß jedoch dazu bemerkt werden, daß jedes ausgelöste Ion vom stoßenden Partikelchen eine gewisse Menge kinetischer Energie übernimmt. Ist letztere groß genug, so kann das ausgelöste Ion von sich aus weitere Ionen auslösen. Auf diese Weise entsteht eine „lawinenförmige" Ionisation. (Eine soche „Lawine" stellt der gewöhnliche elektrische Funke dar, mit dem Unterschiede jedoch, daß im letzteren die ausgelösten Ionen ihre kinetischen Energien nicht direkt von den stoßenden Ionen erhalten, sondern vom äußeren elektrischen Felde. Ist die Energie der primären Partikelchen extrem groß, so könnte sogar eine „lawinenförmige" Zertrümmerung der schwereren Kerne zustande kommen. (Wir wollen jedoch hier auf die Frage nicht eingehen, ob die Schauer mit solchen „Lawinen" zu identifizieren seien.)

Alle Forscher scheinen darüber einig zu sein, daß die größten Stöße von solchen Partikelchen ausgelöst werden, deren individuelle

Energie 10^{11} e-Volt übersteigt. Ebensogroße Energien werden Partikelchen zugeschrieben, die Wasserschichten von Hunderten von Metern durchdrungen haben (die Intensität der Strahlung nimmt mit der Tiefe ab, aber ihre Härte steigt). Dieser Umstand müßte zur Folge haben, daß das Verhältnis der Stößezahl zu der Strahlungsintensität mit der Tiefe wachse. Wie ist es nun aber zu erklären, daß die Beobachtung das genaue Gegenteil zeigt? —

Nach der beobachteten Energieverteilung soll die Häufigkeit der Partikelchen umgekehrt proportional dem Quadrate der Energie sein. Dies kann aber unmöglich das wahre Energieverteilungsgesetz der primären Partikelchen bedeuten. Wäre letzteres der Fall, so könnten wir

$$dn = \frac{KdE}{E^2}$$

schreiben, wo dn die dem Energieintervall dE entsprechende Korpuskelzahl bedeutet, E die individuelle Energie und K eine Konstante. Ist E_1 eine beliebig gegebene individuelle Energie, und summiert man die Energien aller Partikelchen mit $E \geqq E_1$, so erhält man:

$$\int_{E_1}^{\infty} Edn = \int_{E_1}^{\infty} E \cdot \frac{KdE}{E^2} =$$

$$= K \int_{E_1}^{\infty} \frac{dE}{E} = K(\log \infty - \log E_1) = \infty,$$

was eine offenbare Unmöglichkeit darstellt. Summiert man hingegen die Energien aller Partikelchen mit $E \leqq E_1$, so erhält man:

$$\int_{0}^{E_1} Edn = K \int_{0}^{E_1} \frac{dE}{E} = K(\log E_1 - \log 0) =$$

$$= K(\log E_1 + \infty) = \infty,$$

also ebenfalls ein unmögliches Resultat.

Energien von etwa 10^{11} *e*-Volt können mit Hilfe der Wilson-Kammer nicht gemessen werden. Nur auf indirektem Wege will man die Existenz solcher Energien erwiesen haben. So z. B. wird die minimale Energie eines Elektrons berechnet, welches (die Wirkung des irdischen Magnetismus überwindend) am Äquator die Erdoberfläche zu erreichen imstande ist. Die Berechnungen ergeben $4 . 10^{10}$ *e*-Volt. Dies ist aber nur die minimale Energie; die durchschnittliche Energie der am Äquator einfallenden kosmischen Partikelchen ist natürlich größer, so daß 10^{11} *e*-Volt sehr plausibel aussieht. Leider wird bei diesen magnetischen Berechnungen ein Faktor nicht in Betracht gezogen, auf den bereits vor etwa 9 Jahren R. Gunn hingewiesen hat: „the layer [nämlich die Kennely-Heaviside-Schicht] is strongly diamagnetic“ [72]) Eine diamagnetische Schicht muß aber das irdische Magnetfeld nach außen hin mehr oder weniger abschirmen. In einem späteren Artikel [73]) wendet Gunn diese Idee auf den Sonnenmagnetismus an und sucht dadurch das ungemein schnelle radiale Abfallen des Sonnenmagnetfeldes zu erklären. Dies schnelle radiale Abfallen erklärt Chapman auf eine andere Weise: „It is shown that the combined effect of the gravitational, electrostatic, and magnetic fields existing in the sun's reversing layer will be to produce an eastward 'drift-current' of electrons, and that this current is of the right order of magnitude to explain the radial limitation of the sun's magnetic field.“ [74]). In Chapmans folgendem Artikel lesen wir: „...it is shown that the strong eastward motion in the chromosphere affords evidence that the general magnetic field of the sun cannot extend appreciably into the chromosphere“ [75]). Wenn eine Kombination des elektrostatischen, des magnetischen und des Gravitationsfeldes in der ionisierten Sonnenatmosphäre eine Driftbewegung der Elektronen hervorrufen kann, warum sollte etwas Ähnliches in der ionisierten Heaviside-Schicht unmöglich sein? — Man muß freilich mit der Möglichkeit rechnen, daß die beiden Erklärungen falsch sind, und daß ein noch unbekannter Faktor die radiale Begrenzung des magnetischen Sonnenfeldes

---

[72]) R. Gunn, Phys. Rev. (2) **32**, 134, 1928.

[73]) Ebenda **33**, 615, 1929.

[74]) S. Chapman, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **89**, 78, 1929.

[75]) Ebenda S. 80.

verursacht. Dies ist nätürlich nicht unmöglich. Woher sollen wir aber unter solchen Umständen die Sicherheit haben, daß dieser unbekannte Faktor nicht auch in der irdischen Atmosphäre seine Wirkung ausübt? — Kiepenheuer sagt: „Die Beobachtung zeigt, daß die magnetische Feldstärke des allgemeinen Magnetfeldes der Sonne mit zunehmender Höhe über der Photosphäre außerordentlich schnell abfällt, und zwar im Verlaufe von einigen hundert Kilometern von etwa 50 auf 10 Ørsted. Kleinere Feldstärken lassen sich mit Sicherheit spektroskopisch nicht nachweisen. Der Druck in diesem Gebiet ist von der Größenordnung 10^{-4} Atm. Das Sonnenfeld scheint also nach außen weitgehend abgeschirmt zu sein. Aus diesem Grunde wird das magnetische Feld der Sonne in der umkehrenden Schicht und in der Chromosphäre im wesentlichen tangentielle Komponenten in Richtung der Meridiane besitzen, da alle nach außen gehenden Feldlinien auf eine dünne, zur Sonne konzentrische Kugelschale zusammengedrängt werden. Auf den Mechanismus der Abschirmung sei hier nicht eingegangen. Eine einwandfreie Deutung steht noch aus“ [76]). An einer weiteren Stelle berechnet Kiepenheuer μ_0, d. h. das Verhältnis der Wirkung des unabgeschirmten Magnetfeldes der Sonne auf eine Protuberanz zu der entsprechenden Wirkung des Gravitationsfeldes, und findet, daß $\mu_0 \sim 10^7$ ist. „D. h. daß die Kraftwirkung des *unabgeschirmten* Magnetfeldes der Sonne auf eine Protuberanz diejenige des Gravitationsfeldes um das etwa 10^7 fache übertreffen würde“ [77]). Es liegt nahe zu erwarten, daß das Magnetfeld der Erde bei weitem nicht so gewaltig abgeschirmt ist wie dasjenige der Sonne, aber selbst eine mäßige Abschirmung müßte sämtliche quantitativen Betrachtungen über die Wirkung des irdischen Magnetfeldes auf die kosmische Strahlung völlig illusorisch machen. Damit wollen wir die Existenz einer solchen Wirkung durchaus nicht bestreiten; was wir beanstanden, ist nur die quantitative Seite der Frage, und keineswegs die qualitative.

Die erwähnte magnetische Wirkung scheint aber Sonderbarkeiten aufzuweisen. So müßten wir doch erwarten, daß der Breiteneffekt nicht nur bis zum 50. Breitengrade reicht, sondern

---

[76]) K. O. Kiepenheuer, ZS. f. Astrophys. **10**, 265 f., 1935.

[77]) Ebenda S. 273.

bis zu den Polen. Dies widerspricht aber den Beobachtungen. Zuerst glaubte man eine sehr einfache Erklärung gefunden zu haben: die weiter gegen die Pole magnetisch abgelenkten Partikelchen seien so „weich", daß sie die tieferen Atmosphärenschichten nicht erreichen könnten, und daß sie deshalb nur in den oberen Schichten anzutreffen seien. Die Stratosphärenbeobachtungen haben letzteres jedoch widerlegt. B. Gross sucht dies dadurch zu erklären, daß die primären Strahlen überhaupt keine „weicheren" Partikelchen enthalten, und daß sich die anfängliche Energieverteilung der primären Partikelchen „überhaupt nur über einen ziemlich schmalen Bereich erstreckt, also fast der einer scharfen Linie entspricht. In diesem Falle müßte man nach dem plötzlich einsetzenden Abfall auch in niedrigen Breiten wieder Konstanz erwarten. In der Tat findet sich auch zwischen 0 und 20° nur eine ganz schwache Intensitätsänderung" [78]). Eine andere Erklärung schlägt Jánossy vor [79]). Er meint, daß die „weichen" primären Partikelchen durch den Sonnenmagnetismus von der Erde abgelenkt werden. Derselben Ansicht ist auch Vallarta [80]). Wir können jedoch eine solche Erklärung nicht akzeptieren, da das magnetische Sonnenfeld viel zu stark abgeschirmt ist. Auch das Verhalten der Schauer gegenüber dem irdischen Magnetfelde weist unerwartete Sonderbarkeiten auf: „The non-existence of any correlation between shower intensity and the earth's magnetic field can likewise be interpreted in the sense that the primary shower-producing radiation is not composed of electrically charged particles. On the other hand, the experiments indicate a very good agreement between the variation of the shower intensity and that of the temperature of the outer air; both having a maximum in the late afternoon" [81]).

Als anderer indirekter Beweis für die Existenz von Energien über 10^{11} e-Volt gilt das enorme Durchdringungsvermögen eines (freilich sehr kleinen) Teiles der kosmischen Partikelchen. Dabei wird aber die Möglichkeit eines sogen. „Ramsauer-Effekts" nicht in Betracht gezogen (wir meinen hier nicht den Raumsauer-Effekt hinsichtlich der Atome als Ganzes, sondern denjenigen

[78]) B. Gross, ZS. f. Phys. **105**, 338, 1937.
[79]) L. Jánossy, ZS. f. Phys. **104**, 335, 1937.
[80]) M. S. Vallarta, Nature **139**, 839, 1937.
[81]) M. Forró, Nature **139**, 633, 1937.

hinsichtlich der Atomkerne). Das Vorhandensein eines solchen Effekts müßte für einen gewissen Teil der Partikelchen eine hohe selektive Durchsichtigkeit des Mediums bewirken, wodurch ungeheure Energien der betreffenden Partikelchen vorgetäuscht würden. Da diese Frage für uns sehr wichtig ist, so wollen wir auf die Eigenschaften des Ramsauer-Effekts näher eingehen.

Vor etwa 14 Jahren schrieb Ramsauer: „*Alle* Edelgase ... zeigen gegenüber den sonstigen bisher untersuchten Gasen ... die gemeinsame Eigentümlichkeit, daß der Wirkungsquerschnitt mit abnehmender Elektronengeschwindigkeit ein Maximum erreicht und dann wieder abfällt.... der Wirkungsquerschnitt steigt im Maximum auf das 4 bis 5 fache des gaskinetischen Querschnitts und sinkt bei dem kleinsten untersuchten Geschwindigkeitswert von etwa 0,75 Volt auf unter $^1/_7$ des gaskinetischen Querschnitts herab .... Die Edelgase Ne, A, Kr, X zeigen in bezug auf Lage und Höhe ihrer Maxima einen ausgesprochenen Gang: mit steigender Ordnungszahl (10; 18; 36; 54) wächst das Maximum absolut genommen stark an .... und rückt außerdem zu immer kleineren Elektronengeschwindigkeiten hin (Volt_{max} = 25; 13,2; 11,3; 6,4)“ [82]). Etwa 4 Jahre später schreibt Brüche: „Das jetzt wesentlich vermehrte Versuchsmaterial zeigt, daß der Ramsauereffekt keine spezielle Eigentümlichkeit der Edelgase ist, sondern bei allen bisher untersuchten Gasen auftritt .... Dagegen zeigt sich, daß bei einer nach äußerer Ähnlichkeit vorgenommenen Anordnung der Querschnittskurven in Gruppen solche Gase zusammenstehen, von denen auch sonst ähnliche Eigenschaften und ähnlicher Bau bekannt sind. Darüber hinausgehend läßt die Ähnlichkeit der schweren Edelgase .... es vermuten, daß für die Gestalt der Querschnittskurven die Anordnung und Zahl der „Außen“-Elektronen des Moleküls eine wesentliche Rolle spielt“ [83]). In späteren Arbeiten untersucht Ramsauer (zusammen mit Kollath) die Wirkungsquerschnittskurve für noch kleinere Elektronengeschwindigkeiten, bis 0,16 Volt. „Die Wirkungsquerschnittskurve des Ne fällt zwischen 1,2 und 0,2 Volt ständig ab. Die Wirkungsquerschnittskurve des X hat bei etwa $0{,}6_5$ Volt ein kräftiges Minimum, wobei der Anstieg nach kleineren Geschwindigkeiten

[82]) C. Ramsauer, Annalen der Phys. (4) **72**, 351, 1923.
[83]) E. Brüche, Annalen der Phys. (4) **83**, 1127, 1927.

steiler ist, als der Anstieg nach größeren Geschwindigkeiten.... Die Wirkungsquerschnittskurve des He verläuft innerhalb des Gebietes von 1,1 — 0,2 Volt im wesentlichen horizontal, wobei das Maximum bei $0{,}7_6$ Volt angedeutet ist" [84]). „CH_4 schließt sich den schweren Edelgasen auch insofern an, als es unterhalb 1 Volt nach Durchlaufung eines Minimums wieder ansteigt. Die Lage der Minima ist hierbei für Ar, Kr, CH_4 bzw. $0{,}3_9$; $0{,}6_0$; $0{,}4_3$ Volt" [85]). „Die Wirkungsquerschnittskurven der Edelgase und der Nichtedelgase zeigen bei den kleinsten noch untersuchten Geschwindigkeiten zum Teil einen Anstieg, zum Teil einen Abfall nach 0 Volt hin" [86]). Nach Ansicht der Verfasser erscheint es aber als möglich, daß bei sämtlichen Elementen der Wirkungsquerschnitt wieder ansteigt bei extrem kleinen Elektronengeschwindigkeiten, die zwischen 0,16 und 0 Volt liegen und experimentell schwer zu erfassen sind. In einem anderen Artikel stellen Ramsauer und Kollath in einer kleinen Tabelle die von verschiedenen Forschern gefundenen Werte des Argonminimums zusammen [87]).

Beobachter	Argonminimum bei
Ramsauer-Kollath	0,37 Volt
Normand	0,62 „
Rusch	0,4 „
Townsend-Bailey	0,39 „

Wir reproduzieren teilweise diese Tabelle. Wir sehen, daß Normands Wert aus der Reihe fällt, während die übrigen Werte gut untereinander übereinstimmen.

Im Falle des Ramsauer-Effekts erhält also ein sehr langsames Elektron die scheinbare Fähigkeit, ohne Energieverlust und ohne Ablenkung ein Atom zu durchdringen, als ob das starke elektrische Atomfeld gar keinen Einfluß auf das Elektron ausübte, als ob also das Elektron gegen das Atomfeld „immun" wäre. F. Hund schlug folgende Erklärung dieser sonderbaren Erscheinung vor. Wenn ein Atom von einem Elektron durchdrungen wird, erhält letzteres seitens des starken elektrischen

[84]) C. Ramsauer und R. Kollath, Annalen der Phys. (5) **3**, 563, 1929.
[85]) C. Ramsauer und R. Kollath, Annalen der Phys. (5) **4**, 101, 1930.
[86]) Ebenda S. 107.
[87]) C. Ramsauer und R. Kollath, Annalen der Phys. (5) **7**, 181, 1930.

Atomfeldes eine Beschleunigung, weshalb es (das Elektron) nach der klassischen Theorie eine der Beschleunigung entsprechende Energiemenge ausstrahlen müßte. „Da bei kleinen Geschwindigkeiten der klassische Energieverlust größer wäre als die kinetische Energie des Elektrons, da es ferner ein Atom ohne Elektronenaffinität wieder verlassen muß, kann das von außen kommende Elektron sich nicht klassisch bewegen, sondern muß das Atom auf einer Bahn mit geringerer Strahlung oder ohne Strahlung [also auch ohne Ablenkung und ohne Energieverlust] durchsetzen“ [88]). Hund's Theorie läßt sich jedoch nicht aufrechterhalten, da sie nicht erklärt, warum bei extrem kleinen Elektronengeschwindigkeiten der Wirkungsquerschnitt wieder ansteigt.

Eine ganz andere Erklärung des Ramsauer-Effekts gibt Elsasser. Er weist darauf hin, das die sogen. de Broglie-Wellenlänge gleich

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

ist. Daher müsse man auch erwarten, daß das entsprechende Elektron alle Eigenschaften einer Welle aufweise, deren Länge λ ist. „Versucht man z. B. den merkwürdigen Gang der freien Weglänge von Elektronen, den Ramsauer und nach ihm eine Reihe anderer Autoren gefunden haben, mit der oben besprochenen Hypothese zu deuten, so zeigt sich, daß die Kurven, die diesen Gang wiedergeben, eine ganz auffällige Übereinstimmung aufweisen mit den Kurven, die man in der klassischen Theorie für die Beugung von Licht an kolloidalen Kügelchen erhält. Es sieht danach so aus, als ob die langsamen Elektronen an den Atomen nach Gesetzen gestreut würden, wie sie für Licht der berechneten Wellenlänge [Elsasser meint die de Broglie-Wellenlänge] bei Streuung an Kugeln vom Radius der Atome gelten würden. Naturgemäß ist die Übereinstimmung nur qualitativ“ [89]). Faxén und Holtsmark behandeln das Problem des Ramsauer-Effekts wellenmechanisch [90]); desgleichen Mensing [91]). In einem anderen Artikel sagt Holtsmark: „Nach der Wellen-

[88]) F. Hund, ZS. f. Phys. **13**, 249, 1923.

[89]) W. Elsasser, Naturwissenschaften **13**, 711, 1925.

[90]) H. Faxén und J. Holtsmark, ZS. f. Phys. **45**, 307, 1927.

[91]) Lucy Mensing, ebenda S. 603.

mechanik ist die Streuung der Elektronen in einem Gas ein Beugungsphänomen ... Der Wirkungsquerschnitt als Funktion der Geschwindigkeit oder der Wellenlänge des Elektronenstrahls zeigt im allgemeinen Maxima und Minima, die als Beugungsmaxima bzw. -minima erkannt werden sollen"[92]).

Alle bisherigen Untersuchungen haben sich immer nur auf den Ramsauer-Effekt des ganzen Atoms bezogen. Sollte aber vielleicht auch noch ein Ramsauer-Effekt der Atomkerne existieren? — Diese Frage muß bejaht werden, unter der selbstverständlichen Voraussetzung, daß der Ramsauer-Effekt auch tatsächlich eine Beugungserscheinung darstellt, wie dies jetzt allgemein angenommen wird. In einem solchen Falle muß offenbar die notwendige de Broglie-Wellenlänge ungefähr proportional dem Radius des „Hindernisses" sein, welches die Elektronenbeugung hervorruft. Das Verhältnis des Atomradius zu dem Kernradius ist von der Größenordnung 10000. Deshalb muß die de-Broglie-Wellenlänge bei dem Kern-Ramsauer-Effekt etwa 10000 mal kleiner sein als bei dem Atom-Ramsauer-Effekt. Nehmen wir beispielsweise an, daß das Minimum des Atomwirkungsquerschnitts bei einer Elektronengeschwindigkeit von 0,5 Volt auftritt, also bei $v_1 = 4{,}22 \,.\, 10^7$ cm . sec^{-1}. Der entsprechende Impuls ist gleich

$$m_0 v_1 = 9 \,.\, 10^{-28} \,.\, 4{,}22 \,.\, 10^7 = 3{,}80 \,.\, 10^{-20}.$$

Die de Broglie-Wellenlänge λ ändert sich umgekehrt proportional dem Impulse. Da nach unserer Schätzung der Kern-Ramsauer-Effekt bei einem 10000 mal kleineren λ auftritt, so muß der entsprechende Elektronenimpuls 10000 mal größer sein, d. h. er muß betragen:

$$m v_2 = 3{,}80 \,.\, 10^{-20} \,.\, 10000 = 3{,}80 \,.\, 10^{-16}.$$

Da nun die lineare Elektronengeschwindigkeit v_2 nur wenig von Lichtgeschwindigkeit verschieden sein wird, kann man ohne großen Fehler $v_2 = c$ setzen, und dann erhalten wir:

$$mc = 3{,}80 \,.\, 10^{-16},$$

und also:

$$m = \frac{3{,}80 \,.\, 10^{-16}}{3 \,.\, 10^{10}} = 1{,}27 \,.\, 10^{-26}.$$

[92]) J. Holtsmark, ZS. f. Phys. **55**, 437, 1929.

Für die kinetische Energie des Elektrons ergibt sich: $(m - m_0)\, c^2 = (1{,}27 \,.\, 10^{-26} - 9 \,.\, 10^{-28}) \,.\, 9 \,.\, 10^{20} = 1{,}06 \,.\, 10^{-5}$ Erg = 6,6 Millionen e-Volt. Diese Zahl hat natürlich nur einen rein orientierenden Charakter. Sie zeigt jedoch, auf welche Größenordnung von Elektronenenergie man bei einem Kern-Ramsauer-Effekt gefaßt sein muß.

Bei noch kleinerer de Broglie-Wellenlänge ist ein Ramsauer-Effekt sogar hinsichtlich eines jeden einzelnen Elementarteilchens zu erwarten. In einem solchen Falle wird das entsprechende Elektron (auch bei einem zentralen Zusammenstoß) scheinbar widerstandslos durch das Proton (oder durch das Neutron) hindurchgehen. Nun besteht die gewöhnliche Materie letzten Endes aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Da die „Radien" dieser Elementarteilchen als mehr oder weniger gleich angenommen werden können, so wird für sie alle der Ramsauer-Effekt bei annähernd ein und derselben Elektronenenergie auftreten. Wir müssen daher erwarten, daß die gewöhnliche Materie für Elektronen von bestimmter Energie in hohem Grade durchsichtig ist. Es ist durchaus nicht verwunderlich, wenn man solchen Elektronen phantastische Energien zuschreibt.

Man kann jedoch auch ohne Ramsauer-Effekt sich einen solchen Prozeß vorstellen, wo phantastische Elektronenenergien vorgetäuscht werden. C. D. Anderson hat gezeigt, daß ein genügend energiereiches Elektron auch schwere Teilchen aus dem Kern auslösen kann (s. oben S. 20). Nehmen wir nun an, daß ein genügend energiereiches primäres kosmisches Elektron bereits in der obersten Atmosphärenschicht mit einem Sauerstoff- oder Stickstoffkern zusammenstößt, wobei ein Neutron ausgelöst wird. Das Neutron kann dabei eine beträchtliche kinetische Energie von dem stoßenden Elektron übernehmen. Nun ist die Absorbierbarkeit der Neutronen so gering, daß sie gar keiner phantastischen Energie bedürfen, um gewaltige Schichtdicken zu durchdringen. Nehmen wir an, daß unser obenerwähntes Neutron die ganze Atmosphäre und außerdem noch eine sehr dicke Bleischicht zwar durchdringt, aber schließlich mit einem Kern derart zusammenstößt, daß aus letzterem ein energiereiches Proton ausgelöst wird. Wenn nun jemand zufällig nur das Ende dieser Protonenbahn in der Wilson-Kammer beobachtet, wird er geneigt sein zu glauben, daß das Proton ein primäres sei, welches die ganze Atmosphäre und

dazu noch eine sehr dicke Bleischicht durchdrungen habe. Naturgemäß wird der Beobachter diesem „primären“ Proton eine phantastische Energie zuschreiben.

Wenn man also aus der berechneten Wirkung des irdischen Magnetfeldes, oder auch aus dem scheinbaren Absorptionskoeffizienten, Energien von 10^{11} bis 10^{12} e-Volt ableitet, so kann man nicht absolut sicher sein, daß diese Zahlen reell sind. Man kann nicht einmal völlig sicher sein, ob sich nicht die wirklichen Werte von den berechneten um Zehnerpotenzen unterscheiden.

Es gibt noch eine dritte Methode die primäre Energie der kosmischen Partikelchen zu messen. Man schätzt nämlich den Energieinhalt eines Schauers (oder eines Stoßes) mehr oder weniger genau ab. Dieser Energieinhalt muß gleich oder kleiner sein als die primäre Energie des kosmischen Partikelchens, welches den Schauer (oder den Stoß) verursacht hat. Für große Schauer (und große Stöße) erhält man angeblich Energien von über 10^{11} e-Volt, während nach unserer „Gravitationstheorie“ Energien von über 10^{10} e-Volt in der kosmischen Strahlung nicht anzunehmen sind. Jedenfalls könnten Partikelchen mit über 10^{11} e-Volt Energie nach der „Gravitationstheorie“ nur als ein unmessbar kleiner Prozentsatz auftreten. Es besteht also eine mindestens 10-fache Diskrepanz (nicht hinsichtlich der durchschnittlichen, sonder nur hinsichtlich der maximalen Energien der Partikelchen) zwischen unserer „Gravitationstheorie“ und der Beobachtung, vorausgesetzt natürlich, daß man die in den großen Schauern und Stößen auftretenden Energiemengen auch tatsächlich richtig geschätzt hat. Trifft letzteres zu, so sehen wir uns veranlaßt zu untersuchen, ob sich unsere „Gravitationstheorie“ nicht derart modifizieren läßt, daß die obenerwähnte 10-fache Diskrepanz verschwindet.

Unsere Diskrepanz könnte mit Leichtigkeit durch die Annahme beseitigt werden, daß unter den primären Partikelchen auch schwerere Atomkerne sich befinden, und daß dabei die Äquipartition in der Energieverteilung keine vollständige ist. Nach dem früher Gesagten jedoch (vgl. S. 11) müssen wir einen solchen Ausweg ablehnen.

Die Diskrepanz wäre auch sehr leicht behoben, wenn wir uns entschließen könnten, nach traditioneller Weise nicht die Gesamtmasse m, sondern die Ruhemasse m_0 eines fallenden

Körpers als konstant anzunehmen. Dann würde sich aus der relativistischen Formel

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$m \to \infty$ bei $v \to c$ ergeben, und wir hätten die Möglichkeit, das Auftreten beliebig großer Energien ungezwungen zu erklären. Jedoch müssen wir auch diesen Ausweg ablehnen, weil die traditionelle Auffassung mit dem Gesetz der Erhaltung der Energie unverträglich ist. So z. B. müßte man vom Standpunkt der traditionellen Auffassung annehmen, daß die Masse eines sich verdichtenden Sterns größer werde (trotz des Energieverlustes durch Ausstrahlung), da ja bei der Verdichtung Temperatur und durchschnittliche Molekulargeschwindigkeit zunehmen. Entgegen der traditionellen Auffassung nehmen wir daher an, daß bei einem frei fallenden Körper nicht die Ruhemasse m_0, sondern die Gesamtmasse m konstant bleibt. Unsere Auffassung führt zu $m_0 \to 0$ bei $v \to c$. Wir halten es nicht für möglich, unsere Auffassung zugunsten der traditionellen aufzugeben.

Die Diskrepanz könnte auch durch die Annahme beseitigt werden, daß bei extremen Energien die von uns vorausgesetzte normale Maxwellsche Energieverteilung stark von der Wirklichkeit abweiche. Wir können zwar die Unmöglichkeit einer solchen Annahme nicht einwandfrei beweisen, uns scheint aber letztere trotzdem sehr gewagt zu sein.

Wir hatten angenommen, daß die Masse des Universums gleich $2 . 10^{55}$ Gramm sei. Sollten wir uns entschließen, dem Universum eine größere Masse zuzuschreiben (z. B. $3 . 10^{55}$ oder $4 . 10^{55}$ Gramm), so würde dies zu vergrößerten Werten für die Energien der kosmischen Partikelchen führen. Leider erweist sich diese Vergrößerung auch im günstigsten Falle als ungenügend, um unsere 10-fache Diskrepanz zu beseitigen.

Die Ruhemasse eines Protons oder eines Neutrons kann gleich $1{,}66 . 10^{-24}$ angenommen werden. Diese Zahl bezieht sich aber nur auf freie Protonen und Neutronen. Dagegen ist die Masse eines Kernprotons oder eines Kernneutrons (infolge des bekannten Massendefekts von etwa 0,7 bis 0,8 %) kleiner als $1{,}66 . 10^{-24}$, obgleich sich im Kern die Protonen und Neutronen bewegen. Natürlich wird deren Ruhemasse im Kern erst recht

kleiner als $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ sein. Nehmen wir nun an, daß im Kern sich ein Mikro-Einwohner befindet, der da glaubt, daß die Ruhemasse eines Protons (oder eines Neutrons) auch außerhalb seiner „Welt“ kleiner als $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ sei. Von dieser Annahme ausgehend, berechnet der Mikro-Einwohner die Energie, welche bei dem Fallen eines Neutrons aus der Unendlichkeit bis in den Kern frei wird. Wenn nun aber ein Neutron tatsächlich von dem Kern „eingefangen“ wird, so wird die dabei frei werdende Energie den vom Mikro-Einwohner berechneten Wert übersteigen. Der Mikro-Einwohner hatte nämlich nicht in Betracht gezogen, daß innerhalb seiner „Welt“ das Neutron eine kleinere Ruhemasse besitzt als außerhalb. Wir könnten nun in analoger Weise annehmen, daß in der „geordneten“ Welt (d. h. in allen Himmelskörpern) die Neutronen-Ruhemasse kleiner ist als in der „ungeordneten Außenwelt“ der kosmischen Partikelchen. Wenn nun ein „ungeordnetes“ kosmisches Neutron von einem Himmelskörper „eingefangen“ wird, so muß die dabei tatsächlich frei werdende Energie die berechnete übertreffen. Wir halten jedoch eine solche Hypothese zur Beseitigung unserer Diskrepanz für sehr unwahrscheinlich, wenn nicht vom qualitativen, so doch vom quantitativen Standpunkt aus.

Wir sehen also, daß unsere „Gravitationstheorie“ der kosmischen Strahlen auf gewisse Schwierigkeiten stößt (wenn die bei großen Schauern und Stößen auftretenden Energiemengen auch tatsächlich richtig geschätzt worden sind), die sich jedoch nicht auf die durchschnittlichen, sondern nur auf die maximalen Energiewerte der Partikelchen beziehen. Wir können aber nicht mit Bestimmtheit behaupten, daß diese Schwierigkeiten unüberwindlich sind.

Wollen wir nun untersuchen, ob nicht vielleicht irgendeine andere in der Literatur vorgeschlagene Theorie der kosmischen Strahlung geringere Schwierigkeiten biete.

Vor etwa 6 Jahren äußerte Millikan die Meinung, daß „an atom-building process“ die notwendige Energie liefern könne (vgl. S. 13). Millikans Hypothese ist jedoch unhaltbar, da sie selbst dann zu geringe Energien liefert, wenn die gesamte bei der Kernbildung entstandene Energie als ein einziges Strahlungsquant ausgesandt wird. In der hier beigefügten Tabelle, die ich auf Grund von Eastman's [93]) Daten berechnet habe,

[93]) E. D. Eastman, Phys. Rev. (2) **46**, 9, 1934.

sind die Bildungsenergien einiger Kerne angegeben [94]). Vergleicht man diese Tabelle mit derjenigen auf S. 17, so erkennt man sofort die Unmöglichkeit, die größeren in der Wilson-Kammer gemessenen Energien durch Kern-Aufbau-Prozesse zu erklären. Radioaktive Prozesse können erst recht nicht in Frage kommen,

Elemente	Bildungsenergie der Kerne
Ne (Isotop 20)	137,5 Millionen *e*-Volt
Ne (Isotop 22)	152,0 „ „
Si	204,7 „ „
Ni	443,4 „ „
Sn (Isotop 112)	823,9 „ „
Sn (Isotop 124)	906,8 „ „
Ba	994,1 „ „
Pb (Isotop 206)	1350 „ „
Pb (Isotop 208)	1363 „ „

denn beim radioaktiven Zerfall eines Kerns wird sehr viel weniger Energie frei, als bei dessen Aufbau aus Protonen und Neutronen. Die „Zerstrahlung“ eines Elektrons und Positrons ergibt nur etwa 1 Million *e*-Volt, kommt also für uns überhaupt nicht in Betracht. Sogar das „Zerstrahlen“ eines Elektrons und Protons wäre ungenügend, da es nur etwa 900 Millionen *e*-Volt ergeben würde; außerdem glaubt heutzutage kein ernster Forscher an die Möglichkeit eines solchen Prozesses. Es geht auch nicht an, sich damit zu trösten, daß es vielleicht noch unbekannte Elemente von phantastisch hohen Ordnungszahlen gibt, daß vielleicht solche Elemente eine wesentliche Rolle beim Zustandekommen der kosmischen Strahlung spielen. „Schießt man ein positiv geladenes Teilchen gegen einen Atomkern, so muß es zunächst gegen das Coulombfeld anlaufen, das eine um so stärkere bremsende Wirkung auf das Teilchen ausübt, je höher die Ordnungszahl des Kernes ist“ [95]).

[94]) Nebenbei gesagt zeigt diese Tabelle, daß ein Pb-Kern (Isotop 208) durch den Stoß eines Partikelchens in 208 Teilchen (82 Protonen und 126 Neutronen) zersprengt werden kann, wenn die Energie des stoßenden Partikelchens 1363 Millionen *e*-Volt übersteigt. Bei einem Ne-Kern (Isotop 20) genügt zu dessen Zersprengung (in 10 Protonen und 10 Neutronen) ein stoßendes Partikelchen von über 137,5 Millionen *e*-Volt.

[95]) S. Flügge und A. Krebs, Phys. ZS. **36**, 471, 1935.

Je höher also die Ordnungszahl eines Elements ist, desto schwerer läßt sie sich (durch Hinzufügung neuer Protonen zum Kern) weiter erhöhen. „Die Packungsanteile (Massendefekte pro Teilchen) der leichteren Kerne (etwa bis Fe) sind nicht streng konstant, sondern nehmen weiter langsam zu ... Die Packungsanteile der schwereren Kerne nehmen nach nahezu konstantem Verlauf wieder langsam ab ... Die [letztere] Tatsache läßt sich, wie schon Gamow bei der Aufstellung des Tröpfchenmodells vermutet hatte, durch die Coulombsche Abstoßung der Protonen erklären“ [96]). Eine Verminderung des Massendefekts pro Teilchen bedeutet aber eine Verminderung der Bindungskraft dieses Teilchens an den übrigen Kernteil. Die Kernstruktur wird also bei wachsender Ordnungszahl immer unstabiler. Will man jedoch dem Kern gar keine Protonen, sondern immer nur neue und neue Neutronen zuführen, so muß auch dies schließlich zu einer Stabilitätsverminderung führen, denn ausschließlich aus Neutronen lassen sich keine Atomkerne aufbauen. Die Existenz eines unbekannten Elements, dessen Atomgewicht sehr viel größer als dasjenige des Urans ist, wäre also schon aus rein theoretischen Erwägungen nicht anzunehmen. Auf Grund alles Gesagten glauben wir behaupten zu dürfen, daß weder bekannte, noch unbekannte subatomare Prozesse bei der Entstehung der primären kosmischen Strahlung eine Rolle spielen können.

Bothe und Kolhörster erklären die Energien der kosmischen Partikelchen durch ungeheuer ausgedehnte elektrische Felder im Kosmos (vgl. S. 12). Millikan weist die Unmöglichkeit solcher Felder nach (vgl. S. 13). Wir unsererseits finden, daß die Entstehung und die Unterhaltung derartiger Felder jedenfalls kein leichteres Problem darstellen würde, als das Problem der kosmischen Strahlung selbst.

Swann erklärt die Energie der kosmischen Partikelchen durch Änderung des lokalen magnetischen Feldes, zwar nicht in den Sonnenflecken, wohl aber in den „Sternflecken“ (vgl. S. 14). Es darf jedoch nicht vergessen werden, daß wenn die Sterne als Quelle der Ultrastrahlung betrachtet werden, man anzunehmen gezwungen ist, daß sie annähernd ebensoviel Energie an kosmischer Strahlung wie an gewöhnlicher Strahlung emittieren. Un-

---

[96]) C. F. v. Weizsäcker, ZS. f. Phys. **96**, 431 f., 1935.

ter solchen Bedingungen müßte man einen wesentlich anderen Ionisationszustand der entsprechenden Sternatmosphäre erwarten, als er aus den Beobachtungen zu erschließen ist. Auch müßte bei einem einzelnen Stern während des Maximums der „Sternfleckentätigkeit“ der erwähnte Ionisationszustand völlig verschieden sein von demjenigen während des Minimums. Derartige Schwankungen könnten aber der Beobachtung nicht entgehen. Noch ein anderer Einwand läßt sich gegen Swann's Hypothese erheben. Der lokale Magnetismus der Sonnen- und Sternflecke wird wahrscheinlich durch relativ langsame Driftbewegungen der Elektronen verursacht. Die gesamte magnetische Energie aller gleichzeitig vorhandenen Flecke des Sterns wird sogar während des Maximums wahrscheinlich sehr viel kleiner sein, als die vom Stern im Verlaufe einer Sekunde ausgestrahlte Energiemenge. Die kosmische Strahlung rührt aber nach Swann bloß von der Änderung des lokalen Magnetismus her, besitzt also eine noch viel schwächere Energiequelle. Auf welche Weise sollte unter solchen Bedingungen die vom Stern ausgehende kosmische Strahlungsenergie beinahe gleich sein mit der gleichzeitig ausgehenden gewöhnlichen Strahlungsenergie? — Und dabei wären wir noch gezwungen anzunehmen, daß die uns so nahe Sonne keinen merklichen Beitrag zu der der Erde zugesandten kosmischen Strahlung liefere, denn ein merklicher Beitrag wäre mit der Beobachtung unvereinbar. Man dürfte allerdings annehmen, daß die magnetische Wirksamkeit der Sonne schwächer ist als diejenige vieler Sterne, aber doch nicht in einem derartigen Mißverhältnis! —

A. K. Das betrachtet die kosmische Strahlung als Temperaturstrahlung, die aus dem Inneren der Sterne in den Außenraum gelangt (vgl. S. 14). Nach unseren jetzigen Kenntnissen müßte sich jedoch die erwähnte Temperaturstrahlung auf ihrem langen Wege aus dem Sterninneren zur Oberfläche derart verändern, daß sie als ganz normale Oberflächenstrahlung den Stern verließe.

Baade und Zwicky sehen in den „Super-Novae“ die Quelle der Ultrastrahlung (vgl. S. 18). Auch Regener sympathisiert mit einer solchen Hypothese (vgl. S. 23 f.). Gegen diese Hypothese ist aber Folgendes einzuwenden. Ein durchschnittlicher „Nebel“ besteht aus etwa 10^9 Sternen, die wir, der Einfachheit halber, als unserer Sonne gleich annehmen wollen. Alle tausend

Jahre erscheint im Nebel eine „Super-Nova“ mit einer durchschnittlichen „Lebensdauer“ von etwa 20 Tagen. Dies bedeutet, daß unter $1{,}8.10^{13}$ Sternen immer irgendeine Super-Nova leuchtet. Die von der Super-Nova ausgehende Ultrastrahlungsenergie muß also beinahe $1{,}8.10^{13}$ mal oder rund gerechnet 10^{13} mal größer sein als die von der Sonne ausgehende „gewöhnliche“ strahlende Energie (weil ja die Intensität der kosmischen Strahlung nur etwas kleiner ist als die von allen Sternen unserer Erde zugesandte gewöhnliche Strahlung). Für die von der Super-Nova ausgehende „gewöhnliche“ strahlende Energie hingegen beträgt das erwähnte Verhältnis „bloß“ 10^8. Dies bedeutet, daß eine Super-Nova etwa $\frac{10^{13}}{10^8} = 10^5$ mal mehr Energie an „kosmischer“ als an „gewöhnlicher“ Strahlung emittiert. Die Ausstrahlung unserer Sonne beträgt $3{,}8 . 10^{33}$ Erg . sec^{-1}; eine durchschnittliche Super-Nova hingegen emittiert $3{,}8 . 10^{41}$ Erg . sec^{-1} gewöhnlicher Temperaturstrahlung und gleichzeitig $3{,}8 . 10^{46}$ Erg . sec^{-1} kosmischer Ultrastrahlung. Die Stellarmaterie darf aber höchstens den hunderttausendsten Teil dieser Ultrastrahlungsenergie absorbieren und in Wärmeenergie verwandeln, weil sonst die Temperaturstrahlung der Super-Nova größer als $3{,}8 . 10^{41}$ Erg . sec^{-1} sein würde. Diese Überlegung zwingt uns, den Erzeugungsort der Ultrastrahlung in die äußerste Oberflächenschicht der Super-Nova zu verlegen. Setzt man den durchschnittlichen Massenabsorptionskoeffizienten der Ultrastrahlung gleich 0,001, so kann die ungeheure Energieerzeugung von $3{,}8 . 10^{46}$ Erg . sec^{-1} nur in der äußersten Oberflächenschicht stattfinden, deren Dicke kleiner als 0,01 g . cm^{-2} ist. Außerdem müßte die dort erzeugte Ultrastrahlung die wunderliche Eigenschaft besitzen, sich außschließlich in der Richtung nach außen hin zu bewegen. Selbst wenn nur der hunderttausendste Teil der erzeugten Ultrastrahlung nach innen gerichtet (und dort natürlich absorbiert) wäre, müßte die Temperaturstrahlung der Super-Nova größer als $3{,}8 . 10^{41}$ Erg . sec^{-1} sein. Wie wahrscheinlich dies alles ist, möge der Leser selbst beurteilen. — Regener erwähnt eine briefliche Mitteilung von Clay, wonach am 20. Mai 1936 in mehreren Apparaten eine ziemlich plötzliche Erhöhung der Ultrastrahlungsintensität um etwa 10 % stattgefunden haben soll, die im Juni wie die Helligkeit einer Nova abklang (vgl. S. 24). Nach unserer Meinung müßte aber diese Erscheinung in sämtlichen Apparaten der Welt be-

merkbar gewesen sein, und nicht bloß „in mehreren". Außerdem müßte die Intensität der Ultrastrahlung eine Periode von 24 Stunden aufgewiesen haben (wegen der Erdrotation). Wenn die kosmische Ultrastrahlung durch eine hypothetische Super-Nova um 10 % vergrößert worden wäre, so müßte letztere der Erde etwa $3 \cdot 10^{-4}$ Erg . cm^{-2} . sec^{-1} an Ultrastrahlung zugesandt haben, also gleichzeitig auch $3 \cdot 10^{-4} / 10^5 = 3 \cdot 10^{-9}$ Erg . cm^{-2} . sec^{-1} an gewöhnlicher Temperaturstrahlung. Letzteres würde einem Stern ungefähr 9. Größe entsprechen. Ein Stern, der $3{,}8 \cdot 10^{41}$ Erg . sec^{-1} ausstrahlt, wovon auf unsere Erde $3 \cdot 10^{-9}$ Erg . cm^{-2} . sec^{-1} fällt, muß von uns etwa 1 Million parsec entfernt sein. Wir müßten also annehmen, daß am 20. Mai 1936 in einer Entfernung von etwa 1 Million parsec, d. h. in einem der nächsten Spiralnebel, ein neuer Stern von ungefähr 9. Größe aufgeflammt sein. Dies nachzuprüfen dürfte doch nicht übermäßig schwer fallen.

Ganz vor kurzem hat Alfvén eine neue Theorie der Ultrastrahlung entwickelt, wonach ihre Entstehung in die Doppelsterne verlegt wird. Letztere betrachtet Alfvén als magnetische Dipole und zeigt, daß durch ihre Bewegung unter bestimmten Bedingungen Elektronenergien von 10^{11} e-Volt zustande kommen können[97]). Dadurch könne man die Entstehung der primären kosmischen Ultrastrahlen erklären. — Gegen Alfvén's Hypothese läßt sich folgendes einwenden. Die Elektronen erhalten ihre kinetischen Energien letzten Endes auf Kosten der kinetischen Energie und der potentiellen Gravitationsenergie der um den gemeinsamen Schwerpunkt rotierenden Sterne. Der Einfachheit halber nehmen wir an, daß die Masse M des Hauptsterns viel größer als die Masse m des Begleiters sei. Dann können wir ohne großen Fehler sagen, daß m sich um das unbewegliche M mit der linearen Geschwindigkeit v bewege, wobei der Radius der Bahn gleich R sei. Wir haben dann:

$$\frac{GMm}{R^2} = \frac{mv^2}{R},$$

also ist:

$$\frac{GMm}{2R} = \frac{1}{2} mv^2 = \text{kinetische Energie von } m.$$

Macht man die übertrieben günstige Annahme, daß anfänglich m unendlich weit von M entfernt gewesen sei, so ist die gesamte

[97]) H. Alfvén, ZS. f. Phys. **105**, 319, 1937.

frei gewordene Energie gleich $\frac{GMm}{R}$, wovon die eine Hälfte als kinetische Energie von m auftritt, und also nur die andere Hälfte für die Ultrastrahlung zur Verfügung gestanden hat. Somit kann die Ultrastrahlung auch im besten Falle nur $\frac{GMm}{2R}$ Erg erhalten haben, was $\frac{1}{2}mv^2$ Erg gleich wäre. Es möge der Doppelstern seit t Sekunden „existiert" haben. Wir wollen annehmen, daß zur Bestreitung der gewöhnlichen Temperaturstrahlung sowohl im Hauptstern als auch im Begleiter $2\,\mathrm{Erg}\,.\,\mathrm{g}^{-1}\,.\,\mathrm{sec}^{-1}$ produziert werden (wie bei unserer Sonne). Da der Doppelstern seit t Sekunden „existiert", so wird er im ganzen $2(M+m)\,t$ Erg an Temperaturstrahlung emittiert haben. Außerdem wird er ungefähr halb so viel Energie an Ultrastrahlung ausgesandt haben, d. h. $(M+m)\,t$ Erg. Diese Zahl muß der zur Verfügung gestandenen Gravitationsenergie $\frac{GMm}{2R} = \frac{1}{2}mv^2$ Erg gleich sein. Wir erhalten also:

$$(M+m)\,t = \frac{1}{2}mv^2,$$

oder:

$$t = \frac{mv^2}{2(M+m)}.$$

Da nun aber $M > m$ ist, so können wir schreiben:

$$t < \frac{mv^2}{2(m+m)},$$

oder:

$$t < \frac{v^2}{4}.$$

Setzt man $v = 2\,.\,10^6\,\mathrm{cm}\,.\,\mathrm{sec}^{-1}$, was für einen durchschnittlichen Doppelstern wohl nicht weit von der Wahrheit sein dürfte, so erhält man:

$$t < 10^{12}\ \mathrm{sec}.$$

Dies bedeutet, daß die Ultrastrahlung höchstens seit ungefähr 30 000 Jahren existiere, was wohl ein völlig unzulässiges Resultat

darstellt[98]). Außerdem sei noch erwähnt, daß Alfvén die vermutlich sehr große Abschirmung des magnetischen Feldes der Sterne (vgl. S. 27 f.) bei seinen Berechnungen nicht in Betracht gezogen hat[99]).

Nachträglich wollen wir noch auf folgenden Ausweg zur Beseitigung der oben besprochenen 10-fachen Diskrepanz (vgl. S. 35) hinweisen. Wir haben gesehen, daß genügend energiereiche Ultrateilchen imstande sind die Kerne der Atome völlig zu zertrümmern und in freie Protonen und Neutronen aufzulösen. Diese können von anderen Kernen eingefangen werden, wodurch weiterer Aufbau oder auch Abbau der letzteren zustande kommen kann. Die Kernreaktionen sind teilweise endothermisch, teilweise exothermisch, und es ist schwer a priori zu sagen, welche Reaktionen überwiegen werden. Es ist nicht unmöglich, daß die durch Kernreaktionen in einem Schauer (oder in einem Stoß) frei gewordene Energie (die man manchmal auf 10^{11} bis 12^{12} e-Volt schätzen muß) sehr viel größer ist als die Energie des primären kosmischen Ultrateilchens, der man also bloß eine „auslösende" Wirkung zuschreiben müßte (und die vielleicht viel kleiner als 10^{10} oder sogar kleiner als 10^{9} e-Volt sein mag). Eine derartige Idee ist gar nicht neu: man braucht sich nur daran zu erinnern, daß z. B. Atkinson in den Kernreaktionen sogar die Energiequelle der meisten Sterne sieht[100]).

---

[98]) Wir haben hier vorausgesetzt, daß die von den Doppelsternen als Ultrastrahlung emittierte Energie die Hälfte der Temperaturstrahlung ausmache, weil ungefähr in diesem Verhältnis die beiden Energiestrahlungen auf unsere Erde einfallen, und weil wir außerdem stillschweigend angenommen haben, daß es keine Sterne außer Doppelsternen gebe. In Wirklichkeit aber gibt es außer Doppelsternen noch viele andere Sterne. Zieht man letzteres in Betracht, so erhält man ein noch kleineres t.

[99]) Vielleicht könnte man aber Alfvén's Gedanken auf ein ganz anderes Gebiet anwenden. Man kann die Sonnenkugel als aus einer unendlichen Zahl paralleler magnetischer Dipole bestehend betrachten, die um die Sonnenachse rotieren (jedoch nicht mit absolut gleichen Winkelgeschwindigkeiten) und ihr annähernd parallel bleiben. Vielleicht könnte dies zur Vergrößerung der Elektronengeschwindigkeiten in Alfvén's Sinne führen. Nach Grotrian's Beobachtungen soll ja die durchschnittliche Elektronengeschwindigkeit in der äußeren Sonnenatmosphäre etwa 4.10^{8} cm. sec^{-1} betragen. Bis jetzt waren wir nicht imstande eine so hohe durchschnittliche Geschwindigkeit zu erklären (vgl. W. Anderson, Publ. de l'Observ. Astron. de l'Univ. de Tartu $\mathbf{29}_4$, S. 14).

[100]) R. d'E. Atkinson, Nature **128**, 194, 1931; Astrophys. Journ. **73**, 250 und 308, 1931; **84**, 73, 1936.

Wenn nun (nach Atkinson) Kernreaktionen die Energiequelle der Sterne bilden, warum können diese Reaktionen nicht (wenigstens teilweise) auch die Energiequelle großer Schauer oder Stöße sein? — Wir wollen eine solche Hypothese zwar nicht besonders verteidigen, aber mit ihrer prinzipiellen Möglichkeit müßte man immerhin rechnen.

Hauptergebnis.

Sämtliche zur Erklärung der primären kosmischen Ultrastrahlung bis jetzt vorgeschlagenen Theorien sind völlig indiskutabel, ausgenommen die „Gravitationstheorie". Zwar bietet auch letztere gewisse Schwierigkeiten, doch sind diese „von ganz anderer Größenordnung" als die Schwierigkeiten der übrigen Theorien.

Anhang I.

Der Gleichgewichtsradius des sich im (labilen) „Lichtstadium" befindlichen Universums ist nach (3) gleich

$$R = \frac{3\,GM}{5\,c^2}. \tag{8}$$

Nach (7) haben wir:

$$\frac{u_m}{c} = 0{,}377,$$

wo

$$u_m = \frac{R_t - R}{t}$$

ist, und R_t den augenblicklichen Radius des Universums bedeutet. Wir haben offenbar:

$$R_t = R + u_m t = R + 0{,}377\,ct,$$

und daher ist

$$R_t > 0{,}377\,ct. \tag{9}$$

Wenn ein Beobachter von der Expansion des Universums nichts weiß, so wird er selbstverständlich

$$R = R_t \tag{10}$$

setzen. Wenn wir aber die Übereinstimmung dieser Gleichung

mit unseren Formeln (8) und (9) um jeden Preis erzwingen wollen, müssen wir nolens volens schreiben:

$$\frac{3\,GM}{5\,c^2} = R = R_t > 0{,}377\,ct,$$

oder:

$$G > \frac{5}{3} \cdot \frac{0{,}377\,c^3 t}{M},$$

oder:

$$G > 0{,}63\,\frac{c^3 t}{M}. \tag{11}$$

Aus $R_t = R + u_m t$ folgt, daß man bei genügend großem t ohne merklichen Fehler $R_t = u_m t$ schreiben kann. Da nach unserer Theorie die durchschnittliche Expansionsgeschwindigkeit u_m immer kleiner als Lichtgeschwindigkeit bleibt, so muß bei genügend großem t die Ungleichung

$$R_t < ct \tag{12}$$

bestehen. Aus (8), (10) und (12) erhalten wir:

$$\frac{3\,GM}{5c^2} = R = R_t < ct\,,$$

oder:

$$G < \frac{5}{3}\,\frac{c^3 t}{M}. \tag{13}$$

Wir können (11) und (13) folgendermaßen vereinigen:

$$\frac{5}{3}\,\frac{c^3 t}{M} > G > 0{,}63\,\frac{c^3 t}{M}. \tag{14}$$

Milne hat aus seiner Theorie die Gleichung

$$G = \frac{c^3 t}{M} \tag{15}$$

abgeleitet[101]), die unserer Beziehung (14) formell nicht widerspricht, aber von Milne anders interpretiert wird.

Anhang II.

Die volle Schwingungsdauer eines Pendels ist

$$\vartheta = 2\,\pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

[101]) E. A. Milne, Proc. Roy. Soc. London (A) **154**, 43, 1936, und andere Stellen.

wo die Anziehungsbeschleunigung g selbstverständlich proportional der Gravitationskonstante G ist. Ein Beobachter definiere die Pendellänge l als den N-ten Teil der Entfernung zweier Himmelskörper A und B, wobei diese Entfernung AB sehr groß sein möge. AB ändert sich offenbar proportional mit R_t, wobei letzteres gleich $u_m t$ gesetzt werden kann, wenn t sehr groß ist. Solange dabei u_m annähernd konstant bleibt, kann man ohne großen Fehler R_t und AB als proportional t annehmen. Also muß sich auch die Pendellänge

$$l = \frac{AB}{N}$$

proportional mit t ändern.

Dies bewirkt eine Verlangsamung der Schwingung, weil dann ϑ proportional mit $\sqrt{t}$ wächst. Der Beobachter, der nichts von der Expansion des Universums weiß, und der außerdem glaubt, daß nach (15) die Gravitationskonstante G (und also auch die Anziehungsbeschleunigung g) proportional t sein müsse, würde erwartet haben, daß ϑ nicht nur nicht wachse, sondern proportional mit $\sqrt{t}$ abnehme. Der Beobachter müßte sich also um das $\sqrt{t} \Big/ \frac{1}{\sqrt{t}} = t$-fache getäuscht sehen. Hat er die Erzählung von H. G. Wells „The new accelerator" gelesen, so wird er vielleicht auf den Gedanken kommen, daß die „wirkliche" Zeit „immer schneller gehe", und zwar proportional mit t, so daß die „entsprechenden Zeitintervalle" im selben Verhältnis immer kürzer werden. [Wenn sich die gemessene Schwingungsdauer ϑ größer erweist als man erwartet hat, so könnte dies ja in der Tat durch entsprechende Verringerung der Zeiteinheit erklärt werden. Wenn sich aber die Zeiteinheit verringert, so muß sich im selben Verhältnis auch jeder beliebige Teil der Zeiteinheit: $\Delta t = \frac{\text{Zeiteinheit}}{n}$ verringern, also auch $\lim (\Delta t) = dt$.] Wir können daher schreiben:

$$d\tau = K \frac{dt}{t}, \tag{16}$$

wo K den Proportionalitätsfaktor bedeutet, und τ eine neue Variable. Letztere kann man als eine besondere Art von „Zeit" auffassen, deren Bedeutung durch (16) definiert ist. Für die Gegenwart stimmen die Zeiten τ und t überein, so daß man schreiben kann:

$$\left.\begin{aligned} \tau_0 &= t_0 \\ (d\tau)_0 &= (dt)_0. \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

In der Zukunft und in der Vergangenheit gehen aber τ und t auseinander. Aus (16) erhalten wir:

$$(d\tau)_0 = K\frac{(dt)_0}{t_0},$$

also nach (17):

$$K = t_0,$$

weshalb wir statt (16) schreiben können:

$$d\tau = t_0 \frac{dt}{t}. \tag{18}$$

Die Intergration von (18) ergibt:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} d\tau = \int_{t_0}^{t} t_0 \frac{dt}{t},$$

oder:

$$\tau - \tau_0 = t_0 \log\left(\frac{t}{t_0}\right),$$

oder im Hinblick auf (17):

$$\tau = t_0 \log\left(\frac{t}{t_0}\right) + t_0. \tag{19}$$

Eine solche Gleichung ist auch von Milne abgeleitet, aber anders interpretiert worden [102]).

Zum Schluß mögen drei Druckfehler berichtigt werden. Auf S. 17, Fußnote [39]) muß 264 statt 263 stehen. Auf S. 25, 7. Zeile von unten „. . . . Felde.) Ist . . . .“ statt „. . . Felde. Ist . . .“. Auf S. 29, Fußnote [79]) 430 statt 335.

Herrn Professor E. A. Milne, der mich auf einige von mir übersehene Fakta aufmerksam gemacht hat, sei hier mein aufrichtigster Dank ausgesprochen.

---

[102]) E. A. Milne, Proc. Roy. Soc. London (A) **158**, 327, 1937, und andere Stellen.