

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

Zwölfter Jahrgang.

14. März 1924.

Heft 11.

Massenträgheit und Kosmos.

Ein Dialog.

Von H. Weyl, Zürich.

I. Und sie bewegt sich doch!

Petrus. Lieber Freund! Als wir uns gestern abend nach langer Trennung wiedersahen, mußte ich während unseres Gesprächs beständig an die Zeit von 1915 zurückdenken, die uns zuerst in gemeinsamem eifrigen Studium der Relativitätstheorie zusammenführte, in gemeinsamer Begeisterung und gemeinsamen Zukunftsträumen. Damals glaubten wir ja fast, das Weltgesetz schon in Händen zu haben, das alle Erscheinungen restlos erklärte! Seither habe auch ich wohl Kritik gelernt und bin „weiser“ geworden. Aber das hat mich doch fast schmerzlich betroffen, daß du dich sogar von der Grundidee losgesagt zu haben scheinst, die ich nach wie vor als den Kernpunkt der neuen Lehre ansehen muß. Laß uns heute ausführlich darüber sprechen, warum du nicht mehr glaubst, daß (*M*) die Trägheit eines Körpers durch das Zusammenwirken aller Massen des Universums zustande kommt. O Saulus! Saulus! wie kannst du dich so gegen die offen zutage liegende Wahrheit verstocken! — Nimm etwa das Foucaultsche Pendel. Newtons Meinung war: die Ebene, in welcher das Pendel schwingt, bleibt erhalten im absoluten Raum; die Fixsterne stehen auch fast still im absoluten Raum. Deshalb geht die Pendelebene mit den Fixsternen mit und rotiert relativ zur Erde. Einstein aber erklärte: Es gibt nur relative Bewegungen; das Zwischenglied des absoluten Raumes ist so fragwürdig wie überflüssig. Nicht dieses Gespenst, sondern die wirklich vorhandenen ungeheuren Fixsternmassen des ganzen Kosmos halten oder führen die Pendelebene. Die Erde plattet sich ab, weil sie — nicht absolut, sondern — relativ zu den Fixsternen rotiert. Wenn du diese Auffassung ableugnest, so weiß ich nicht, was überhaupt noch von der allgemeinen Relativitätstheorie übrig bleibt.

Paulus. Und doch ist es so — da hast du gestern abend ganz richtig gehört —, daß ich deine eben ausgesprochene Überzeugung nicht mehr zu teilen vermag; und wenn hier der Fels liegt, auf dem die Relativitätskirche steht, o Petrus!, so bin ich in der Tat ein Abtrünniger geworden. Aber um dich über meine Ketzerei ein wenig zu beruhigen, gestehe ich dir zunächst einmal unumwunden zu: Wenn jene auf Mach zurückgehende Deutung sich wirklich durchführen ließe, wäre sie auch mir außerordentlich sympathisch; sie gibt eine einfache, anschauliche

und in sich kräftige Antwort auf das Problem der Bewegung. Kein Zweifel auch, daß sie — neben der Gleichheit von schwerer und träger Masse — für Einstein das wichtigste Motiv war zur Ausbildung der allgemeinen Relativitätstheorie. Endlich bin ich mit dir darin einverstanden, daß man in einer derartigen konkreten Aussage physikalischen Inhalts den Kernpunkt der Theorie suchen muß, nicht aber in einem formal-mathematischen Prinzip wie dem von der Gleichberechtigung aller Koordinatensysteme. Dies Prinzip, das unglücklicherweise der Theorie ihren Namen gegeben hat, ist ja im Grunde ganz inhaltsleer; denn die Naturgesetze lassen sich unter allen Umständen, sie mögen lauten wie sie wollen, „invariant gegenüber beliebigen Koordinatentransformationen“ formulieren. Ebenso ist das kinematische Prinzip von der Relativität der Bewegung für sich nichtssagend, wenn nicht die physikalische Voraussetzung hinzutritt, daß (*C*) alle Geschehnisse kausal eindeutig bestimmt sind durch die Materie, d. h. durch Ladung, Masse und Bewegungszustand der Elementarbestandteile der Materie. Erst dann erscheint es auf Grund jenes Prinzips als grundlos und unmöglich, daß eine Wassermasse, auf welche keine Kräfte von außen wirken, im stationären Zustand einmal die Gestalt einer („ruhenden“) Kugel, ein andermal (die eines („rotierenden“) abgeplatteten Ellipsoids annimmt.

Petrus. Erfreut bin ich darüber, daß du den Grundsatz *C* so klipp und klar aussprichst; von ihm wird in der Tat all unser kausales Denken in der Physik geleitet. Niemand ist imstande, auf ein Stück elektromagnetischen Feldes anders einzuwirken als dadurch, daß er die das Feld erzeugende Materie anpackt. Aber wie kannst du dann daran zweifeln, daß die Trägheitsführung der Körper erzeugt wird durch die kosmischen Massen?

Paulus. Du hast recht: Ich für meine Person kann *C* nicht aufrechterhalten, weil ich die Undurchführbarkeit von *M* a priori einsehe. Ich behaupte nämlich, daß (*A*) nach der allgemeinen Relativitätstheorie der Begriff der relativen Bewegung mehrerer getrennter Körper gegeneinander ebenso wenig haltbar ist wie der der absoluten Bewegung eines einzigen.

Petrus. Wie? Du leugnest also, daß die Fixsterne sich relativ zur Erde drehen, und meinst, man könne ebenso gut sagen, sie ruhten? Wir

sehen doch aber Nacht für Nacht, wie sich der Sternenhimmel dreht!

Paulus. Was sich nach dem Zeugnis unseres Gesichtssinns um die Erde dreht, sind nicht die Sterne, sondern der „Sternenkompaß“, welcher hier an der Stelle, wo ich mich befinde, gebildet wird von den Richtungen der Lichtstrahlen, die in einem Augenblick von den Sternen her auf mein Auge treffen. Und das ist ein wesentlicher Unterschied; denn zwischen den Sternen und meinem Auge befindet sich das „metrische Feld“, welches die Lichtausbreitung determiniert und nach der Relativitätstheorie ebenso veränderungsfähig ist wie das elektromagnetische. Dieses metrische Feld ist für die Richtung, in der ich einen Stern erblicke, nicht minder wichtig wie der Ort des Sternes selbst. — Wäre der Raum nach der Vorstellung der alten Lichttheorie von einem substanzialen Äther lückenlos erfüllt, so hätte die Frage natürlich einen klaren Sinn, ob ein kleiner Körper in einem Augenblick relativ zu dem am Körperort befindlichen Äther sich bewegt oder nicht. Hier wird der Bewegungszustand zweier Substanzen miteinander verglichen, die sich an der gleichen Stelle befinden, die sich überdecken. Aber wie sollte es in der allgemeinen Relativitätstheorie möglich sein, den Bewegungszustand zweier *getrennter* Körper miteinander zu vergleichen? Zur Zeit *Machs* freilich, als man noch den starren Bezugskörper hatte, war das möglich; da konnte man sich eine Masseninsel, wie es unsere Erde ist, als starren Körper, dessen Maßverhältnisse ein für allemal durch die Euklidische Geometrie festgelegt sind, ideell über den ganzen Raum erweitert denken, und dann etwa konstatieren, daß die Sonne sich relativ zu ihm bewegt. Aber unter den Händen *Einsteins* hat sich das Koordinatensystem so erweicht (*Einstein* selber spricht ja gelegentlich von einem „Bezugsmollusken“), daß es sich simultan der Bewegung aller Körper in der Welt anzuschmiegen vermag; du kannst sie, wie sie sich auch bewegen mögen, mit einem Schlage alle „auf Ruhe transformieren“. Denk dir die vierdimensionale Welt als eine Plastelinmasse, die von einzelnen sich nicht schneidenden, aber sonst ganz unregelmäßig verlaufenden Fasern, den Weltlinien der Materieteilchen, durchzogen ist: du kannst das Plastelin stetig so deformieren, daß nicht nur eine, sondern alle Fasern vertikale Gerade werden. Wenn ich die vertikale Achse als Zeitachse deute, heißt das: jeder Körper verharrt an seiner Stelle im Raum. Wendest du das an auf die Fixsterne und stellst dir vor, daß auch das metrische Feld, die im Plastelin verlaufenden Kegel der Lichtausbreitung von der Deformation mitgenommen werden, so ruhen die Erde und alle Fixsterne in dem durch das Plastelin dargestellten Bezugssystem, aber der Sternenkompaß dreht sich dennoch in bezug auf die Erde genau so, wie wir es beobachten.

Petrus (nach einer Pause). Ja... ich kann

dagegen nichts Stichthaltiges vorbringen. Der Gedanke liegt ja eigentlich ganz auf der Hand. Du kommst also zu dem Schluß, daß unabhängig vom metrischen Feld der gegenseitige Bewegungszustand der verschiedenen Körper in der Welt ein reines Nichts ist; und wenn *C* zu Recht bestünde, so könnte das Weltgeschehen nur abhängen und müßte eindeutig bestimmt sein allein durch Ladung und Masse aller Materieteilchen. Da dies offenbar absurd ist — so darf ich deinen Gedanken wohl weiter spinnen —, muß jenes Kausalprinzip preisgegeben werden. Insbesondere kannst du die Abplattung der Erde ebenso wenig mit *Mach* und *Einstein* auf ihre Rotation relativ zu den Fixsternen zurückführen, wie mit *Newton* auf ihre absolute Rotation. — Vorläufig fehlt mir diesem Radikalismus gegenüber jeder Halt..., aber mein Gefühl sträubt sich noch durchaus dagegen, deiner allgemeinen und abstrakten Idee zuliebe eine so positive und befriedigende Anschauung wie die von der Erzeugung der Trägheitsführung durch die Weltmassen preiszugeben. Du leugnst, daß sie sich durchführen lasse; aber hat nicht *Einstein* bereits geleistet, was du leugnst, — in jener Arbeit, in der er seine ursprünglichen Gravitationsgesetze durch das „kosmologische Glied“ erweiterte¹? Angesichts der geschehenen Tat ist jeder Beweis ihrer Unmöglichkeit hinfällig.

Paulus. Ich kann dir nur erwidern, wenn wir uns zunächst des gemeinsamen Fundaments vergewissert haben, von dem wir beide ausgehen. Mir scheint, daß man den konkreten physikalischen Gehalt der Relativitätstheorie fassen kann, ohne zu dem ursächlichen Verhältnis zwischen Weltmassen und Trägheit Stellung zu nehmen. Seit *Galilei* und *Newton* sehen wir in der Bewegung eines Körpers den Kampf zweier Tendenzen, *Trägheit* und *Kraft*. Nach alter Annahme beruht die Beharrungstendenz, die „Führung“, welche dem Körper seine natürliche, die *Trägheitsbewegung*, erteilt, auf einer formalgeometrischen Struktur der Welt (gleichförmige Bewegung in gerader Linie), welche ihr ein für allemal, unabhängig und unbeeinflussbar durch die materiellen Vorgänge, innewohnt. Diese Annahme verwirft *Einstein*; denn was so mächtige Wirkungen tut wie die Trägheit — z. B. wenn sie bei einem Zugzusammenstoß im Widerstreit mit den Molekularkräften der beiden aufeinander fahrenden Züge die Wagen zerreißt —, muß etwas Reales sein, das seinerseits Wirkungen von der Materie erleidet. Und in den Gravitationserscheinungen, so erkannte *Einstein* weiter, verrät sich des „Führungsfeldes“ Veränderlichkeit und Abhängigkeit von der Materie. An dem Dualismus von Führung und Kraft wird also festgehalten; (*G*) aber die Führung ist ein physikalisches Zustandsfeld (wie das elektromagnetische), das mit der Materie in Wechselwirkung steht. Die Gravitation gehört zur Führung und nicht zur Kraft; nur so wird die Gleichheit von

schwerer und träger Masse von Grund aus verständlich.

Petrus. Und das Führungsfeld läßt sich nicht ohne Willkür in einen homogenen konstanten Bestandteil, die Galileische Trägheit, und einen variablen, die Newtonsche Gravitation, zerlegen; das Vorhandensein einer starren geometrischen Struktur wird geleugnet. — Ja, mit dieser Beschreibung bin ich ganz einverstanden. Und auch dein Terminus „Führungsfeld“ für die durch *Einstein* aufgestellte Einheit von Trägheit und Gravitation gefällt mir gut, weil er die physikalische Rolle und den realen Charakter des gemeinten Dinges deutlich bezeichnet. Wenn es trotz der einheitlichen Natur des Führungsfeldes in praxi — wenigstens näherungsweise und für ein beschränktes Gebiet — gelingt, dasselbe zu zerlegen in den homogenen Untergrund der Galileischen Trägheit und eine veränderliche, ihr gegenüber außerordentlich schwache Fluktuation, das Schwerefeld, so hat es damit etwa dieselbe Bewandnis, wie wenn der Geodät die tatsächliche Erdoberfläche mit allen Meeresbecken, Klippen, Tälern und Bergen von einer glatt verlaufenden Idealfäche, dem Geoid, aus konstruiert, dem er dann alle jene kleinen Buckel und Vertiefungen anfügen muß. Aus der einheitlichen Natur des Führungsfeldes folgt nun aber, daß es als Ganzes in der Materie verankert werden muß. An dem Analogon des elektrischen Feldes machst du dir's am besten klar. Das elektrische Feld zwischen den Platten eines geladenen Kondensators wird erzeugt von den in den Platten steckenden Elektronen; dieses Feld hat einen im ganzen homogenen Verlauf, aus dem es sich nur in der Umgebung der einzelnen Elektronen heraushebt wie kleine steile Bergkegel aus einer weiten Ebene. Aber nicht nur diese atomaren Abweichungen in der Umgebung jedes Elektrons werden von den Elektronenladungen erzeugt, sondern auch das durch Überlagerung entstehende homogene Feld zwischen den Platten. So wird auch die Trägheit durch das Zusammenwirken aller Massen in der Welt erzeugt; um jeden einzelnen Stern herum liegt dann noch jene Abweichung des Führungsfeldes vom homogenen Verlauf, die sich als Gravitationsanziehung des Sternes bemerkbar macht und wesentlich von ihm allein herrührt.

Paulus. Die Analogie ist bestechend; ich komme darauf zurück. Aber laß mich vorher noch dies sagen! Von der alten zu der neuen Auffassung G der Dinge übergehen, heißt: *den geometrischen Unterschied zwischen gleichförmiger und beschleunigter Bewegung ersetzen durch den dynamischen Unterschied zwischen Führung und Kraft.* Gegner *Einsteins* stellten die Frage: Warum geht bei einem Zusammenstoß der Zug in Trümmer und nicht der Kirchturm, an dem er gerade vorüberfährt — wo doch der Kirchturm relativ zum Zuge einen ebenso starken Bewegungsruck erfährt wie der Zug relativ zum Kirchturm? Darauf antwortet der ge-

sunde Menschenverstand: weil der Zug aus der Bahn des Führungsfeldes herausgerissen wird, der Kirchturm aber nicht. Man kann sich das ja bis in alle Einzelheiten deutlich machen, wie durch diesen Kampf zwischen Führung und Kraft die Wagen zertrümmert werden. Im gleichen dynamischen Sinne dreht sich die Erde; sie dreht sich gegenüber einem im Mittelpunkt angebrachten „Trägheitskompaß“, welcher dem Führungsfelde folgt. — Die Einsteinschen Gravitationsgesetze besitzen eine stationäre Lösung, welche eine gleichförmig rotierende Wassermasse mit ihrem Gravitationsfeld darstellt; du weißt selber, wie du das Problem anzusetzen hast. Die Lösung ist verschieden von dem statischen Feld einer ruhenden Wasserkugel; die rotierende Wassermasse wird nicht eine Kugel, sondern abgeplattet sein. Und was bedeutet dabei Rotation? Es hat genau den eben angegebenen dynamischen Sinn. — Solange man das Führungsfeld ignoriert, kann man weder von absoluter, noch von relativer Bewegung reden; erst bei Berücksichtigung des Führungsfeldes gewinnt der Begriff der Bewegung einen Inhalt. Die Relativitätstheorie will richtig verstanden, nicht die absolute Bewegung zugunsten der relativen ausmerzen, sondern sie vernichtet den kinematischen Bewegungsbegriff und ersetzt ihn durch den dynamischen. Die Weltansicht, für welche *Galilei* gekämpft hat, wird durch sie nicht kritisch zersetzt, sondern im Gegenteil konkreter gedeutet.

Petrus. Gegen deine ganze Darstellung habe ich nichts einzuwenden. Nur bleibst du dabei stehen, Materie und Führungsfeld selbständig nebeneinander zu betrachten; wird das Feld aber durch die Materie erzeugt, so sind's dann doch die Fixsterne, welche die Abplattung der Erde hervorbringen.

Paulus. Aber das leugne ich ja eben! Ich meine: was ich bisher dargelegt und in den beiden Sätzen G knapp formuliert habe, das allein greift in die Physik ein, liegt den tatsächlichen Einzeluntersuchungen von Problemen der Relativitätstheorie zugrunde. Das weit darüber hinausgehende Machsche Prinzip M aber, nach welchem die Fixsterne mit geheimnisvoller Macht in den Gang der irdischen Geschehnisse eingreifen sollen, ist bis jetzt reine Spekulation, hat lediglich kosmologische Bedeutung und wird darum für die Naturwissenschaft erst von Belang werden können, wenn der astronomischen Beobachtung nicht mehr nur eine Sterninsel, sondern das Weltganze zugänglich ist. Wir könnten diese Frage also ganz auf sich beruhen lassen, wenn ich nicht zugeben müßte, daß es allerdings verlockend ist, sich auf Grund der Relativitätstheorie ein Bild vom Weltganzen zu machen. Darum bin ich bereit, dir auch darüber Rede und Antwort zu stehen.

II. Kosmologie.

Petrus. Laß mich an ein bekanntes Ergebnis von *Thirring* ²⁾ anknüpfen! Auf einen ruhenden

Körper k im Mittelpunkt einer gewaltigen rotierenden Hohlkugel H (welche den Fixsternhimmel vertritt) wirkt nach den Einsteinschen Gravitationsgesetzen eine analoge Kraft wie die Zentrifugalkraft, die an ihm angreifen würde, wenn umgekehrt die Hohlkugel ruht, aber k rotiert. Allerdings ist ihre Intensität unter realisierbaren Verhältnissen viel geringer; die Zentrifugalkraft erscheint multipliziert mit einem winzigen Faktor, welcher gleich ist dem Verhältnis zwischen dem Gravitationsradius der Hohlkugelmasse und dem geometrischen Radius der Hohlkugel. Der Gravitationsradius einer Masse M beträgt, wenn M in Gramm gemessen wird, $1,87 \cdot 10^{-27} \times M$ Zentimeter; der Gravitationsradius der Erdmasse ist z. B. = 0.5 Zentimeter, derjenige der Sonnenmasse etwa 1,5 Kilometer. Man wird danach in Machscher Weise die Zentrifugalkraft, die Abplattung der Erde als eine Wirkung des um die ruhende Erde sich drehenden Sternenhimmels erklären können, wenn man annimmt, daß die mittlere Entfernung der Sterne so groß ist wie der Gravitationsradius ihrer Gesamtmasse.

Paulus. Bei der Anordnung von *Thirring* tritt aber an dem ruhenden Körper k außer der Zentrifugalkraft noch eine andere Kraft von vergleichbarer Stärke auf, die nicht wie jene von der Rotationsachse fortgerichtet ist, sondern parallel zu ihr wirkt. Außerdem ergibt sich ja, wie du selber erwähntest, die Zentrifugalkraft nur dann in dem richtigen Betrage, wenn zwischen Radius und Masse der Hohlkugel H ein genau abgestimmtes Verhältnis besteht. Es geht daraus klar hervor, daß es etwas anderes ist, ob k ruht und H rotiert, oder ob die Hohlkugel H ruht und der Körper k sich im entgegengesetzten Sinne mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit dreht, im Gegensatz zu dem Prinzip von der Relativität der Bewegung! Meine dynamische Auffassung macht den Unterschied ohne weiteres klar; und tatsächlich zeigt sich, wenn man *Thirring's* Formeln diskutiert, daß im ersten Fall die Materie des Körpers k dem Führungsfeld folgt, die der Hohlkugel H jedoch nicht, im zweiten Fall es sich umgekehrt verhält.

Petrus. Deine Bemerkung ist auch für mich aufklärend. Aber dein Einwand schüchtert mich nicht ein. *Thirring* operiert mit dem unendlichen Raum, und das von ihm errechnete metrische Feld ist von solcher Art, daß es sich im Unendlichen immer genauer jenem homogenen Zustand anschmiegt, der durch die Euklidische Geometrie beschrieben wird. Infolgedessen wirkt hier der unendlich ferne Saum des Raumes wie ein materielles felderzeugendes Agens. Durch die Analogie des elektrostatischen Feldes wird das deutlicher werden. Ruhende Ladungen erzeugen ein solches Feld; der wirkliche Verlauf desselben läßt sich aus den Nahewirkungsgesetzen nur dann eindeutig ableiten, wenn die Bedingung hinzugefügt wird, daß im Unendlichen das Feld

auf dem Nullniveau festgehalten wird. Der Raumhorizont wirkt wie eine unendlich große metallische Hohlkugel. Beim elektrischen so gut wie beim Führungsfeld ist somit der homogene Untergrund des Feldes, das „Nullniveau“, auf Rechnung dieses unendlich fernen Raumhorizonts zu setzen; von dort her legt sich eine ungeheure Macht beruhigend auf das Weltgeschehen. Er muß fallen, will man das Machsche Prinzip wirklich durchführen; der dreidimensionale Raum darf keinen Saum besitzen, er muß geschlossen sein (nach Art der Kugeloberfläche im Gebiete von 2 Dimensionen). Und nun konnte *Einstein* in der Tat, nachdem er seinem ursprünglichen Gravitationsgesetz eine kleine Modifikation, das sog. kosmologische Glied, hinzugefügt hatte, zeigen.¹⁾ Im Gleichgewicht ist die Welt räumlich geschlossen. Die Gesetze fordern die Anwesenheit von Materie; ohne Materie, heißt das, ist ein Führungsfeld überhaupt nicht möglich. Die Materie ist gleichförmig verteilt und ruht. Der Gravitationsradius der gesamten in der Welt vorhandenen Masse ist so groß wie der geometrische Weltradius; offenbar bestimmt die zufällig vorhandene Gesamtmasse die Krümmung und damit die Größe des Weltraums. Hier hast du den Anschluß an die Untersuchung von *Thirring*, und hier, meine ich, ist nun das Machsche Programm in einer Weise durchgeführt, die prinzipiell nichts mehr zu wünschen übrig läßt. Der eben geschilderte Gleichgewichtszustand ist natürlich nur makroskopisch zu verstehen. Die einzelnen Sterne werden sich bewegen wie die Moleküle eines in einen ruhenden Kasten eingeschlossenen Gases, das ja auch, makroskopisch gesehen, ruht und sich gleichförmig über das Kastennere verteilt. Es erklärt sich damit zugleich die merkwürdige und sehr der Erklärung bedürftige Tatsache, daß die Sternengeschwindigkeiten durchweg so klein sind gegenüber der Lichtgeschwindigkeit. Auch fallen die Paradoxien dahin, zu denen die unendliche Ausdehnung des Raumes in ihren astronomischen Konsequenzen geführt hat²⁾.

Paulus. Offen gesagt, kann ich mir nach dieser kosmischen Theorie noch durchaus kein klares und in den Einzelheiten stichhaltiges Bild davon machen, wie die Materie das Führungsfeld erzeugt.

Petrus. Vielleicht ist da die Bemerkung förderlich, daß schon auf Grund der gewöhnlichen Theorie, in welcher das kosmologische Glied fehlt, die Annäherung eines Körpers an einen andern eine induktive Wirkung auf seine träge Masse ausübt. Im statischen Gravitationsfeld ist die Lichtgeschwindigkeit f mit dem Gravitationspotential Φ durch die Gleichung verknüpft

$$f = c + \frac{\Phi}{c},$$

in welcher die Konstante c zufolge der Gleichung selber die Lichtgeschwindigkeit fern von allen gravitierenden Massen bedeutet. Zu jedem Körper gehört eine durch seinen inneren Zustand

allein bestimmte Konstante, der „Massenfaktor“ m_0 ; seine Energie E aber und seine träge Masse M (der Quotient aus Impuls und Geschwindigkeit) sind abhängig vom Gravitationspotential, auf dem sich der Körper befindet, nach den Formeln

$$E = m_0 f, \quad M = \frac{m_0}{f}.$$

Bringt man einen Körper an eine Stelle niederen Gravitationspotentials, legt man ihn z. B. vom Tisch auf den Fußboden, so vermindert sich folglich seine Energie; nämlich um den Betrag der Arbeit, die zu leisten ist, um ihn vom Fußboden auf den Tisch zurückzuheben. In demselben Verhältnis aber, wie seine Energie sich bei Annäherung an das Erdzentrum vermindert, erhöht sich seine träge Masse. Das weist doch deutlich darauf hin, daß die Trägheit der Körper sich restlos als eine Induktionswirkung der die Gravitation erzeugenden Weltmassen muß verstehen lassen.

Paulus. Wenn du mir nur sagen könntest, wie dieser Hinweis sich zu einer wirklichen Erklärung ausgestalten ließe! Je mehr ich darüber nachgedacht habe, um so größer schien mir die Kluft zu werden, die es noch zu überbrücken gilt. Im Grunde hat sich das Problem nur ein wenig verschoben: an Stelle der trägen Masse ist der Massenfaktor m_0 getreten. Er bleibt eine dem Körper allein eigentümliche Konstante, die von keinen Induktionswirkungen betroffen wird; keine Aussicht hat sich eröffnet, ihn durch eine Wechselwirkung aller Massen im Universum entstanden zu denken. Die Schwierigkeit, welche von dem Raumhorizont herkommt, ist natürlich durch den geschlossenen Raum behoben; diejenige aber, die überall im Innern des Weltkontinuums ihren Sitz hat, in seiner molluskenhaften Deformierbarkeit — denke an meine Feststellung A! — bleibt bestehen. Physikalisch undurchsichtig, ja bedenklich ist die Beschränkung auf statische Verhältnisse. Du fragst: Warum hat eine ruhende Punktladung ein elektrostatisches Feld F um sich, dessen Intensität umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung von der Ladung abnimmt? Die Nahwirkungsgesetze des elektrostatischen Feldes erklären das nicht. Berücksichtige nun aber die Zeit und analysiere den folgenden Vorgang: Von einem neutralen Mutterkörper löst sich eine kleine Ladung ab und kommt fern vom Mutterkörper im Augenblick t zur Ruhe. Wenn seit t jetzt eine Stunde vergangen ist, so herrscht das oben geschilderte Feld F um die Ladung herum in einem Umkreis von 1 Lichtstunde = ca. 10^{14} cm Radius. Aus den Gesetzen des veränderlichen elektromagnetischen Feldes ergibt sich zwangsläufig diese Ausbildung des Feldes F , wenn die Annahme hinzugefügt wird, daß vor Beginn der Ablösung der Raum feldfrei war. Nicht daran liegt's also, daß das Feld am unendlich fernen Raumhorizont festgehalten wird, sondern die

Bindung kommt her von dem Weltsaum der unendlich weit zurückliegenden Vergangenheit.

Sobald man sich nicht mehr auf die Statik beschränkt, besitzen die durch das kosmologische Glied erweiterten Gravitationsgesetze nach *de Sitter* eine sehr einfache Lösung, bei welcher (im Gegensatz zu *Einsteins* Behauptung) die Welt masseleer und übrigens ihr metrisches Feld vollkommen homogen ist⁴). Zum Zwecke der graphischen Darstellung streiche ich 2 Raumdimensionen, so daß die Welt nicht vier-, sondern nur zweidimensional ist. Die Bilder, welche ich konstruiere, liegen in einem dreidimensionalen Raum R , dessen Metrik so ist, wie sie die spezielle Relativitätstheorie der Welt zuschreibt; wenn die Vertikale als Zeitachse fungiert, ist also in einem rechtwinkligen Dreieck, dessen eine Kathete horizontal, dessen andere vertikal ist, das Quadrat der Hypotenuse gleich der Differenz der Quadrate der beiden Katheten. Ich unterscheide drei Hypothesen über den Zustand der Welt im großen.

I. (*Elementare Kosmologie*). Die Welt stimmt in ihrer metrischen Beschaffenheit überein mit einer vertikalen Ebene im Raume R . Die Sterne sind unendlich dünn verteilt und ruhen alle; ihre Weltlinien sind also vertikale Gerade. Der Kegel der Lichtausbreitung von einem Weltpunkt P aus wird gebildet von den beiden durch P laufenden Geraden, welche gegen die Vertikale um 45° geneigt sind. Das ist der Normalzustand, der durch die gegenseitige Einwirkung der Himmelskörper nur leicht gestört wird.

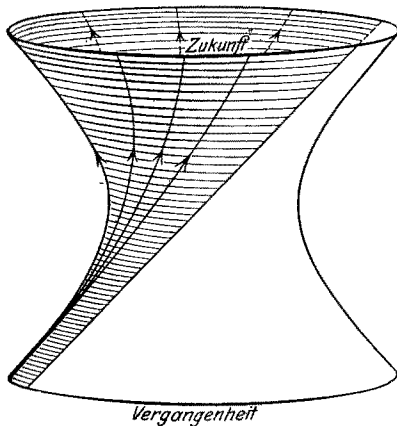
II. (*Einstein*). Die Welt wird metrisch treu dargestellt durch einen geraden Kreiszyylinder mit vertikaler Achse in unserm Raume R . Die Weltlinien der Sterne sind wiederum vertikale Gerade, aber die Massendichte ist nicht unendlich klein, sondern steht in einem genau abgestimmten Verhältnis zum Radius des Zylinderquerschnitts. Der Kegel der Lichtausbreitung besteht aus zwei Schraubenlinien auf dem Zylinder, welche seine Mantellinien unter 45° schneiden.

III. Der geometrische Ort aller Punkte in R , die von einem Zentrum O einen festen (reellen) Abstand besitzen, hat nicht die Gestalt einer Kugel, sondern eines einschaligen Hyperboloids mit vertikaler Achse; das ist die oben erwähnte *de Sittersche* Lösung. Der Kegel der Lichtausbreitung besteht aus den beiden durch den Ursprungsort hindurchgehenden geradlinigen Erzeugenden des Hyperboloids, die Sterne sind unendlich dünn verteilt. Die Ebenen, welche durch eine feste Mantellinie l des Asymptotenkegels hindurchgehen — er hat seine Spitze in O und einen Öffnungswinkel von 90° —, schneiden auf dem Hyperboloid zwei Scharen von geodätischen Linien aus; die Hyperbeln der einen Schar laufen nach unten (Vergangenheit) zusammen, indem sie l zur gemeinsamen Asymptote besitzen, und breiten sich nach oben fächerförmig über

das ganze Hyperboloid aus; die zweite Schar entsteht aus der ersten durch Vertauschung von oben und unten. Die Weltlinien der ersten Schar werden im ungestörten Normalzustand beschrieben von den Sternen eines von Ewigkeit her in Kausalzusammenhang stehenden Sternsystems.

Petrus. Wenn es mit Hilfe des kosmologischen Gliedes nicht gelingt, das Machsche Prinzip durchzuführen, so halte ich es überhaupt für zwecklos und bin für die Rückkehr zur elementaren Kosmologie.

Paulus. Das scheint mir doch voreilig. Die Ebene I besitzt einen einzigen zusammenhängenden unendlich fernen Saum; da läßt sich Raum und Zeit, ewige Vergangenheit und ewige Zukunft gar nicht voneinander trennen. Infolgedessen läßt sich auch keine vernünftige Vorschritt geben, welche es verhindert, daß die Welt-



Weltlinien eines zusammenhängenden Sternsystems nach der kosmologischen Annahme III.

linie eines Körpers sich genau oder nahezu schließt; das würde aber zu den grausigsten Möglichkeiten von Doppelgängertum und Selbstbegegnungen führen. Hingegen trägt der Zylinder II so gut wie das Hyperboloid III zwei getrennte Säume, den unteren der ewigen Vergangenheit und den oberen der ewigen Zukunft; das ist der eigentliche Inhalt der Aussage, daß die Welt räumlich geschlossen ist: sie erstreckt sich „von Ewigkeit zu Ewigkeit“. Und um dieses doppelten Weltsaumes willen möchte ich an dem kosmologischen Glied festhalten. Auf dem Einsteinschen Zylinder überschlägt sich der Kegel der Lichtausbreitung unendlich oft. Von einem und demselben Stern muß ein Beobachter demnach unendlich viele Bilder erblicken; zwischen den Zuständen des Sternes, von denen zwei aufeinanderfolgende Bilder Kunde geben, ist ein Äon verfloßen, die Zeit, welche das Licht gebraucht, um einmal rund um die Weltkugel zu laufen: die Wahrnehmung des jetzt Geschehenden ist durchsetzt von den Gespenstern des Längstvergangenen. Hingegen vereinigt *de Sitters* Hyperboloid beide Vorzüge miteinander: den doppelten Saum der Vergangenheit und Zukunft

einerseits, den sich nicht überschlagenden Lichtkegel andererseits. Hier werden die kleinen Sternengeschwindigkeiten nicht wie in der Einsteinschen Kosmologie auf einen im Laufe von Äonen allmählich eingetretenen „thermodynamischen“ Ausgleich, sondern auf einen gemeinsamen Ursprung zurückgeführt. Die astronomischen Tatsachen sprechen mit aller Entschiedenheit für diese Ansicht.

Nach der Hypothese III scheinen alle Sterne eines Systems von einem beliebig herausgegriffenen Zentralstern aus in radialer Richtung zu fliehen; ihre Spektrallinien sind für einen Beobachter auf dem Zentralstern nach dem roten Ende verschoben, und zwar um so stärker, je entfernter sie sind. Nun zeigen die Spiralnebel, welche wahrscheinlich die entferntesten Himmelsgebilde sind, mit ganz wenigen Ausnahmen eine starke Rotverschiebung ihrer Spektrallinien⁵⁾. Sollte wirklich die universelle Fliehetendenz der Materie davon die Ursache sein, welche formelmäßig im kosmologischen Glied der Gravitationsgleichungen zum Ausdruck kommt, so erhält man aus hypothetischen Parallaxebestimmungen von Spiralnebeln einen Weltradius von der Größenordnung 10^{27} cm.

Petrus. Die Lichtgespenster der Sterne im Kosmos II werden wohl zu diffus sein, um wahrgenommen werden zu können.

Paulus. Dann müßte aber die diffuse, den Weltraum erfüllende Strahlung so stark sein, daß die Sterne im Durchschnitt ebenso viel Licht absorbieren wie emittieren. Für die Strahlung sollte so gut statistisches Gleichgewicht bestehen wie für die Sternbewegung.

Petrus. Nach allem, was du gesagt hast, glaubst du an eine selbständige Macht des Führungsfeldes, unabhängig von der Materie. Fern von aller Materie oder wenn alle Materie vernichtet ist — das ist doch deine Meinung? — herrscht jener homogene Zustand Z, der durch das Hyperboloid III (oder im Grenzfall durch die Ebene I) wiedergegeben wird. Mit der Erfahrung steht das wohl im Einklang, aber es scheint mir dem Prinzip der Kontinuität zu widersprechen. Denn wenn auch Z in sich qualitativ vollständig bestimmt ist, so gibt es doch unendlich viele Möglichkeiten, wie sich dieser Zustand im Weltkontinuum realisieren kann; analog etwa wie alle Geraden in der gewöhnlichen Geometrie qualitativ einander gleich sind, es aber doch unendlich viele Möglichkeiten ihrer Lage im Raum gibt. Welche dieser Möglichkeiten soll nun wirklich werden, wenn ich die vorhandene Materie stetig zu Null abnehmen lasse? Ich meine, bei verschwindender Materie muß das Führungsfeld *unbestimmt* werden.

Paulus. Begehst du da nicht den gleichen Fehler, den *Einstein* 1914 machte⁶⁾, als er aus dem Kausalitätsprinzip auf die Unmöglichkeit der allgemeinen Relativitätstheorie schloß? Denn, so sagte er, wenn die Naturgesetze invariant sind

gegenüber beliebigen Koordinatentransformationen, so erhalte ich aus einer Lösung durch Transformation unendlich viele neue. Teile ich die Welt durch einen dreidimensionalen Querschnitt, welcher ihre beiden Säume voneinander trennt, in zwei Teile und verwende nur solche Transformationen, welche die „untere“ Hälfte unberührt lassen, so stimmen alle diese Lösungen gleichwohl in der unteren Welthälfte mit der ursprünglichen überein. Er übersah, daß alle diese Lösungen auch in der oberen Welthälfte objektiv den gleichen Zustandsverlauf wiedergeben, daß ein Unterschied nur bestünde, wenn die vierdimensionale Welt ein *stehendes Medium* wäre, in das sich die Spuren der materiellen Vorgänge so oder so einzeichnen. Und nur dann kann man auch die Möglichkeiten der Realisierung, von denen du sprichst, als verschieden anerkennen. Ein solches stehendes Medium wird aber, ohne Zweifel mit deinem Beifall, von der Relativitätstheorie durchaus gelehnet.

Erachtest du es für notwendig, daß fern von aller Materie das Führungsfeld unbestimmt wird, so müßtest du konsequenterweise das gleiche Postulat für das elektromagnetische Feld aufstellen. Jedermann nimmt aber an, daß mit verschwindender Materie die elektromagnetische Feldstärke = 0 wird; und das bedeutet doch nicht, daß überhaupt „kein Feld da ist“, sondern daß dieses sich in einem bestimmten „Ruh-Zustand“ befindet, der sich stetig in alle übrigen möglichen Zustände einpaßt. Darf ich das Wort „Äther“ in den Mund nehmen? Ich verstehe darunter nicht ein substantielles Medium, dessen hypothetische Bewegungen ich ergründen möchte, sondern als Zustand des Äthers gilt mir das herrschende metrische und elektromagnetische Feld. In der Weylschen Theorie, ebenso in der kürzlich von *Eddington* und *Einstein* entworfenen „affinen“ Feldtheorie erscheint auch das elektrische mit in das metrische Feld aufgenommen. Der einzig mögliche *homogene* Zustand desselben ist das Hyperboloid III, auf welchem die elektromagnetische Feldstärke überall verschwindet. Aus diesem Ruhzustand heraus — Ruhe heißt hier soviel wie Homogenität — wird der Äther durch die Materie erregt; sie stehen nicht in dem einseitigen Kausalverhältnis vom Erzeuger und Erzeugtem, sondern in Wechselwirkung miteinander. Deinen Einwand aus dem Kontinuitätsprinzip kann ich anschaulich vielleicht am besten durch eine Analogie entkräften, indem ich den Äther einer Seefläche, die Materie den Schiffen vergleiche, welche sie durchfurchen. Die verschiedenen Möglichkeiten, von denen du sprichst, bestehen hier darin, daß man dieselbe Gestalt der Seefläche, denselben qualitativen Zustand materiell auf unendlich viele verschiedene Weise realisieren kann; der „materielle Zustand“ gilt nämlich erst als bestimmt, wenn von jedem Wasserteilchen feststeht, an welcher Stelle des Seebeckens es sich befindet. Der Festlegung

eines Koordinatensystems im Äther, der Beziehung auf ein stehendes Medium entspricht hier die willkürliche unterscheidende Kennzeichnung der einzelnen gleichartigen Wasserteilchen (z. B. durch Numerierung). Kommt das Wasser am Abend, wenn alle Schiffe im Hafen sind, wieder zur Ruhe, so ist der Zustand qualitativ genau der gleiche wie am Morgen vor dem Ausfahren der Schiffe: die Seefläche ist eine glatte „homogene“ Ebene. Aber der materielle Zustand, der sich dahinter verbirgt, kann sich vollständig verschoben haben. Es ist nicht angängig (wie es beim Führungsfeld vor *Einstein* geschah), die tatsächliche Lage aller Wasserteilchen in dem durch die Schiffe erregten Seebecken aus einer ein für allemal fixierten Ruhelage und einer durch die Schiffe bewirkten Elongation zusammenzusetzen. Dieser Vergleich macht es recht gut deutlich, wo ich die Grenze erblicke zwischen der als gültig zu akzeptierenden neuen Auffassung, die uns die allgemeine Relativitätstheorie gebracht hat, und ihrer übers Ziel hinaus-schießenden spekulativen Ausdeutung. Dahin-fällt, wie ich nicht leugnen kann, die von ihr versprochene radikale Lösung des Bewegungsproblems, um die sich hauptsächlich der Kampf in der populären Diskussion drehte. Aber freuen wir uns, aus dem Rausche der Revolution erwacht, des ruhigeren Lichtes, das sie jetzt über die Dinge verbreitet und das dem zarteren Verständnis feinere, aber nicht minder bedeutungsvolle Züge der Weltstruktur erhellt!

Die Tatsache, daß Trägheits- und Sternenkompas fast genau zusammengehen, bezeugt *die gewaltige Übermacht des Äthers* in der Wechselwirkung zwischen Äther und Materie. Denke ich daran, wie auf dem de Sitterschen Hyperboloid die Weltlinien eines Sternsystems mit einer gemeinsamen Asymptote aus der unendlichen Vergangenheit heraufsteigen, so möchte ich sagen: die Welt ist geboren aus der ewigen Ruhe des „Vaters Äther“; aber aufgestört durch den „Geist der Unruh“ (*Hölderlin*), der im Agens der Materie, „in der Brust der Erd' und der Menschen“ zu Hause ist, wird sie niemals wieder zur Ruhe kommen.

Petrus. Abtrünnig werde ich dich fortan nicht mehr schelten. Denn immer deutlicher spüre ich, daß du den physikalischen Gehalt der Relativitätstheorie nicht preisgegeben hast und dein Denken über den Kosmos nach wie vor in ihrem Geiste geschieht. Deine Gründe will ich sorgfältig erwägen; aber ob ich mich nun deiner Meinung anschließe oder nicht — voll Freude weiß ich mich von neuem einerlei Sinnes mit dir im Herzen.

Literatur.

1. Sitzungsber. d. Preuß. Akad. d. Wissensch. 1917, S. 142.
2. Physikal. Zeitschrift 19 (1918), S. 33; 29 (1921), S. 29.
3. Diese wurden namentlich von *Seeliger* diskutiert. *Astronomische Nachrichten* 137, Nr. 3273 (1895); *Münchener Berichte* 26 (1896). Einen Ausweg in

- ganz anderer Richtung suchten schon *Lambert* und nach ihm *Fournier d'Albe* (*Two new Worlds*, London 1907) und *C. V. L. Charlier* (*Arkiv för Matem., Astr. och Fysik* 4 (1908), Nr. 24). Vgl. *Naturwissenschaften* 10 (1922), S. 481.
4. *Monthly Notices of the R. Astronom. Soc. London*, Nov. 1917. Dazu: *Weyl*, *Raum, Zeit, Materie*, 5. Aufl. (Berlin 1923), S. 322, und *Physikal. Zeitschrift* 24 (1923), S. 230.
 5. *Eddington*, *Math. Theory of Relativity* (Cambridge

- 1923), S. 162. — Die Leser dieser Zeitschrift wissen freilich aus den fortlaufenden „Astronomischen Mitteilungen“, wie wenig abgeklärt noch immer die Stellung der Spiralnebel ist. Über eine andere von *Lindemann* aufgestellte Hypothese zur Erklärung der Rotverschiebung in den Spektren der Spiralnebel vgl. *Naturwissenschaften* 17 (1923), S. 961.
6. *Sitzungsber. d. Preuß. Akad. d. Wissensch.* 1914, S. 1067.

Chinesische Krabben in der Unterelbe.

Von *W. Schnakenbeck*, Hamburg.

Einigen auf der Unterelbe auf der Höhe von Brunsbüttel mit der Kurre auf Butt fischenden Finkenwärdern waren Anfang November 1923 einige Krabben (*Brachyuren*) infolge ihres besonderen Aussehens aufgefallen, die sie deshalb mitnahmen. Durch Vermittlung der Staatlichen Fischereidirektion Hamburg gelangte eins der gefangenen Exemplare in den Besitz der Fischereibiologischen Abteilung des Zoologischen

und nicht bestimmt war. Sie wurde in einem kleinen Glasaquarium mit brackigem Wasser gehalten, wo sie sich gut hielt und dreimal häutete (Anfang Juli 1922, 14. Oktober 1922 und 9. Oktober 1923). Sie zeigte die Neigung, sich vollständig im Sande zu vergraben. Die Untersuchung ergab, daß es sich um dieselbe Form handelte, wie die bei Brunsbüttel gefangenen Exemplare. Die erste Haut zeigte einen größten Durch-



Eriocheir sinensis Milne-Edwards ♀. Etwa $\frac{1}{2}$ der natürlichen Größe.

Staatsinstituts in Hamburg. Die Bestimmung ergab, daß es sich um einen Vertreter einer aus den chinesischen Gewässern bekannten Krabbenform, *Eriocheir sinensis* *Milne-Edwards*, handelte. Das eingelierte Exemplar war ein Weibchen, und nach Aussage der Fischer wurden diese Krabben häufiger in jener Gegend beim Buttfang in 7—8 Faden Tiefe gefangen. Am 1. Dezember wurden in der Tat weitere zwei Exemplare, ein Männchen und ein Weibchen, erbeutet und eingeliefert, und am 11. Dezember nochmals zwei Stück (♂ und ♀). Außer den eingelieferten Exemplaren sind noch 6 Stück einwandfrei als gefangen festgestellt, aber nicht in unseren Besitz gelangt. Drei davon hatten vor ihrer Einlieferung die Beine abgeworfen, waren dann leider als wertlos angesehen und deshalb fortgeworfen worden; eins war nach dem Fang auf Deck gelegt und dann nicht wiedergefunden, und die letzten beiden schließlich waren in die Bünn¹⁾ getan, aus der man sie natürlich nicht wieder herausbekam.

Es stellte sich dann nachträglich heraus, daß bereits im Juli 1922 eine Krabbe in der Elbe gefunden wurde, die aber bisher unbeachtet geblieben

¹⁾ Die Bünn ist ein mit dem Meerwasser in Verbindung stehender Raum von Fischereifahrzeugen, in dem die gefangenen Fische lebend an den Markt gebracht werden.

messer des Cephalothorax von $3\frac{1}{2}$ cm, die zweite von 4 cm und die dritte von $4\frac{1}{2}$ cm. Die Polster an den Scheren, es handelt sich hier um ein Männchen, sind bei der Größe von $3\frac{1}{2}$ cm noch ganz klein, z. B. fehlt hier das Polster auf der Unterseite noch vollkommen, während an den jetzigen Scheren schon sehr stattliche Polster sitzen.

Die Gattung *Eriocheir* gehört zu der Familie der Grapsiden und der Unterfamilie der Grapsinen. Eine genaue Beschreibung und Abbildung findet sich bei *Milne-Edwards*²⁾. Besonders charakteristisch sind die großen, spitzen Dornen am vorderen Rand des Panzers.

Der ganze Rand des Cephalothorax, einschließlich der Dornen, ist gekörnelt. Die Körnelung ist übrigens eine bei dieser Art sehr stark ausgeprägte Eigenschaft, die sich auch an anderen Körperteilen findet. Nahe dem Vorderrand des Cephalothorax, zwischen den Augen, liegen zwei granulierten Höcker, zwei ebensolche etwas weiter nach hinten und weiter auseinander stehend. Große, spitze Dornen sitzen am distalen inneren Ende des 5. und 4. Gliedes der Scherenfüße und des 4. Gliedes der Gangbeine.

Ein weiteres charakteristisches und besonders auffallendes Merkmal ist die starke Behaarung der Hand.

²⁾ *Milne-Edwards*: Notes sur quelques Crustacés nouveaux ou peu connus. *Arch. d. Mus. Hist. Nat. Paris*, T. VII, 1854, S. 146.