

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 29 (1956)
Heft: [4]: Supplementum 4. Fünfzig Jahre Relativitätstheorie =
Cinquantenaire de la Théorie de la Relativité = Jubilee of Relativity
Theory

Nachwort: Schlusswort durch den Präsidenten der Konferenz
Autor: Pauli, W.

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Schlußwort durch den Präsidenten der Konferenz

Prof. Dr. W. PAULI

Geehrte Anwesende,

ich werde dieses Schlußwort auf Deutsch halten, weil dadurch vielleicht eine gewisse Symmetrie in den Sprachen hergestellt wird und auch, weil ich in dieser Sprache leichter improvisieren kann und meine Worte weniger offiziell klingen.

Bevor ich auf den Inhalt eingehe, möchte ich bei dieser Gelegenheit allen denen danken, die bei der Organisation dieses Kongresses so viel Mühe und Arbeit getan haben. Insbesondere danke ich dem Sekretär der Konferenz, Prof. MERCIER, ohne dessen mühsame und ausdauernde Arbeit dieser Kongress gar nicht möglich gewesen wäre.

Ich kann ja nicht alle Referate wiederholen, und so muß ich mich wohl darauf beschränken, einige vielleicht willkürlich ausgewählte Bemerkungen zu machen über verschiedene Seiten der Probleme, die wir hier diskutiert haben und über die wir teils Hauptreferate, teils kleinere Mitteilungen gehört haben. Falls ich etwas Unkorrektes sage, haben Sie leider nur mehr Gelegenheit, mich im privaten Gespräch zu korrigieren.

Ich möchte einiges sagen über meine Eindrücke aus den Referaten und Diskussionen dieses Kongresses über die experimentelle Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie, die Kosmologie, die mathematischen Methoden der allgemeinen Relativitätstheorie, die Erweiterungen der Theorie und über die Quantisierung der Feldgleichungen. Vielleicht kann ich auch die Gelegenheit benützen, um einiges zu sagen, was ich in der Diskussion aus Zeitgründen nicht mehr sagen konnte.

Ich habe nicht sehr viel hinzuzufügen zur Frage der *experimentellen Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie*: Sie haben das Hauptreferat von Herrn TRÜMLER gehört und auch das Minoritätsvotum von Herrn FREUNDLICH. Nun mögen Sie sich selbst ein Urteil bilden über diese Diskrepanz, da ich ja nicht Experte bin in technischer Astronomie. Ich darf vielleicht nur, ohne Stellung zu nehmen, darauf hinweisen, daß die Klassen-Einteilung je nach dem Eindruck, welchen diese Referate gemacht haben, nicht einfach zusammenfiel mit der Klassen-

Einteilung nach Wärme oder Kühle der Einstellung zur Relativitätstheorie. Es waren daran auch viele beteiligt, denen nicht die ganze Theorie so primär am Herzen liegt, sondern die experimentellen Methoden. Mehr kann ich nicht sagen über die Rotverschiebung und die Lichtablenkung.

Etwas mehr kann ich wohl sagen über die *Kosmologie*. Wir haben das experimentelle Referat BAADÉ und das theoretische Referat ROBERTSON gehört, und es hat sich das neue Resultat ergeben, daß keine Diskrepanz zwischen den experimentellen Resultaten und dem alten FRIEDMANN-LEMAÎTRESchen kosmologischen Modell besteht. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, daß man keine Spuren in unserem Universum finden kann, die auf eine frühere Zeit als auf $5 \cdot 10^9$ Jahre hinweisen oder zurückgehen. Was vorher war, das wissen wir nicht, und das, was man sieht, ist manchmal jünger aber niemals älter als diese $5 \cdot 10^9$ Jahre. Die Relativitätstheorie und die FRIEDMANNSche Lösung verknüpfen dieses Weltalter mit der mittleren Dichte der Materie in der Welt. Ich glaube, wir sollen uns EINSTEINS Meinung anschließen, wonach das kosmologische Glied gleich Null zu setzen ist. Von ROBERTSON haben wir gehört, daß dann auch eine genügende Übereinstimmung zwischen der empirischen Stern-dichte und dem Alter $5 \cdot 10^9$ mit den theoretischen Relationen besteht. Das war früher anders, und es scheint mir, daß damit ein auch in der neuen Auflage von JORDANS Buch „Schwerkraft und Weltall“ zu findendes Argument gegen diese einfache Theorie, das immer schon schwach war, nun praktisch auf Null zusammengeschmolzen ist; und das ist in vieler Hinsicht erfreulich. Ich komme auf diese Frage später noch zurück bei den Erweiterungen der Theorie. In Verbindung mit der Kosmologie gibt es noch fundamentalere Fragen, auf die ich hier nur kurz hinweisen kann. Es scheint mir wesentlich, daß die Erhaltungssätze von Materie, also von Energie-Impuls und von Ladung einer mathematisch formulierten Feldtheorie tief in den Knochen sitzen. Wenn man daran etwas ändern will, muß man wohl schon eine fundamentale Idee haben. Ich bestreite nicht, daß in der Natur es vielleicht doch auch so sein könnte, daß diese Erhaltungssätze irgendwie nicht gelten würden im Sinne einer *creatio continua*, wie ich es lateinisch sagen will (die *creatio continua* ist nämlich eine alte Vorstellung aus dem Mittelalter), und es liegt auch eine gewisse Schönheit darin, einen stationären Zustand anzunehmen. Ich glaube aber, das ist ein Problem, das wir der Zukunft zur Entscheidung überlassen müssen, wie so vieles, was hier besprochen wurde. Ob nun im Sinne der jetzigen Theorie mit ihren Erhaltungssätzen oder im Sinne eines stationären Zustandes mit ihrer *creatio continua* der Kosmos zu deuten ist, so scheint es mir aber auf jeden Fall mehr im Sinne der theoretischen Physik mit ihrer Anlehnung an bestimmte mathematische Gleichungen, wenn

wir einen Grundstein wie die Erhaltungssätze nicht eher verlassen, als bis eine ganz bestimmte experimentelle Evidenz uns dazu zwingt. Gegen die logische Möglichkeit will ich gar nichts sagen. Aber es scheint mir eigentlich besser, nicht ad libitum Grundlagen wegzuwerfen, solange man nicht empirisch dazu gezwungen ist; und wenn ich richtig verstanden habe, ist man bis jetzt empirisch nicht dazu gezwungen, Erhaltungssätze aufzugeben. Das, was früher als $5 \cdot 10^9$ Jahre war, bleibt dabei natürlich im Dunkel. EINSTEIN hat darüber nur gesagt, die Materie war früher in einem solchen Zustand, den wir vorläufig nicht weiter berechnen können.

Ich glaube, das Wichtigste, das wir sonst gehört haben, war das Referat von LICHNEROWICZ über das *Cauchysche Anfangswertproblem* in den nicht-linearen Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie. Ich lege sehr großen Wert auf das Studium dieser Probleme, weil ich bestimmt meine, daß es auch bei der Feldquantisierung, auf die ich zu sprechen komme, eine wesentliche Rolle spielen wird. Ich zweifle auch nicht daran, daß Herr LICHNEROWICZ unabhängig von JORDAN viele mathematische Sätze, über die uns Herr JORDAN vorgetragen hat, auch schon gefunden hat, wie er sagt.

Ich will nun noch auf einige speziellere Fragen eingehen, welche mehr in den kleineren Mitteilungen diskutiert worden sind und die eigentlich die Anwendung der allgemeinen Relativitätstheorie betreffen.

Da ist die von EINSTEIN betonte Tatsache, daß die *Existenz von Maßstäben und Uhren* nicht aus den Feldgleichungen der Relativitätstheorie allein folgt, worauf auch verschiedentlich von Herrn INFELD hingewiesen worden ist. Wenn EINSTEIN sagt, daß die Existenz von Maßstäben und Uhren nicht aus der Relativitätstheorie folgt, so bezieht sich das darauf, daß die Existenz von Materie nicht aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt, sondern als besondere Annahme hinzugenommen wird. Das hat EINSTEIN sehr beschäftigt, er hat das immer wieder gesagt, deswegen wiederhole ich es. Wenn man aber die Existenz der Materie zugibt, dann halte ich es für unwesentlich, ob das in Form von Punktsingularitäten oder in der Form von ausgedehnter Materie geschieht. In beiden Fällen kann man ja, wie Sie gehört haben, die Bewegungsgleichungen aus den Feldgleichungen ableiten, vermöge der vier Identitäten, die aus der Gruppe der allgemeinen Relativitätstheorie folgen. Ich glaube, wenn man einmal die Existenz der Materie in der mathematischen Darstellung der Theorie ausgedrückt hat, ist es nicht sehr schwierig, *Modelle für Uhren* zu konstruieren. Alle stimmen darin überein, daß natürlich nicht jedes System als Uhr bezeichnet werden kann, sondern nur solche, welche die Eigenzeit ds^2 messen; aber ich glaube, wenn jemand sich nun die Aufgabe stellt, ein Modell für eine solche Uhr zu konstruieren, so kann er das schon, wenn ihm die Existenz der Materie zugestanden wird; wenn man nicht so

ehrgeizig ist, die Atomuhren modellmäßig behandeln zu wollen, so kann man überdies auch klassische Modelle für Uhren machen. Wenn man einen Körper hat, sagen wir einen Planeten, der von einem Mond umkreist wird, dann wird unter bestimmten zu präzisierenden Voraussetzungen mit vielen Kautelen, ein solches System mit einer gewissen Annäherung als Uhr zu betrachten sein. Wenn wir dieses System „adiabatisch“, d. h. nicht zu plötzlich in ein starkes äußeres Gravitationsfeld bringen, dann muß schon die Periode in der gewöhnlichen Zeit sich entsprechend der Rotverschiebung verhalten; wenn man das mathematisch diskutieren will, muß man natürlich die Vorsichtsmaßregel anbringen, daß die Inhomogenität des Gravitationsfeldes für Mond und Zentralkörper nicht zu groß wird, sonst bleibt die Periode nicht konstant. Entsprechendes gilt für die zeitliche Inhomogenität des äußeren Gravitationsfeldes: im Laufe einer Umlaufperiode muß die Änderung des äußeren Gravitationsfeldes relativ klein bleiben. Aber, wenn man die nötigen Kautelen anbringt und die Voraussetzungen mathematisch präzisiert, so könnte man es m. E. durchaus rechtfertigen, ein solches System als Uhr zu betrachten.

Wenn man andererseits, entsprechend der Mode unserer Zeit, eine Atomuhr modellmäßig behandeln will, dann ist es natürlich kein Bewegungsproblem, sondern ein Problem der Wellenmechanik, und man müßte das dementsprechend nicht mehr klassisch machen, sondern wellenmechanisch. Ich vermute, daß die Kautelen in der Wellenmechanik ganz ähnlich sein werden wie in der klassischen Mechanik. Zum Beispiel gibt in der Wellenmechanik die Inhomogenität des Gravitationsfeldes zu einem Effekt Anlaß, der dem STARK-Effekt ähnlich ist und Entsprechendes gilt auch bei der zeitlichen Veränderung des äußeren Feldes. Ich vermute, daß beide Diskussionen, die klassische und die wellenmechanische, eine gewisse Ähnlichkeit haben werden. Doch wollte ich besonders betonen, daß hier die Größe des Wirkungsquantums nicht prinzipiell und direkt eingeht, so, daß es auch klassische Modelle für Uhren gibt. So viel ich weiß, ist das auch die Meinung von Herrn MØLLER.

Von dem Uhrenmodell ist das tiefer liegende Problem zu unterscheiden: wie die Materie überhaupt in die Theorie eingebaut wird.

Zu den mathematischen Fragen gehört auch die, wie weit die *Auszeichnung spezieller Bezugssysteme* nützlich ist. Ich finde die Theoreme von Prof. FOCK sehr interessant, daß man unter gewissen Bedingungen die bekannte spezielle Differentialbedingung benutzen kann, um Koordinatensysteme auszuzeichnen, wobei es übrigens offen bleibt, ob das nicht nur im Kleinen, sondern auch im Großen möglich ist. Ich bezweifle allerdings, ob es denn praktisch und prinzipiell vernünftig ist zu sagen, die Auszeichnung dieses besonderen Bezugssystems habe eine prinzipielle oder philosophische Bedeutung. Wir haben ja Analoges auch bei der Eich-

gruppe erlebt in der klassischen und in der Quantenelektrodynamik; da ist manchmal diese und manchmal jene Spezialisierung der Eichung zweckmäßig. Daß bei dieser Frage eine tiefe Analogie zur Situation in der speziellen Relativitätstheorie vorhanden ist, das kann ich nicht recht sehen.

Nun kommen wir zu den *Erweiterungen der Theorie*. Da ist die Erweiterung mit den fünfdimensionalen Methoden und die Erweiterung mit den nichtsymmetrischen Größen. Herr Prof. FOCK hat mir gesagt, er glaube nicht, daß diese Erweiterungen irgendeinen physikalischen Sinn haben, und auch ich habe sehr starke Zweifel an der physikalischen Richtigkeit dieser Erweiterungen, wenn man nicht gleichzeitig in einer tieferen Weise die Quantentheorie hineinbringt. Es könnten also wohl diejenigen, welche diese Erweiterungen physikalisch nicht ganz ernst nehmen, eine große Chance haben, recht zu behalten. Nun hat uns leider Herr JORDAN mit dem Zauber seiner mathematischen Sätze verhindert, etwas darüber zu hören, was eigentlich seine physikalischen Gründe sind, um eine Veränderung der Gravitationskonstante anzunehmen; das hätte uns ja sicher alle sehr interessiert, und da wäre er auch sicher gewesen, keine Konkurrenz von Seiten unseres ausgezeichneten Referenten LICHNEROWICZ zu haben. Nun, er hat ja darüber wohl einiges geschrieben, aber es scheinen mir, nach dem was wir von ROBERTSON gehört haben, in den empirischen Resultaten über die Expansion des Universums nicht mehr viele Gründe für eine Veränderlichkeit der Gravitationskonstante übrig geblieben zu sein. Ich will nicht behaupten, daß es unmöglich ist, eine Veränderung der Gravitationskonstante anzunehmen; man kann vielleicht gewisse Phänomene auf der Erde dann etwas leichter deuten, aber es ist eben so, daß ich nicht so ganz sehe, daß diese Theorie genügende Fundierung hat. Ich habe wie andere meine starken Zweifel, ob man hier physikalisch auf einer richtigen Spur ist.

Wir haben dann gesehen, wie EINSTEIN und Frau KAUFMAN einen heroischen Kampf gekämpft haben gegen den Fluch, der aus der Vereinigung des „von Gott Getrennten“ entsprungen ist, und wie dieser Kampf mit der besonderen Waffe einer λ -Transformation geführt worden ist. Das ist sicher in formaler Hinsicht alles vollkommen richtig; aber ich habe weder einen physikalischen noch einen geometrischen Sinn dieser λ -Transformation sehen können. Herr WEYL hat auch darauf hingewiesen, daß der Buchstabe λ in der allgemeinen Relativitätstheorie bereits durch ein unglückliches Schicksal präjudiziert ist, das sich leicht wiederholen könnte.

Es liegt aber auch hier eine tiefere kontroverse Frage zugrunde, nämlich die, ob man den *klassischen Feldbegriff* als befriedigend oder als unbefriedigend empfindet. Ich habe sehr viel mit EINSTEIN darüber gespro-

chen, und ich bin mehr geneigt, ähnlich wie Herr BORN es gesagt hat, diesen Feldbegriff nicht nur heuristisch, sondern auch in einer tieferen Weise als unbefriedigend zu betrachten. Es ist hierbei einiges zu Tage getreten, das mich schon in meiner Jugend gestört hat, als ich den Enzyklopädie-Artikel über Relativitätstheorie schrieb und das seitdem, wie Herr BORN schon gesagt hat, eigentlich nicht eine genügende Aufklärung gefunden hat. Ich glaube, die Weise, wie man Felder mißt, muß als eine prinzipielle Frage berücksichtigt werden; es handelt sich nicht um die technischen Einzelheiten; es handelt sich auch gar nicht darum, daß jede Größe, die mathematisch in einer Theorie vorkommt, nun auch direkt meßbar sein sollte. Es handelt sich mehr darum, daß man, wenn man an die Messung des Feldes geht, einen Probekörper braucht, und es verursacht mir großes Unbehagen, wenn im gleichen Atemzug der Probekörper wiederum als Feld betrachtet wird. Es handelt sich hier also nicht um eine empirische Meßphilosophie, sondern mehr darum, daß man nicht das, womit man das Feld mißt und das gemessene Feld zugleich beschreiben kann; daß die Betrachtungsweisen eines Körpers einerseits als ein ausgemessenes Feld, andererseits als ein Mittel zur Ausmessung eines anderen Feldes, einander im Sinne eines komplementären Entweder-Oder ausschließen müssen. BOHR hat an einem Solvay-Kongress schon ähnliche Ideen vorgebracht. Daß es zum Beispiel logisch möglich ist, die Maxwell'schen Gleichungen im Vakuum hinzuschreiben ohne eine Ladung einzuführen, das stört mich; denn wenn es keine Ladung gäbe, so würde man ja dieses Feld nicht messen können. Dennoch kann man das Feld ohne Ladung mathematisch hinschreiben und es scheint mir, daß in diesem Sinne der klassische Feldbegriff immer irgendwie reine Mathematik bleiben muß. Hierzu hatte ich stets eine andere Einstellung als EINSTEIN. Deshalb war ich sehr befriedigt, als die Quantenmechanik entstand; denn ich hoffte noch immer, daß dieses Gegensatzpaar Probekörper und Feld sich vielleicht doch einmal analog fassen lassen wird, wie das andere Gegensatzpaar Impuls und Ort. Aus diesem Grund hatte ich, ähnlich wie Herr BORN, von vorneherein nicht die Idee, daß es wirklich gehen könne mit dem klassischen Feldbegriff als alleiniger Grundlage der Physik. Leider kann ich es nicht deutlicher sagen, sonst hätte ich eine richtige Theorie. Aber wenn ich es Ihnen nun gefühlsmäßig noch näher bringen will, so möchte ich GOETHE mißbrauchend sagen: da muß etwas sein, „was sich dem Feld entgegenstellt, der Körper, diese plumpe Welt.“

Das führt nun hier an die Grenze unseres Wissens, an die Fragen der Quantisierung des Feldes; es scheint, daß eine gewisse Übereinstimmung darüber bestand, daß eine bloße Anwendung konventioneller Quantisierungsmethoden wahrscheinlich nicht zum Ziele führen wird, und ich bin persönlich sehr beeindruckt davon, daß Herr BERGMANN, der diese kon-

ventionellen Methoden so glänzend beherrscht, bis jetzt nicht zum Ziele gekommen ist. Ich habe früher die Schwierigkeiten der Nichtlinearität gar nicht sehr ernst genommen und ich möchte daran erinnern, daß in der alten Arbeit über Feldquantisierung von HEISENBERG und mir die Linearität der Lagrange-Funktion nicht vorausgesetzt wurde. Ich bin nicht so sicher, daß in der Quantisierung des Gravitationsfeldes die mathematischen Schwierigkeiten bloß wegen der Nichtlinearität so groß sind. Denn man muß bedenken, daß in der lorentz-invarianten gewöhnlichen Quantenelektrodynamik die Wechselwirkung zwischen Materie-Feld und elektromagnetischem Feld ebenfalls nicht linear ist; eine lineare Theorie ist eigentlich reine Mathematik: da ist keine Wechselwirkung und man kann nichts messen. Es scheint mir also, daß nicht so sehr die Linearität oder Nichtlinearität Kern der Sache ist, sondern eben der Umstand, daß hier eine allgemeinere Gruppe als die Lorentzgruppe vorhanden ist. Ich habe ja schon darüber gesprochen und möchte mich sehr kurz fassen; wir haben die ausgezeichneten Referate von BERGMANN und von KLEIN gehört, und ich hoffe, daß die Fortführung solcher Untersuchungen, die erst in den Anfängen liegen, von denen uns insbesondere Herr KLEIN berichtet hat, uns vielleicht doch auf irgendeinen grünen Zweig führen werden; denn bei der Quantisierung des Gravitationsfeldes entsteht durch die Unbestimmtheit des Lichtkegels eine neue Sachlage. Einerseits ist dies eine Schwierigkeit für die Anwendung konventioneller Methoden, andererseits aber hoffe ich, daß sie zur Überwindung der Divergenzschwierigkeiten der Feldquantisierung vielleicht doch beitragen könnte.

Ich glaube, das ist alles, was ich in der kurzen Zeit improvisieren konnte. Ich bitte um Nachsicht, daß ich, von dem was Sie gehört haben, vieles nicht genannt habe, was sicher sehr gut und schön gewesen ist und möchte daher zum Schluß noch besonders darauf hinweisen, daß dieses Schlußwort keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann.

Jubiläumsfeier
Fête du Jubilé
Meeting of the Jubilee

