

STÖRT DER KOSMOS DIE PHYSIK AUF DER ERDE?

Ulrich Bleyer
WIP-Projekt der Universität Potsdam
Dierck-Ekkehard Liebscher
Astrophysikalisches Institut Potsdam

1 Das Paradoxon

”Es widerstrebt dem wissenschaftlichen Verstande, ein Ding zu setzen, das zwar wirkt, aber auf das nicht gewirkt werden kann.” Mit diesen Worten kommentiert A.Einstein die Forderung von E.Mach, den Begriff des absoluten Raums aus der Physik zu entfernen und die Trägheit der Masse auf den Kosmos zu beziehen [15]. Diese Forderung, das Machsche Prinzip, ist die erste handgreifliche Formulierung der Ansicht, daß der Zustand des Kosmos – zumindest an dieser Stelle – für die konkrete Form der physikalischen Gesetze verantwortlich ist. Dies steht dem allgemeinen Vorgehen entgegen, nach dem der Astrophysiker sein Modell für das Universum entwirft: Er erklärt den Bau des Universums mit der irdischen Physik. Das ist auch zur Interpretation der kosmologisch relevanten Beobachtungen erforderlich. Zwingt uns also das Modell des Kosmos, das wir mit der lokal untersuchten Physik konstruieren, eine Interpretation der Beobachtungen auf, die nun ihrerseits gar nicht anders kann, als das Modell zu stützen, zumindest dessen Grundlagen? Mach’s Forderung sagt nein, zumindest was die Frage der Trägheit angeht. Mach selbst hat seine Forderung nicht mit einer konstruktiven Theorie untersetzt, weshalb sie in verschiedener Gestalt umgesetzt worden ist. Dennoch hat sie sich einer befriedigenden Antwort bisher immer entzogen. Es ist das letzte große Prinzip der klassischen Physik, das einer solchen Antwort noch bedarf [4],[22]. Obwohl das Machsche Prinzip besonders bei der Begründung der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie eine große Rolle gespielt hat, ist es immer noch nicht eindeutig formuliert und schon gar nicht eindeutig theoretisch realisiert. Der Grund liegt nicht zuletzt darin, daß es zunächst nur mit einem Paradoxon begründet ist, dessen Lösung gefordert werden muß, aber nicht auf einfache Weise erreicht werden kann.

Das Paradoxon ist einfach erklärt: Auch wenn am Himmel keine Sterne uns Orientierung gestatteten, sagt uns die Drehung der Schwingungsebene eines Foucaultschen Pendels, daß die Erde rotiert. Vergleichen wir diese dynamische Rotation mit dem astronomischen Tageslauf, der kinematisch bestimmten Rotation, stellen wir überrascht fest, daß beide Rotationsgeschwindigkeiten übereinstimmen. Newton postulierte einen ansonsten bescheiden unsichtbaren absoluten Raum, dessen einzige Aufgabe es ist, die rotationsfreien Bewegungen zu definieren. Die Oberfläche der Wasserfüllung eines rotierenden Eimers krümmt sich zum Paraboloid nicht bei Bewegung gegen den Eimer, sondern bei Bewegung gegen den absoluten Raum. Der Fixsternhimmel kann seinerseits gegen den absoluten Raum nicht rotieren, weil die zu unterstellenden Fliehkräfte ihn zerreißen würden. Ernst Mach dagegen sah, daß der absolute Raum physikalisch nicht vermessen werden kann und eine Fiktion ist. Die inertialen Bezugssysteme Newtons können nur an reellen Objekten oder der Gesamtbewegung eines Massensystems fixiert werden. Es gibt nur Bewegung von Massen gegeneinander, Relativbewegungen, und alle Physik muß auf diesen aufgebaut werden. Der fiktiv rotierende

Sternenhimmel spürt eben keine Fliehkraft, weil sich die relativen Positionen der Sterne bei einer starren Rotation nicht verändern. Machs Forderung war, die Physik so zu schreiben, daß allein die Relativbewegungen physikalische Wirkung haben. Fliehkräfte entstehen dann nicht durch Rotation gegen einen absoluten Raum, sondern durch Rotation gegen die Gesamtheit der kosmischen Massen.

2 Machsche Mechanik

Die einfachste Lösung wäre, den Ausdruck für die kinetische Energie als Summe über Distanzänderungen zu schreiben. Dann ist die kinetische Energie allerdings nicht mehr eine einfache Summe über alle Massen eines Systems,

$$E_{\text{kinetisch}} = \frac{1}{2} \sum_A m_A \left(\frac{d\mathbf{r}_A}{dt} \right)^2, \quad (1)$$

sondern eine Summe über alle Paare von Körpern, geradeso wie die potentielle Energie des Schwerefeldes auch. Eine einfaches, aber charakterisierendes Beispiel [20],[21],[6] ist die Mechanik mit der kinetischen Energie in der Form

$$E_{\text{kinetisch}} = \frac{1}{2} f \sum_{AB} \frac{m_A m_B}{r_{AB}} \left(\frac{dr_{AB}}{cdt} \right)^2. \quad (2)$$

(f ist die Gravitationskonstante, c eine Normierungsgeschwindigkeit, für die man die Lichtgeschwindigkeit nehmen kann, s.u.) Hier werden nur die Abstände zwischen den Massenpunkten und deren zeitliche Änderung anerkannt. Die einfachsten Eigenschaften einer solchen Mechanik sind

- Für ein einzelnes Teilchen in einem ansonsten leeren Kosmos gibt es kein Bewegungsgesetz, weil es keine Orientierungspunkte für irgendeine Bewegung gibt.
- Für zwei einzelne Teilchen in einem ansonsten leeren Kosmos gibt es nur eine Bewegungsgleichung für ihren Abstand, nicht etwa für eine Rotation umeinander: Es gibt keine Anhaltspunkte, an denen die Orientierung ihrer Verbindungslinie bestimmt werden könnte.
- Wie viele Teilchen das Massenpunktsystem auch hat, eine Rotation oder Bewegung als Ganzes ist nicht bestimmbar und geht in die Bewegungsgleichungen nicht ein: Der Kosmos rotiert nicht, nur Teile können gegen den Kosmos rotieren.
- Das Keplerproblem ist das Teilproblem der Bewegung eines Untersystems im Kosmos der übrigen Körper, deren es in der Realität überwältigend viele gibt.

Das die Bewegung bestimmende Wirkungsintegral

$$S = \int dt (E_{\text{kinetisch}} - E_{\text{potentiell}})$$

ist invariant, unveränderlich bei allen Änderungen von Position, Orientierung, Geschwindigkeit und Rotation des Gesamtsystems, weil davon die Abstände der Körper untereinander nicht berührt werden. Wir sagen, diese Mechanik ist invariant gegen die kinematische Gruppe des euklidischen Raums.

Die Newtonsche Mechanik dagegen gründet auf den Ausdruck (1) für die kinetische Energie. Dann ist das Wirkungsintegral

$$S = \int dt \left(\frac{1}{2} \sum_A m_A \left(\frac{d\mathbf{r}_A}{dt} \right)^2 + f \frac{1}{2} \sum_{AB} \frac{m_A m_B}{r_{AB}} \right).$$

nicht mehr invariant gegen die volle kinematische Gruppe des euklidischen Raums, sondern nur gegen die Galilei-Gruppe: nur Position, Orientierung und unbeschleunigte Translationsbewegung fallen aus der Bestimmung heraus, beschleunigte Translationsbewegung und starre Rotationsbewegung des Gesamtsystems sind dagegen bestimmt: Ihre Änderung erzeugt die Trägheitskräfte, die Newton – wie dargestellt – für den Existenzbeweis des absoluten Raums hielt.

Wie kommen nun in einer Machschen Mechanik die Trägheitskräfte zustande? Reduzieren wir das Problem auf ein kleines Teilsystem des Kosmos (etwa das Sonnensystem). Dann zerfällt die kinetische Energie, die zunächst eine Summe über alle Teilchenpaare AB ist, in drei Summanden. Der erste enthält die Paare, deren Teilchen beide zum umgebenden Kosmos gehören. Er verändert sich nicht bei Bewegung des Teilsystems und fällt aus dessen Bewegungsgleichung heraus. Der zweite Summand enthält die Paare, deren Teilchen beide zum Teilsystem gehören. Er liefert eine kleine, geschwindigkeitsabhängige Korrektur zur Newtonschen potentielle Energie, die schließlich die Periheldrehung des Merkur liefert, wenn wir die Normierungsgeschwindigkeit c von der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit gewählt haben. Der entscheidende dritte Summand enthält die Paare, bei denen ein Teilchen zum Kosmos, das andere zum untersuchten Teilsystem gehört. Es liefert bei einem isotropen Kosmos die gewöhnliche kinetische Energie, wobei die effektive träge Masse eine Funktion des Potentials des Kosmos wird:

$$m_{A \text{ träge}} = m_A \sum_{B \in \text{Kosmos}} \frac{f m_B}{c^2 r_{AB}} \quad (3)$$

Die Invarianz des Teilsystems ist nicht mehr die volle (teleskopische) Invarianz des Kosmos, sondern auf die Galilei-Invarianz gebrochen. Der Kosmos – das klassische Vakuum für das Teilsystem – hat eine Struktur, die die teleskopische Invarianz reduziert: Das Teilsystem erhält durch den Kosmos Position und Orientierung.

Mit diesem Beispiel ist nun das Machsche Prinzip mechanisch modelliert. Dieses Modell ist aber bei weitem zu einfach, um den Tatsachen voll zu entsprechen. Die ersten dieser Tatsachen sind:

- Die induzierte Masse (3) verringert sich mit der Expansion des Kosmos, was effektiv einer zunehmenden Gravitationskonstanten entspricht.

- Die induzierte Masse ist anisotrop, wenn der Kosmos nicht vollständig isotrop ist (die wichtigste Anisotropie kommt durch unsere Galaxis selbst zustande, deren Potential $\Phi = \frac{fM}{rc^2}$ die Größenordnung 10^{-6} hat).
- Die (spezielle) Relativitätstheorie ist nicht berücksichtigt: das Gravitationsfeld ist instantan, die Beschreibung der Lichtausbreitung offen.

3 Zeit ohne Zeit

J.Barbour fand nun, daß es keinen Sinn macht, die absolute Position und Orientierung im Raum aufzugeben, diese aber für die Zeit beizubehalten. Damit leitete er eine Entwicklung ein, in der die Bewegung in der Zeit als reine Änderung der Konfiguration eines Systems aufgefaßt und die Zeit an dieser gemessen wird [3]. Hier greift er eine Darstellung wieder auf, wie wir sie aus dem Maupertuisschen und dem Fermatschen Prinzip kennen: Die Bahn einer Bewegung im Raum ist eine kürzeste Linie, wobei das Maß auf dieser Linie das Potential der Schwerkraft und die Trägheit reflektiert, aber die Zeit nicht enthält. Die Bewegung durch den Raum der Konfigurationen ist bestimmt als Minimum des Integrals

$$S = \int dt \sqrt{E - E_{\text{potentiell}}} \sqrt{2E_{\text{kinetisch}}}.$$

Da die kinetische Energie homogen quadratisch in den Geschwindigkeiten ist, hängt dieses Integral nicht explizit von der Zeit ab: t ist hier nur ein Parameter, für den beliebig ein anderer substituiert werden könnte. Die kinetische Energie metrisiert den Konfigurationsraum mit der Metrik

$$ds_{\text{Maupertuis}}^2 = (E - E_{\text{potentiell}})E_{\text{kinetisch}}dt^2, \quad (4)$$

aus der sich die Zeit herauskürzt. Ist eine Integralkurve gefunden, bestimmt die Bedingung

$$E_{\text{kinetisch}} + E_{\text{potentiell}} = E$$

den Zeitablauf:

$$dt = \frac{ds_{\text{Maupertuis}}}{E - E_{\text{potentiell}}} \quad (5)$$

Das ist aber die Formel für die Ephemeridenzeit.

Die Entdeckung ist, daß dies nun sofort auf die allgemeine Relativitätstheorie führt. Bestimmt man den Zustand des Raums mit Schwerefeld durch den metrischen Tensor h_{ik} des zugehörigen Linienelements des Raums,

$$ds^2 = h_{ik}dx^i dx^k, \quad (6)$$

gelangt man zur Vorstellung vom Superraum. Ein "Punkt" des Superraums ist dann ein dreidimensionaler Raum, dessen "Koordinaten" durch das metrische Feld $h_{ik}[x]$ in diesem Raum gegeben ist. Das Gravitationsfeld in der vierdimensionalen Raum-Zeit, d.h. die Geschichte des Kosmos, ist dann eine "Kurve" in diesem Superraum. Man muß dabei nur beachten, daß man die von der Koordinatenwahl abhängigen Einflüsse abzuziehen hat (Anhang). Analog zur gewöhnlichen Mechanik definiert man die Maupertuissche Metrik im Superraum

[2],[5],[12], die in modifizierter Form die klassische Bewegung des Gravitationsfeldes bestimmt. Dies ist die vollständige Lösung des Problems, wie sich die Metriken des Raumes ausschließlich relativ zueinander bestimmen und verändern und dabei das Maß des Zeitablaufs in der Art einer Ephemeridenzeit gleich mit ergeben. Ein besonderer Reiz dieses Ergebnisses liegt in der Möglichkeit, die kanonische Quantentheorie des Gravitationsfeldes zu interpretieren, in der die der Schrödinger-Gleichung entsprechende Wheeler-deWitt-Gleichung keine Zeitabhängigkeit enthält, sondern nur Wahrscheinlichkeitsamplituden im Superraum liefert. Das Machsche Prinzip unterstützt aus dieser Sicht das dreidimensionale Konzept der kanonischen Quantisierung des Gravitationsfeldes. Allerdings geht es in dieser Sicht nicht über die Allgemeine Relativitätstheorie hinaus.

4 Maß durch Masse

Angesichts des Ausgangsproblems könnte man mehr verlangen: Schließlich ist die Metrik $ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$ in der Allgemeinen Relativitätstheorie Ausdruck der Orientierung des Inertialsystems und sollte sich nicht an sich selbst, sondern an der Massenverteilung bestimmen, die in einer Relativitätstheorie immer die Verteilung des Energie-Impuls-Tensors ist.

Der Energie-Impuls-Tensor $T_{\mu\nu}$ ist die relativistische Erweiterung der Massendichte. In dreidimensionaler Interpretation zerfällt er in

$$T^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} T^{00} = \text{Energiedichte} & , & T^{0k} = \text{Energiestromdichte} \\ T^{i0} = \text{Impulsdichte} & , & T^{ik} = \text{Spannungstensor} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Die Einsteinschen Gleichungen stellen den Zusammenhang von Weltkrümmung und Energie-Impuls-Tensor auf dem Niveau einer Differentialgleichung ohne weiteres fest:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu}. \quad (8)$$

Der Ricci-Tensor ist die Spur $R_{\mu\nu} = R^{\rho}_{\mu\nu\rho}$ des Riemannschen Krümmungstensors $R^{\lambda}_{\mu\nu\rho}$, der die Drehung eines Vektors bei Paralleltransport um eine infinitesimale geschlossene Linie beschreibt:

$$dA^\lambda = R^{\lambda}_{\mu\nu\rho} df^{\nu\rho} A^\mu.$$

Die Metrik, d.h. die Konfiguration der Inertialsysteme, ist dennoch nicht durch die Massenverteilung allein bestimmt. Wir müssen Randbedingungen aussuchen, die bei gegebener Massenverteilung die Geometrie eindeutig festlegen, und führen damit durch die Hintertür wieder ein Äquivalent des absoluten (von der Massenverteilung unabhängigen) Raums wieder ein. Eine wichtige Aufgabe ist es deshalb, nach Umständen zu suchen, unter denen diese Angabe von Randbedingungen entfallen kann. Diese Aufgabe heißt Integralformulierung der Einsteinschen Gleichungen und gelingt im wesentlichen nur für Raum-Zeiten mit geschlossenen Raumschnitten, also etwa kosmologischen Modellen, die vom Einstein-Kosmos abstammen. Ungeachtet der Erkenntnisse, die man bei der Verfolgung dieser Aufgabe sammelt, kann das Ergebnis eben nur Auswahl aus der Gesamtheit der Lösungen der Einsteinschen

Gleichungen lauten, und das ist eine Vorstellung, die anderen Feldtheorien fremd ist.

5 Der dicke Eimer

”Niemand kann sagen, wie der (Eimer-)Versuch verlaufen würde, wenn die Gefäßwände immer dicker und massiger und zuletzt mehrere Meilen dick würden” schreibt E.Mach als Urteil über Newtons Gedankenversuch. Dies mit Zahlenwerten zu versehen, hat die Allgemeine Relativitätstheorie bereits im ersten Anlauf erreicht. Sie kann ohne weiteres beschreiben, wie der Eimer Newtons die Konfiguration der Inertialsysteme und mit ihr die Flüssigkeit beeinflusst, wenn seine Masse (genauer sein Gravitationspotential) relevant anwachsen. Dazu vergleicht man Lösungen mit verschieden schnell und verschieden massiv rotierenden Quellen und berechnet den Effekt auf etwa ein frei fallendes Gyroskop (Lense-Thirring-Effekt [13],[18],[19]), der allerdings meßtechnisch vom Effekt der Raumkrümmung getrennt werden muß. Satellitenexperimente sind projektiert, die zwar die nötige Meßgenauigkeit erreichen, aber immer noch wenigstens eine Größenordnung von der Finanzierung entfernt sind. Man kann nun eine Komponente des Schließfehlers der Inertialsysteme im Gravitationsfeld rotierender Objekte immer als Machschen Effekt titulieren, der entscheidende Punkt bleibt, daß der Grenzfall des rotierenden Kosmos nicht gefaßt ist, und das liegt gerade an der Schwierigkeit, Rotation überhaupt ohne Grenzbedingungen zu beschreiben. Hier ist die Stelle daran zu erinnern, daß die Rotation eine besonders sperrige Eigenschaft hat: Der Drehimpuls hat eine diskrete Quantenzahl. Das kann heißen, daß eine im Grunde stetige virtuelle Änderung der Konfiguration des Kosmos keinen stetigen Einfluß auf die Eigenschaften der Rotation hat, diese der Machschen Vorstellung also nicht entsprechen kann.

6 Gesetztes und Erklärtes

Die geschichtliche Entwicklung von der Newtonschen Mechanik zur Allgemeinen Relativitätstheorie kann man als wiederholte Zurücknahme absoluter Elemente aus der Physik verstehen: Die Spezielle Relativitätstheorie entfernte die absolute Gleichzeitigkeit der Newtonschen Mechanik und ersetzte das formale Produkt aus Raum und Zeit durch eine tatsächliche Union, wie es H.Minkowski nannte. Dabei wurde die absolute Geschwindigkeitsmessung, die in der Verbindung von Mechanik und Elektrodynamik möglich erschien und die von A.Michelson und anderen gesucht aber nicht gefunden wurde, als ausgeschlossen erkannt und die Relativität der Geschwindigkeit anerkannt. Die Allgemeine Relativitätstheorie erklärte die lokale Relativität der Beschleunigungen als Folge der lokalen Äquivalenz von Trägheit und Schwere. Die Tatsache, daß alle Körper gleich schnell fallen, erlaubt nur die Messung einer Relativbeschleunigung, das heißt einer Gezeitenkraft [8]. Führt nun das Machsche Prinzip über die Allgemeine Relativitätstheorie hinaus? Muß man das Machsche Prinzip als Programm auffassen, stufenweise die absoluten Elemente einer Theorie als Ergebnis einer zu verallgemeinernden Dynamik zu erklären?

Das absolute Element der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die (lokale) Lorentz-Invarianz der Inertialsysteme, die Existenz einer eindeutigen Metrik der Raum-Zeit, die die Gültigkeit der speziellen Relativitätstheorie im Infinitesimalen festschreibt. Unter diesem Gesichtspunkt heißt das Machsche Programm, die lokale Lorentz-Invarianz durch umfassendere Invarianz zu ersetzen und die lokale Lorentz-Invarianz als Ergebnis einer (klassischen) Symmetriebrechung aufzufassen, die nur für (im kosmischen Sinne) kleine Raum-Zeit-Gebiete festgestellt werden kann. Dies entspricht unmittelbar der oben besprochenen Machschen Mechanik, hat nun allerdings eine feldtheoretische Grundlage.

Die einfachste Erweiterung der Lorentz-Invarianz ist die Konform-Invarianz. Sie erwartet, daß alle Bewegungs- und Feldgleichungen nicht nur unbeeindruckt von Lorentz-Transformationen bleiben, sondern sich auch bei lokalen Neuskalierungen (im speziellen der Masse) nicht verändern. Die Masse ist diejenige Größe, die direkt von der Konfiguration des Kosmos abhängt.

Das fängt mit ganz einfachen Argumenten an. Wir wissen, daß die natürliche Einheit der Masse, die Plancksche Masse

$$M_{\text{Planck}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 10^{-5} \text{ g}$$

eine Kombination ist, die die Lichtgeschwindigkeit c enthält, obwohl der Begriff der Masse aus der Newtonschen Mechanik stammt und die speziell-relativistische Geometrie der Raum-Zeit nicht voraussetzen sollte. Bilden wir aber etwa die natürliche Einheit der Masse aus der Planckschen Konstante, der Gravitationskonstante und der kosmologischen Konstante $\Lambda \approx 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$, so erhalten wir die Eddington-Masse [23]

$$M_{\text{Eddington}} = \sqrt[6]{\frac{h^4 \Lambda}{G^2}} \approx 4 \cdot 10^{-25} \text{ g},$$

und das ist doch erstaunlich dicht an der Massenskala der Nukleonen. Kann man das als Indiz sehen, daß die von Λ verkörperte Größe des Kosmos etwas mit der Masse der stabilen Elementarteilchen zu tun hat, die nach den unitären Quantenfeldtheorien fast Null ist ($m_p \approx 10^{-15} M_{\text{GUT}} \approx 10^{-19} M_{\text{Planck}}$)? Mit der kosmologischen Konstanten verschwindet auch die Eddington-Masse, das kann man sehen. Aber eine konstruktive Theorie gibt es nicht, und da bleibt diese Feststellung eben nur eine Randbemerkung.

Eine Theorie, in der die Konforminvarianz auf die Lorentz-Invarianz lokal reduziert wird, verlangen im wesentlichen nach einem zusätzlichen skalaren Feld, das die aktuell durch die Symmetriebrechung festgelegte Skalierung beschreibt. Es sind also Skalar-Tensor-Theorien für das Gravitationsfeld – im Gegensatz zur Allgemeinen Relativitätstheorie, die eine reine Theorie für den metrischen Tensor $g_{\mu\nu}$ ist. Die Brans-Dicke-Theorie [7] und die Hoyle-Narlikar-Theorie [10],[11] sind die wichtigsten Vertreter. Unabhängig von den beobachtungsseitigen Schwierigkeiten ist eine konforminvariante Theorie nur eine ganz elementare Erweiterung der Allgemeinen Relativitätstheorie, die an der alles entscheidenden Kausalstruktur nichts ändert und alle Rechnungen ganz konventionell erscheinen läßt.

Viel spannender wird es, wenn nicht nur die lokale Skala auf dem Lichtkegel durch die kosmisch induzierte Symmetriebrechung bestimmt wird, sondern die Existenz des Lichtkegels selbst. Dies geschieht etwa in einer Theorie, in der zunächst ausschließlich die affinen Zusammenhänge eine Rolle spielen. Dann ist das einfachste dynamische Element also das Verhältnis zweier Raum-Zeit-Volumina [14]. In einer solchen Theorie gibt es keine Kausalität außerhalb der Begrenzung auf ein kosmisch kleines Gebiet, und die Existenz der Zeit wie der kausalen Ordnung ist eine Frage der Existenz und der Symmetrie des Kosmos. Auch ohne Theorie für diesen Teil des Programms kann man charakteristische Effekte bestimmen. Diese Effekte müssen entstehen, weil der uns umgebende Kosmos nicht ideal homogen und isotrop ist und deshalb die Lorentz-Invarianz nicht exakt sein kann. Wenigstens die Galaxis mit ihrem Potential von etwa 10^{-6} stört das isotrope Bild. Es muß dann Feldkomponenten geben, deren maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht mit der abstrakten Signalgeschwindigkeit übereinstimmt. Wir können also nach einer komponentenabhängigen Signalgeschwindigkeit suchen [1]. Erst eine fertige Theorie kann aber entscheiden, welche Feldkomponenten die maximal meßbare Abweichung liefern und ob es auch eine induzierte Anisotropie der Masse geben muß (die in einigen Komponenten bereits als kleiner 10^{-24} festgestellt worden ist).

Wenn von Symmetriebrechung die Rede ist, taucht die Frage auf, ob es nicht der Higgs-Mechanismus ist, der für eine Symmetriebrechung verantwortlich gemacht werden muß. Eine solche Theorie ([16], [17]) verzichtet auf den Kosmos als Orientierung und bleibt in diesem Sinne lokal, hat aber dafür das Problem, die Kohärenzlänge des symmetriebrechenden Feldes zu erklären. Dieses Feld stellt im Grunde wieder den absoluten Raum in neuem Gewande dar. Die Vorstellung der Existenz von Feldern, die mit kosmischer Kohärenzlänge die heutige Form der Physik bestimmen, führt auf den Inflationskosmos mit all seinen Ausformungen. In diesem Sinne ist der Inflationskosmos der anti-Machsche Kosmos schlechthin.

Es sieht so aus, als könne es auch in der nächsten Zukunft keine binäre Antwort auf die Frage geben, ob es ein zutreffendes Machsches Prinzip gibt. Sicher bleibt es aber, daß die Suche nach einer solchen Antwort weiter Ideen produzieren, Diskussionen anregen und verblüffende Einsichten vermitteln wird.

A Der Superraum

Die "Punkte" des Superraums sind dreidimensionale Räume mit verschiedenen geometrischen Eigenschaften, die formal durch die dreidimensionale Metrik $h_{ij}[x]$ dargestellt werden, wobei Koordinatentransformationen zwar diese Metrik ändern, nicht aber die geometrischen Eigenschaften. Ein Punkt ist also gegeben durch $h_{ij}[x]$ modulo der offen bleibenden Koordinatentransformationen. Die "Geschwindigkeit" ist zunächst $\frac{\partial h_{ij}}{\partial t}$, der koordinatenfreie (transformationsunabhängige) Anteil $K_{ij} = \frac{\partial h_{ij}}{\partial t} - N_{i|j} - N_{j|i}$. Das Gravitationsfeld ist durch die Metrik in der vierdimensionalen Raum-Zeit

$$ds^2 = -(N^2 - N_i N^i) dt^2 + 2N_i dx^i dt + h_{ij} dx^i dx^j$$

gegeben. Die Funktionen N^i müssen bestimmt werden und vermitteln dann zusammen mit der Bestimmung einer Art Ephemeridenzeit den Zusammenhang zwischen Raum-Zeit und

Superraum. Der potentiellen Energie entspricht die Krümmung des dreidimensionalen Raums ${}^3R = h^{ik}{}^3R^l_{ikl}$. Das Wirkungsintegral der Allgemeinen Relativitätstheorie lautet dann

$$S = \int d\lambda \int d^3x \sqrt{{}^3R G^{abcd} \left(\frac{\partial g_{ab}}{\partial \lambda} - N_{(a|b)} \right) \left(\frac{\partial g_{cd}}{\partial \lambda} - N_{(c|d)} \right)}. \quad (9)$$

Die generalisierten Impulse sind

$$dK_{ab} = N_{(a|b)} d\lambda - dh_{ab}.$$

Der Ausdruck

$$G^{abcd} = \frac{1}{2} \sqrt{h} (h^{ac} h^{bd} + h^{ad} h^{bc} - 2h^{ab} h^{cd}).$$

vermittelt die Maßbestimmung im Superraum. Im Sinne des Maupertuisschen Prinzips schreiben wir

$$S = \int ds_{\text{Maupertuis}} \quad \text{mit} \quad ds_{\text{Maupertuis}}^2 = \int d^3x {}^3R G^{abcd} dK_{ab} dK_{cd}.$$

References

- [1] AUDRETSCH, J., BLEYER, U., LÄMMERZAHN, C. (1993): Testing Lorentz invariance with atomic beam interferometry, *Phys.Rev. A* **47**, 4632-4636.
- [2] BAIERLEIN, R.F., SHARP, D.H., WHEELER, J.A. (1962): Three-dimensional geometry as carrier of information about time. *Phys.Rev.* **126**, 1864-1865.
- [3] BARBOUR, J.B. (1979): Mach's Mach's principles, especially the second, in: *J.Nickel, J.Pfarr, J.Nitsch (eds.): P.Mittelstaedt Festschrift*, Bibl.Inst.Mannheim.
- [4] BARBOUR, J.B. (1990): *Absolute or Relative Motion? Vol.1: The Discovery of Dynamics*, Cambridge UP.
- [5] BARBOUR, J.B. (1992): The emergence of time and its arrow from timelessness, in: *Physical origins of time asymmetry, Proc.*, Cambridge UP.
- [6] BARBOUR, J.B., B.BERTOTTI (1977): Gravity and inertia in a Machian framework, *Nuovo Cim. B* **38**, 1-27.
- [7] BRANS, C.H., DICKE, R.H. (1961): Mach's principle and a relativistic theory of gravitation, *Phys.Rev.* **124**, 925-935.
- [8] EHLERS, J. (1993): Relations between Machian ideas and general relativity, *Vortrag*, Tübingen, Tagung "Mach's Principle".
- [9] EINSTEIN, A. (1955): *The meaning of relativity*, 5th ed. Princeton UP.
- [10] HOYLE, F., NARLIKAR, J.V. (1963): Mach's principle and the creation of matter, *Proc.Roy.Soc.(London) A* **273**, 1-11.
- [11] HOYLE, F., NARLIKAR, J.V. (1974): *Action at a distance in Physics and Cosmology*, Freeman, New York.
- [12] KUCHAR, K. (1993): Canonical gravity and the definition of time, *Vortrag*, Tübingen, Tagung "Mach's Principle".

- [13] LENSE, J., THIRRING, H. (1918): Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie, *Phys.Z.* **19**, 156-163.
- [14] LIEBSCHER, D.-E., YOURGRAU, W. (1979): Classical spontaneous breakdown of symmetry and the induction of inertia, *Ann.d.Phys.(Lpz.)* **36**, 16.
- [15] MACH, E. (1883): *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Leipzig.
- [16] NE'EMAN, Y., SIJACKI, D.J. (1988): Gravity from symmetry breakdown of a gauge affine theory, *Phys.Lett. B* **200**, 489-494.
- [17] PELDAN, P. (1990): Gravity coupled to matter without the metric, *Phys.Lett. B* **248**, 62-66.
- [18] PFISTER, H., BRAUN, K.H. (1985): *Class.Quant.Grav.* **2**, 909.
- [19] PFISTER, H., BRAUN, K.H. (1986): *Class.Quant.Grav.* **3**, 335.
- [20] SCHRÖDINGER, E. (1925): Die Erfüllbarkeit der Relativitätsforderungen der klassischen Mechanik, *Ann.d.Phys.(Lpz.)* **79**, 325-336.
- [21] TREDER, H.-J. (1972): *Die Relativität der Trägheit*, Akademie Verlag Berlin.
- [22] TREDER, H.-J. (1974): *Über die Prinzipien der Dynamik von Einstein, Hertz, Mach und Poincaré*, Akademie Verlag Berlin.
- [23] TREDER, H.-J. (1993): *private communication*.