

Raum - Zeit - Materie

zusammen denken, getrennt wahrnehmen

Domenico Giulini

ZARM Bremen und Universität Hannover

*Unbestimmt und relativ?
Das Weltbild der modernen Physik*

Nürnberg, 21. September 2019

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

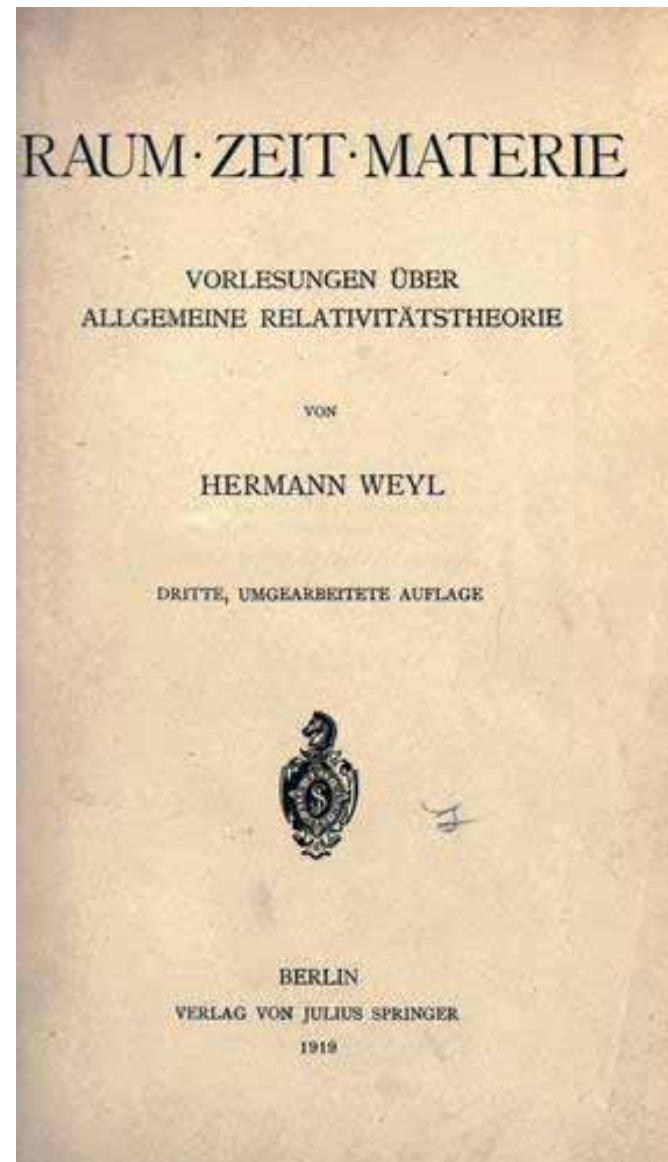
Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss



Hermann Weyl (1885-1955)



„Alle Anfänge sind dunkel. Gerade dem Mathematiker, der in seiner ausgebildeten Wissenschaft in strenger und formaler Weise mit seinen Begriffen operiert, tut es not, von Zeit zu Zeit daran erinnert zu werden, dass die Ursprünge in dunklere Tiefen zurückweisen, als er es mit seinen Methoden zu erfassen vermag. Jenseits allen Einzelwissens bleibt die Aufgabe, zu *begreifen*.“

Hermann Weyl, RZM 1918-23

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Vorbemerkung zu “Welt-Bild”

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

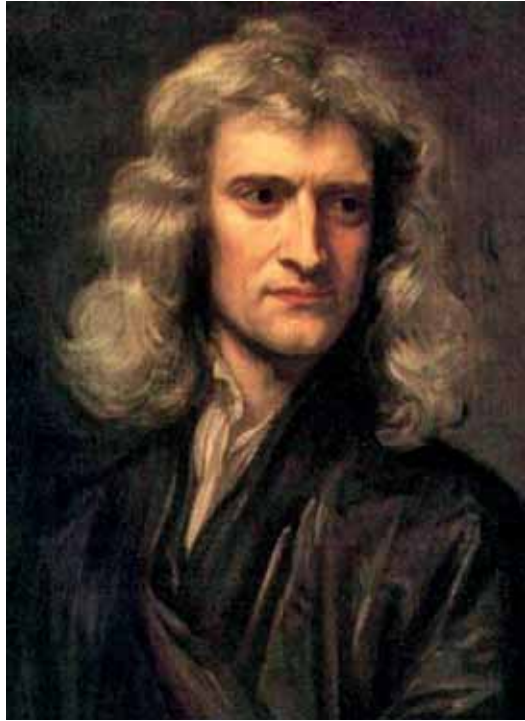
Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

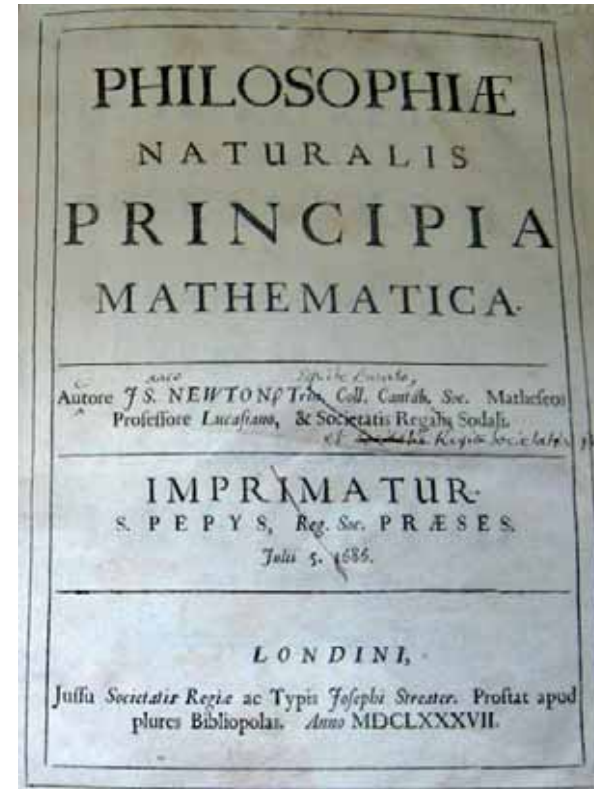
Schluss

- ▶ Bilder können gegenständlich, realistisch, allegorisch oder auch abstrakt sein.
- ▶ Ein Bild kann Abbild von etwas sein, auf das es sich bezieht, oder nicht.
- ▶ Von einem “Welt-Bild” der Physik zu sprechen, ohne damit gleichzeitig eine ontologische Verpflichtung hinsichtlich der Unterscheidung zwischen “Welt” und “Bild” einzugehen (was ist Welt und was ist Bild) , scheint unsinnig.
- ▶ Auf der anderen Seite ist gerade diese Unterscheidung in der modernen Physik schwer zu treffen und deshalb unbeliebt und gefürchtet. Häufig zu beobachtende Reaktion ist der gemeine Fluchtreflex, steigerungsfähig bis zur pathologischen *Ontophobia Occulta*.
- ▶ Dabei hatte doch alles so glänzend angefangen

Ein glänzender Start



Isaac Newton 1643-1724



Raum-Zeit-Materie

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

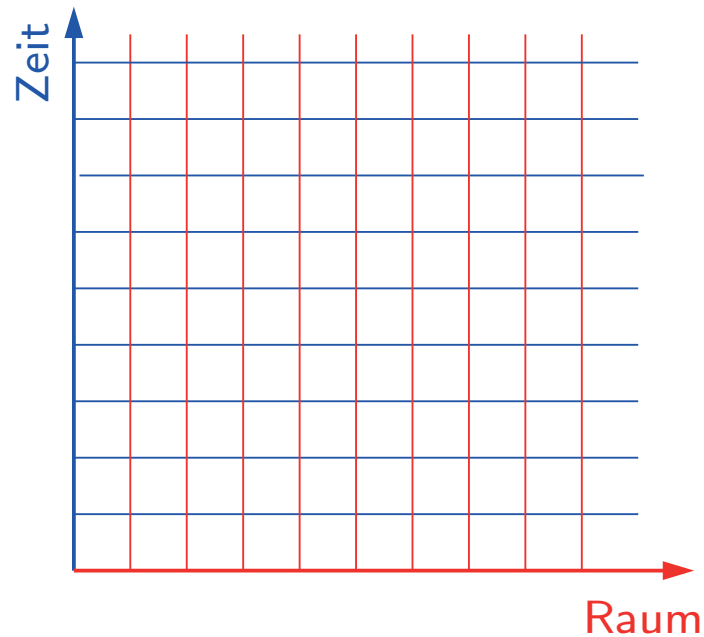
Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

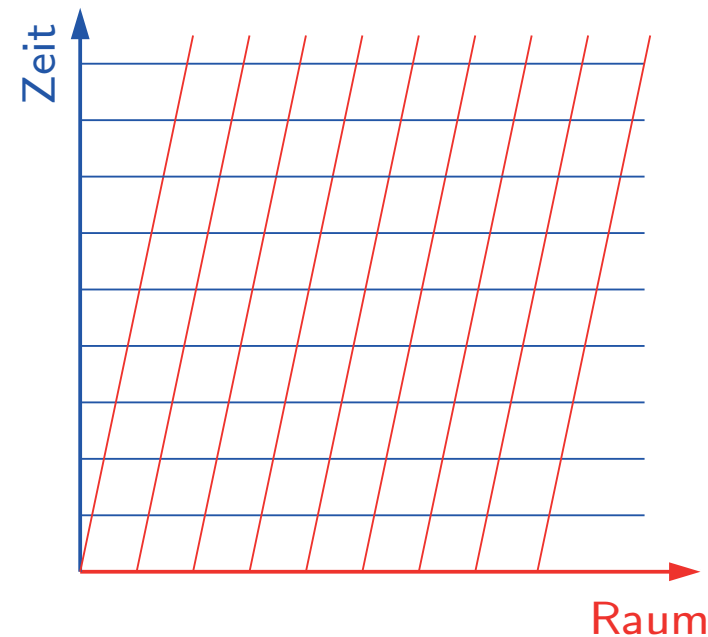
Schluss

- ▶ Raum und Zeit existieren als selbständige Entitäten, unabhängig von materiellen Gehalt der Welt. Der Begriff der "Bewegung" wird somit auf jedes individuelle Stück Materie anwendbar. Erst dadurch können autonome Bewegungsgleichungen von Untersystemen (Körpern) aufgestellt werden. Diesem Umstand verdankt die Newton'sche Mechanik ihren Erfolg, der unumstritten ist. Umstritten war und bleibt die damit verbundene Ontologie.

Struktur der Newton'schen und Galilei-Newton'schen Raum-Zeit



- ▶ Die Newton'sche Raum-Zeit ist in zweifacher Weise gefasert strukturiert: Vertikale Linien entsprechen jeweils einem festen (wiedererkennbaren!) Raumpunkt zu allen Zeiten (→ Gleichortigkeitsstruktur). Horizontale Linien entsprechen jeweils allen Raumpunkten zu einer festen Zeit (→ Gleichzeitigkeitsstruktur).



- ▶ Die Galilei-Newton'sche Raum-Zeit lässt die Gleichortigkeitsstruktur fallen indem sie nicht eine sondern unendlich viele vertikaler Faserungen auszeichnet, die genau den den starren Trägheitsbewegungen entsprechen. Diese bestimmen eine affine Struktur der Raumzeit. Die horizontale Faserung wird beibehalten.

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Newton: Gravitation

- ▶ In der 'Principia' stellt Newton Gesetze auf, die es einerseits gestatten, aus bekannten Kräften auf Bewegungen zu schließen, andererseits aus bekannten Bewegungen auf die sie lenkenden Kräfte.

Die physikalischen Gegenstände, auf die ein Bewegungs-begriff anwendbar ist, sind stets zusammengesetzt gedacht aus „punktförmigen – d.h. ausdehnungslosen – Massen, sogenannten *Massenpunkten*. Die zwischen diesen wirkende Kräfte sind zunächst als instantan anzusehen und durch die Positionen der Massenpunkte vollständig bestimmt. Es existiert noch kein moderner Feldbegriff in der 'Principia'.

- ▶ *„That gravity should be innate & essential to matter so that one body may act upon another at a distance through a vacuum without the mediation of anything else by and through which their action of force may be conveyed from one to another is to me so great an absurdity that I believe no man who has in philosophical matters any competent faculty of thinking can ever fall into it. Gravity must be caused by an agent acting constantly according to certain laws, but whether this agent be material or immaterial is a question I have left to the consideration of my readers.“*

Newton to Bentley (1692)

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Raum-Zeit: Galilei & Newton (modern interpretiert)

Raum und Zeit werden mathematisch zusammen gedacht als raumzeitliches Kontinuum, aber mit absoluten Strukturen ausgestattet, die eine objektive Zerlegung in eine Zeit (Singular) und Räume (Plural) ermöglichen.

- ▶ Die Raum-Zeit ist eine Menge, deren Elemente Ereignisse heißen. Die Charakterisierung dieser Menge bleibt offen!
 - ▶ Von je zwei Ereignissen ist bestimmt, was ihr zeitlicher Abstand ist (\rightarrow Zeitmetrik). Ereignisse mit Zeitabstand Null heißen gleichzeitig.
 - ▶ Für je zwei gleichzeitige Ereignisse ist bestimmt, was ihr räumlicher Abstand ist (\rightarrow Raummetrik).
- \Rightarrow “Gleichzeitigkeit” ist objektiv, d.h. durch intrinsische Strukturmerkmale der Raum-Zeit selbst bestimmt, “Gleichortigkeit” nicht.
- ▶ Auf der Raum-Zeit ist eine affine Struktur definiert, die es gestattet von “gleichförmigen” und “geradlinigen” Bewegungen zu sprechen.
 - ▶ Die Gruppe der strukturerhaltenden Bijektionen der Raum-Zeit, also ihrer Automorphismen, heißt in diesem Fall **Galilei-Gruppe**.

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Raum-Zeit: Einstein-Minkowski (modernn interpretiert)

Raum und Zeit werden mathematisch zusammen gedacht als raumzeitliches Kontinuum, aber wieder wie im Galilei-Newton-Fall mit absoluten Strukturen ausgestattet. Diese erlauben keine objektive Zerlegung in Zeit und Raum, sondern nur solche mit kontextueller Abhängigkeit (“relativ zum Beobachter”).

- ▶ Die Raum-Zeit ist eine Menge, deren Elemente Ereignisse heißen. Die Charakterisierung dieser Menge bleibt auch diesmal offen!
 - ▶ Von je zwei Ereignissen ist ihr raumzeitlicher “Abstand” bestimmt (\rightarrow Raum-Zeit-Metrik). Dieser kann nicht in eindeutiger Weise in einen zeitlichen und einen räumlichen Anteil zerlegt werden.
- \Rightarrow “Gleichzeitigkeit” ist nicht mehr objektiv, sondern nur kontextuell definierbar; mit weitreichenden Konsequenzen für die Anwendbarkeit von Begriffen, die implizit auf einer Gleichzeitigkeitsdefinition beruhen; z.B. “räumliche Länge”.
- ▶ Auf der Raum-Zeit ist eine affine Struktur definiert, die es weiterhin gestattet von “gleichförmig-geradlinigen” Bewegungen zu sprechen.
 - ▶ Die Gruppe Automorphismen, heißt in diesem Fall **Poincaré-Gruppe**.

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

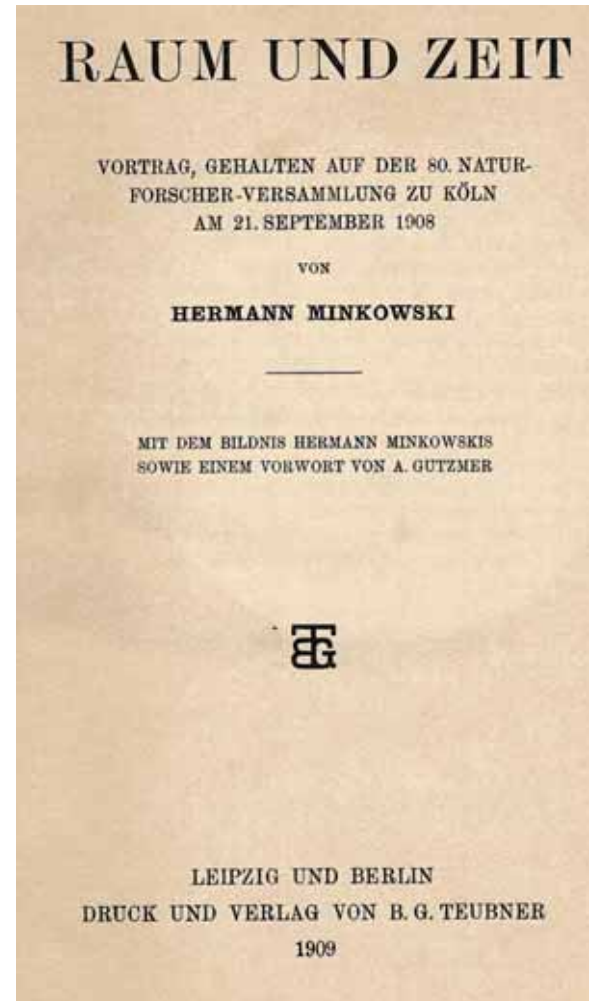
- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Minkowskis „Raum und Zeit“ (1908)



Hermann Minkowski (1864-1909)



Raum-Zeit-Materie

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

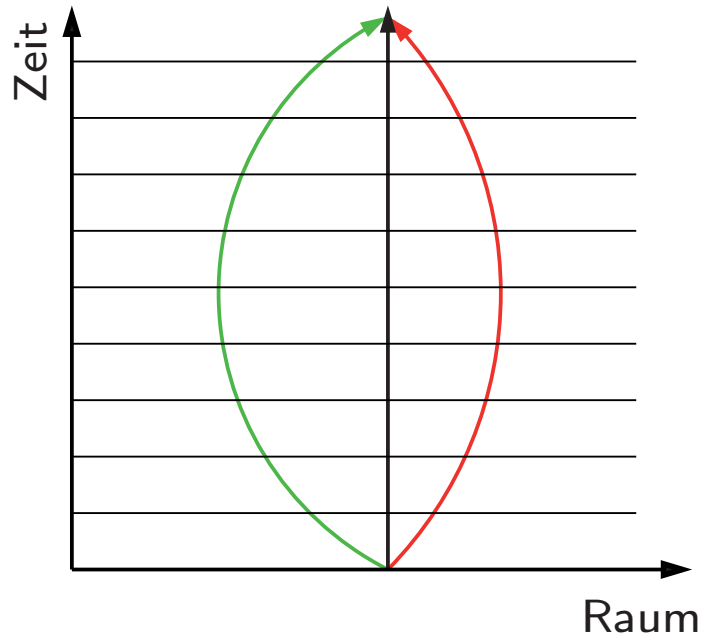
- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

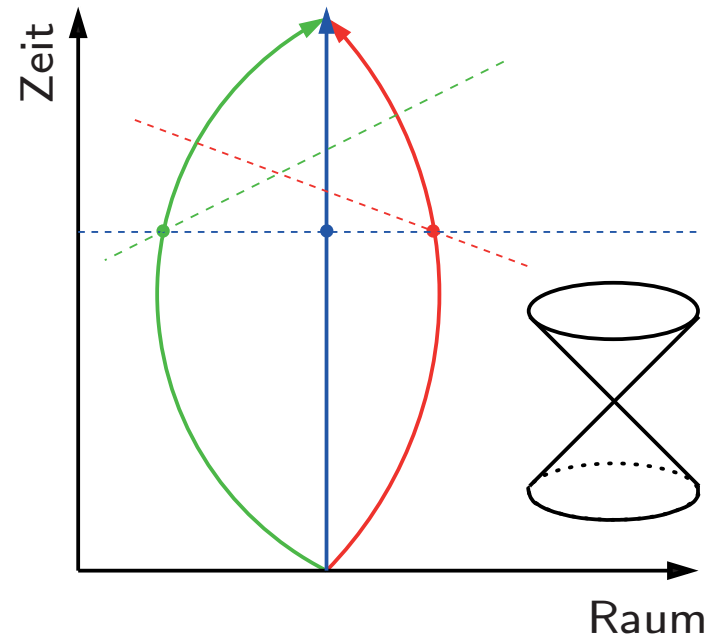
- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Galilei-Newton versus Minkowski



- ▶ Zwei Gleichzeitigkeitsstruktur der Galilei-Newton'schen Raum-Zeit bedingt, dass entlang verschiedener Weltlinien zwischen zwei festen Ereignissen immer die gleiche Zeit vergeht (Anzahl der geschnittenen Gleichzeitigkeitsebenen).



- ▶ In der Minkowski Raum-Zeit entfällt die Gleichzeitigkeitsstruktur. Es verbleibt die Möglichkeit, jeder Kurve eine Länge zuzuordnen. Die so gemessene Länge entspricht der Zeit, die eine "Uhr" entlang dieser Weltlinie misst. Diese hängt vom Weg ab!

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Der „Waywiser“



Raum-Zeit-Materie

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

- ▶ „M.H.! Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund' an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken, und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren.“
- ▶ „Ich will einen Raumpunkt zu einem Zeitpunkt, d.i. ein Wertesystem (t, x, y, z) einen *Weltpunkt* nennen. Die Mannigfaltigkeit aller denkbaren Wertesysteme (t, x, y, z) soll die *Welt* heißen. [...] *Um nirgends eine gähnende Leere zu lassen, wollen wir uns vorstellen, daß allerorten und zu jeder Zeit etwas wahrnehmbares vorhanden ist.*“

"Beiträge zur Begründung der transfiniten Mengenlehre" (1895)

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss



Georg Cantor (1845-1918)

- ▶ „Unter einer *Menge* verstehen wir jede Zusammenfassung M von bestimmten, wohlunterschiedenen Objekten unserer Anschauung oder unseres Denkens (welche die ‘Elemente’ von M genannt werden) zu einem Ganzen.“

Die dualistische Materievorstellung \leq 1915

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

- ▶ Christiaan Huygens (1629-1695), Augustin Jean Fresnel (1788-1827) und Thomas Young (1773-1829) ebnet den Weg der Wellentheorie des Lichts. “Wellen” sind hier stets gedacht als periodische Zustandsänderungen eines Raumerfüllenden Mediums; des “Äthers”, der auch bei Newton vorkommt („feines spirituelles Medium“).
- ▶ Dadurch entsteht eine bis in das 20. Jahrh. reichende *dualistische Materieauffassung*, die einerseits die gewöhnliche „ponderable“ Materie enthält, andererseits den Äther.
- ▶ Die spezielle Relativitätstheorie entstand aus dem Problem, ob das für die Mechanik als gültig angesehene Relativitätsprinzip auch auf die Elektrodynamik erweitert werden kann.
(→ „Elektrodynamik bewegter Körper“ 1905)
- ▶ Dies wurde an der Frage festgemacht, ob ein Bewegungszustand relativ zum Äther feststellbar ist (→ Michelson-Morley-Experiment 1881/7). Diese Experimente verliefen negativ - bis heute!
- ▶ Gibt es dann diesen ominösen Äther vielleicht gar nicht? Als was soll man dann aber die elektromagnetischen Felder verstehen?

Intermezzo: Feldbegriffe in der Physik

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

- ▶ Unter einem Feld versteht man in der modernen Physik meist eine Abbildung, die jedem Punkt der Raum-Zeit, also jedem Tupel (t, \vec{x}) , eine Feldgröße $F(t, \vec{x})$ zuordnet:

$$F : (t, \vec{x}) \mapsto F(t, \vec{x})$$

Der Wertebereich kann dabei sehr Unterschiedlich sein. Sehr häufig nimmt F Werte in einem Vektorraum an, so dass Feldwerte addiert und mit Zahlen multipliziert werden können.

- ▶ In der Elastizitätstheorie, Hydrodynamik und Thermodynamik ist diese Abbildung stets in Bezug zu einem am Ereignis (t, \vec{x}) stattfindenden materiellen Geschehen zu verstehen; z.B. bezeichnet der Wert $T(t, \vec{x})$ die Temperatur *des Gases* am Ort \vec{x} zum Zeitpunkt t .
- ▶ Diese substanzgebundene Vorstellung wurde zuerst auch selbstverständlich in die Elektrodynamik übernommen. Die elektromagnetischen Feldgrößen $\vec{E}(t, \vec{x})$ und $\vec{B}(t, \vec{x})$ waren dann Zustandsgrößen *des Äthers* bei (t, \vec{x}) .
- ▶ Erst allmählich und unter großen psychologischen Schwierigkeiten emanzipierte sich der Feldbegriff von der Vorstellung eines substanzialen Trägers. Das Feld wurde so selbst zum irreduziblen Repräsentanten der Materie.

Elektrodynamik: Maxwell 1864

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

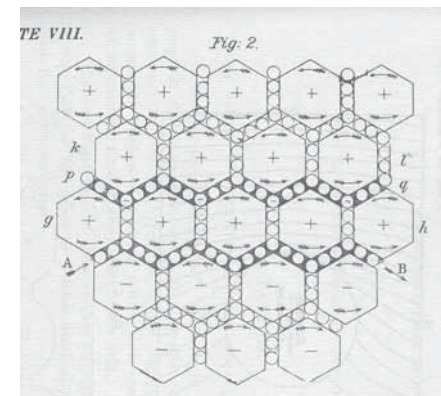
- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

- ▶ „I have on a former occasion attempted to describe a particular kind of motion and a particular kind of strain, so arranged as to account for the phenomena. In the present paper I avoid any hypothesis of this kind; and in using such words as electric momentum and electric elasticity in reference to the known phenomena of the induction of currents and the polarisation of dielectrics, I wish merely to direct the mind of the reader to mechanical phenomena which will assist him in understanding the electrical ones. All such phrases in the present paper are to be considered as illustrative, not as explanatory.“



J.C. Maxwell (1831-79)



„Molekularwirbel“

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

- ▶ Die ART ist eine Feldtheorie. Das Feld beschreibt die Geometrie dieser Raum-Zeit, die nun von der Verteilung von Energie und Impuls der darin befindlichen Materie beeinflusst (nicht bestimmt!) wird.
- ▶ Die ART ist eine Theorie der Gravitation, die durch die ART geometrisch gedeutet wird. Diese Möglichkeit basiert auf der Gültigkeit des Einstein'schen Äquivalenzprinzips, das die zusammenfassende Beschreibung *aller* gravitativer Phänomene in *einer* Geometrie erst ermöglicht. Jede Form von Materie "sieht" die gleiche Geometrie!
- ▶ Das Feld selbst ist *nicht* an die Existenz von Materie gebunden. Es existieren "Vakuum-Lösungen" der ART-Feldgleichungen, z.B. Gravitationswellen oder Schwarze Löcher. Attribute von Materie, wie Energie, Impuls, Drehimpuls, etc. treffen, mit gewissen Einschränkungen, auch auf das Gravitationsfeld zu.

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

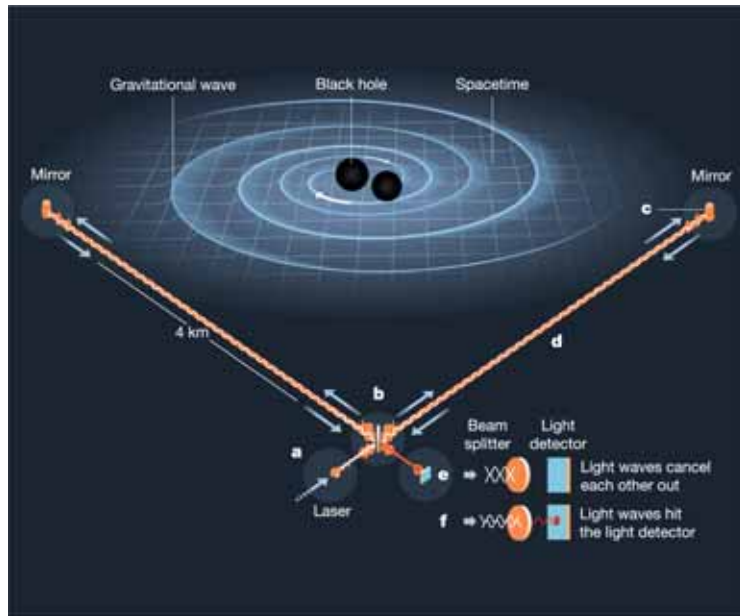
ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

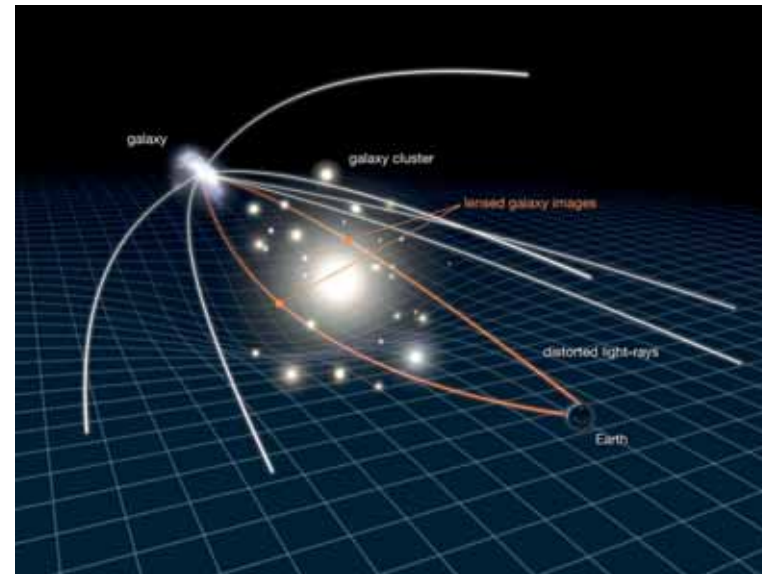
Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

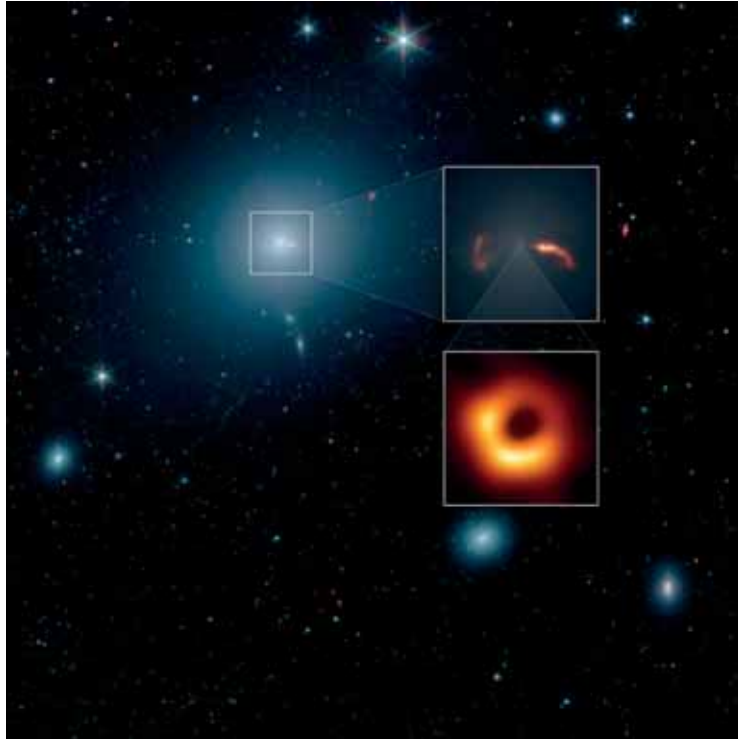
Schluss



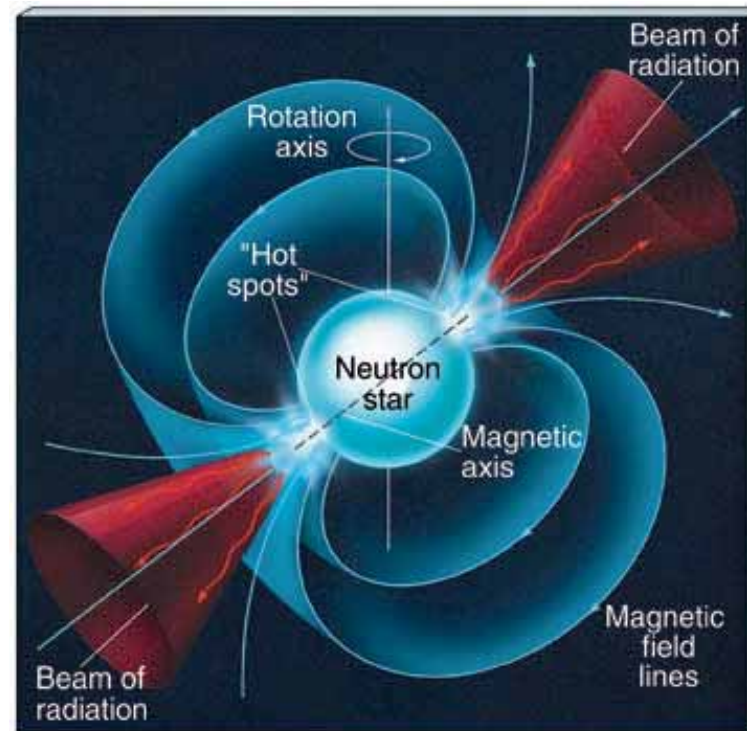
Gravitationswellen



Gravitationslinsen



Schatten SL in M87



Neutronensterne

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

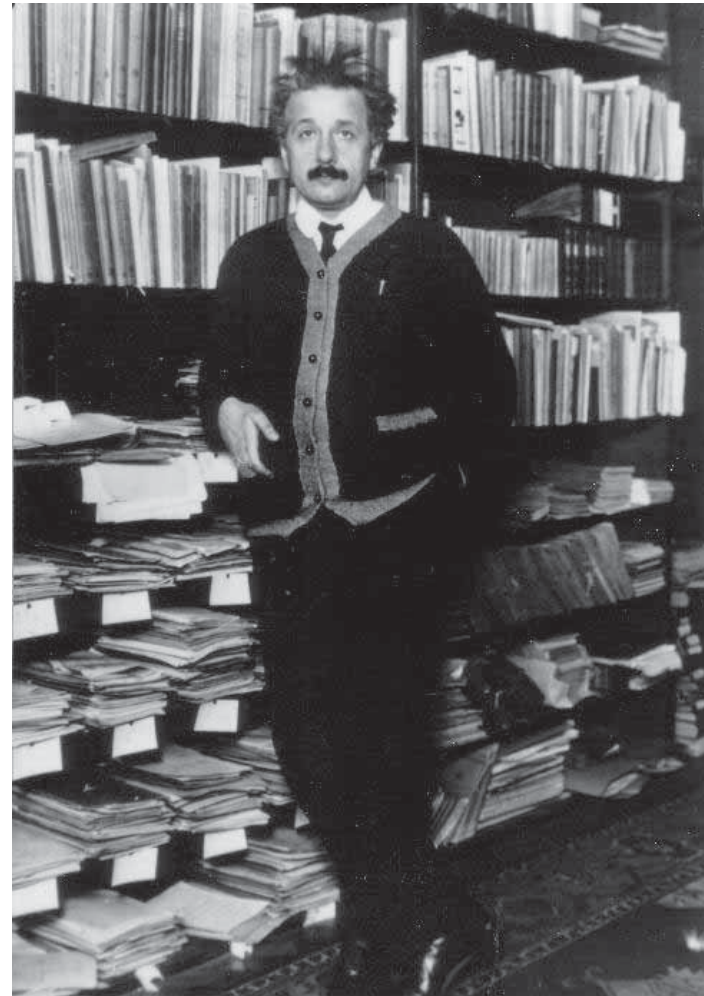
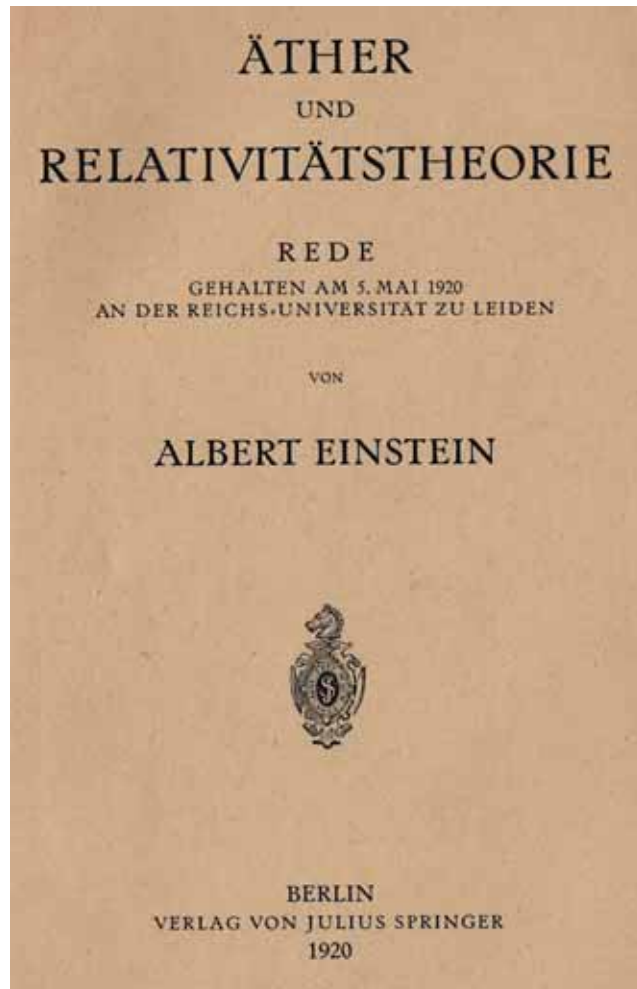
Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Äther und Relativitätstheorie 1920

Raum-Zeit-
Materie



Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Äther und Relativitätstheorie 1920

Raum-Zeit-
Materie

— 14 —

gedacht werden kann. Die Existenz des Gravitationsfeldes ist an die Existenz des Raumes unmittelbar gebunden. Dagegen kann ein Raumteil sehr wohl ohne elektromagnetisches Feld gedacht werden; das elektromagnetische Feld scheint also im Gegensatz zum Gravitationsfeld gewissermaßen nur sekundär an den Äther gebunden zu sein, indem die formale Natur des elektromagnetischen Feldes durch die des Gravitationsäthers noch gar nicht bestimmt ist. Es sieht nach dem heutigen Zustande der Theorie so aus, als beruhe das elektromagnetische Feld dem Gravitationsfeld gegenüber auf einem völlig neuen formalen Motiv, als hätte die Natur den Gravitationsäther statt mit Feldern vom Typus der elektromagnetischen, ebensogut mit Feldern eines ganz anderen Typus, z. B. mit Feldern eines skalaren Potentials, ausstatten können.

Da nach unseren heutigen Auffassungen auch die Elementarteilchen der Materie ihrem Wesen nach nichts anderes sind als Verdichtungen des elektromagnetischen Feldes, so kennt unser heutiges Weltbild zwei begrifflich vollkommen voneinander getrennte, wenn auch kausal aneinander gebundene Realitäten, nämlich Gravitationsäther und elektromagnetisches Feld oder — wie man sie auch nennen könnte — Raum und Materie.

Natürlich wäre es ein großer Fortschritt, wenn es gelingen würde, das Gravitationsfeld und das elektromagnetische Feld zusammen als ein einheitliches Gebilde aufzufassen. Dann erst würde die von Faraday und Maxwell begründete Epoche der theoretischen Physik zu einem befriedigenden Abschluß kommen. Es würde dann der Gegensatz Äther — Materie verblässen und die ganze Physik zu einem ähnlich geschlossenen Gedankensystem werden wie Geometrie, Kinematik und Gravitationstheorie durch die allgemeine Relativitätstheorie. Ein überaus geistvoller Ver-

— 15 —

such in dieser Richtung ist von dem Mathematiker H. Weyl gemacht worden; doch glaube ich nicht, daß seine Theorie der Wirklichkeit gegenüber standhalten wird. Wir dürfen ferner beim Denken an die nächste Zukunft der theoretischen Physik die Möglichkeit nicht unbedingt abweisen, daß die in der Quantentheorie zusammengefaßten Tatsachen der Feldtheorie unübersteigbare Grenzen setzen könnten.

Zusammenfassend können wir sagen: Nach der allgemeinen Relativitätstheorie ist der Raum mit physikalischen Qualitäten ausgestattet; es existiert also in diesem Sinne ein Äther. Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie ist ein Raum ohne Äther undenkbar; denn in einem solchen gäbe es nicht nur keine Lichtfortpflanzung, sondern auch keine Existenzmöglichkeit von Maßstäben und Uhren, also auch keine räumlich-zeitlichen Entfernungen im Sinne der Physik. Dieser Äther darf aber nicht mit der für ponderable Medien charakteristischen Eigenschaft ausgestattet gedacht werden, aus durch die Zeit verfolgbaren Teilen zu bestehen; der Bewegungsbegriff darf auf ihn nicht angewendet werden.

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

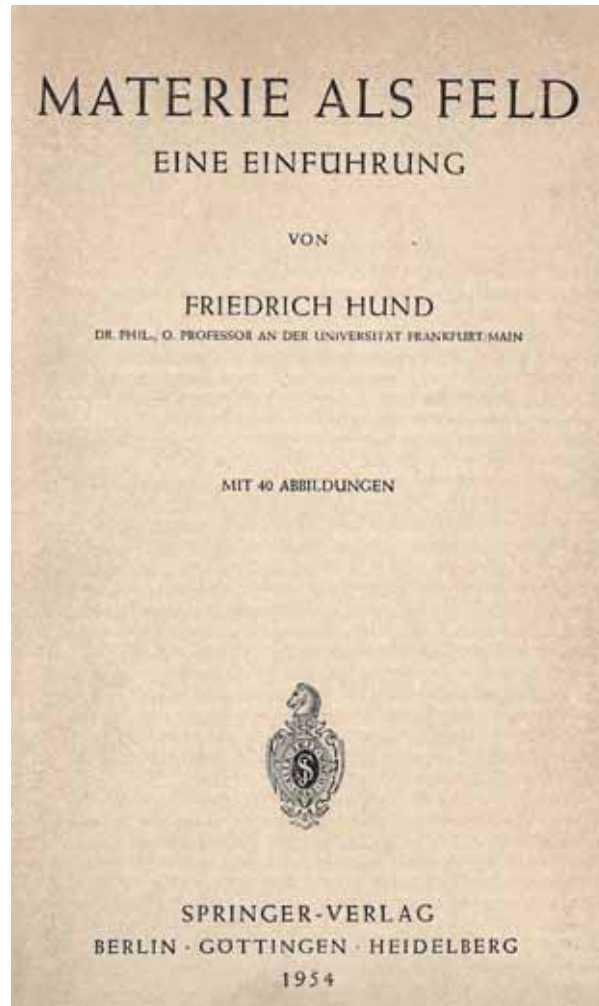
- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Materie als Feld (nach 1950)



Friedrich Hund (1896-1997)

Raum-Zeit-Materie

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Materie als Feld (nach 1950) - Fortsetzung

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

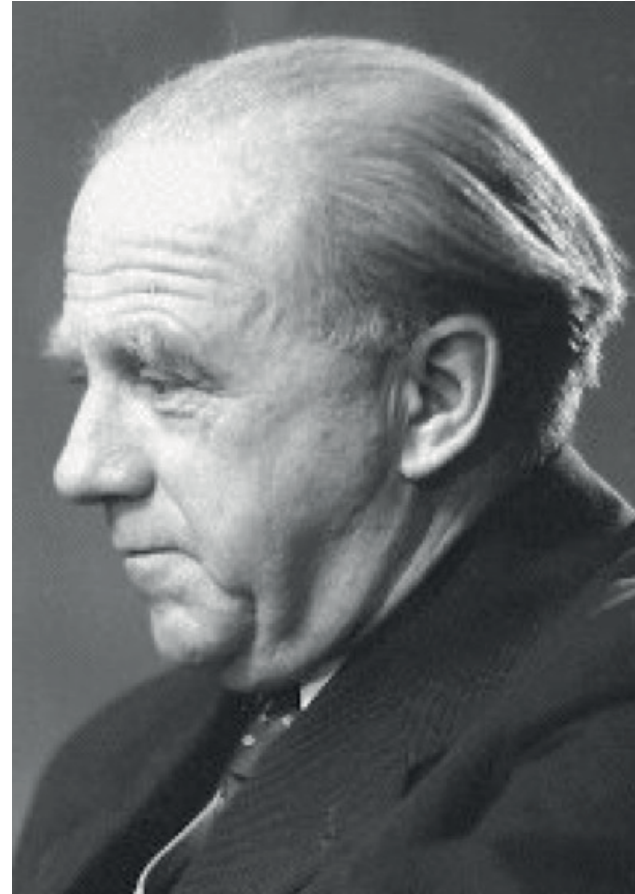
ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss



Werner Heisenberg (1901-1976)

Materie als Feld (nach 1950) - Fortsetzung

Neben allen Unterschieden bleiben in der modernen RQFT, die auch dem Standardmodell der Elementarteilchen zugrunde liegt, folgende Grundannahmen bestehen:

- ▶ Alle Materie wird durch Felder repräsentiert. Felder sind Abbildungen von der Raum-Zeit in einen Wertebereich, der charakteristisch für das jeweilige Feld ist. In der QFT sind die Felder operatorwertige Distributionen.
- ▶ Sowohl die Raum-Zeit (Definitionsbereich) als auch der Wertebereich dieser Felder tragen eine Darstellung der Automorphismengruppe der Raum-Zeit, die unabhängig von den Feldern (der Materie) als absolute und nicht dynamische Struktur vorgegeben ist.
- ▶ Damit tragen auch die Felder Darstellungen dieser Automorphismengruppe. "Elementare Systeme" sind solche, die unter dieser Gruppe *irreduzibel*, also unzerlegbar, sind. Für die Poincaré-Gruppe werden diese durch Angabe von "Masse" und "Spin" eindeutig charakterisiert.
- ▶ Raum-Zeit-Struktur \Rightarrow Klassifikationsschema elementarer Teilchen.

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Raum und Feld: Fierz an Pauli, Oktober 1951

- ▶ Das Raumproblem ist mit dem Problem der [Quanten]Felder unlösbar verbunden.
- ▶ In der klassischen Physik (ohne ART) ist leerer Raum möglich. Z.B. existieren Lösungen mit gebietsweise verschwindenden Feldern. Dazu braucht man eine Theorie des Raumes, die diesen in seiner Existenz nicht an das Vorhandensein von Materie koppelt.
- ▶ *„In diesem Sinne ist auch der Raum der RT absolut, weshalb Einstein vorschlug, ihn ‘Äther’ zu nennen.“*
- ▶ *„In einer richtigen [Quanten]Feldtheorie, sollte die Theorie der Lokalisierung auch eine Theorie des Raumes ergeben. Dieser sollte irgendwie durch die Felder aufgespannt werden, also in einem viel tieferen Sinn als in der RT, Funktion des Beobachters sein.“*



Markus Fierz (1912-2006)



Wolfgang Pauli (1900-1958)

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

- ▶ Alle fundamentalen Wechselwirkungen werden durch Feldtheorien beschrieben.
- ▶ Elektromagnetische, schwache und starke WW genügen Gesetzen, die als Symmetrien die Automorphismengruppe der Minkowski Raum-Zeit enthält. Erst dadurch erhalten viele physikalische Begriffe ihre mathematische Bedeutung (Energie, Impuls, Drehimpuls, etc.). Die Raumzeit ist als fest gegeben zu denken und bleibt vom materiellen Geschehen unbeeinflusst.
- ▶ Nur die Gravitation benötigt eine über die SRT hinausgehende Raum-Zeit-Struktur. Diese Struktur wird durch lokale Gesetze an das materielle Geschehen gebunden, wenn auch nicht bedingt. Das geometrische Feld der ART hat eigene Freiheitsgrade und trägt - mit gewissen Einschränkungen - auch materielle Attribute.
- ▶ Ein rein relationales Raum-Konzept, wie es z.B. Leibniz gegenüber Newton vertreten hat, ist in der ART *nicht* realisiert.

ENDE

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss

- ▶ Alle fundamentalen Wechselwirkungen werden durch Feldtheorien beschrieben.
- ▶ Elektromagnetische, schwache und starke WW genügen Gesetzen, die als Symmetrien die Automorphismengruppe der Minkowski Raum-Zeit enthält. Erst dadurch erhalten viele physikalische Begriffe ihre mathematische Bedeutung (Energie, Impuls, Drehimpuls, etc.). Die Raumzeit ist als fest gegeben zu denken und bleibt vom materiellen Geschehen unbeeinflusst.
- ▶ Nur die Gravitation benötigt eine über die SRT hinausgehende Raum-Zeit-Struktur. Diese Struktur wird durch lokale Gesetze an das materielle Geschehen gebunden, wenn auch nicht bedingt. Das geometrische Feld der ART hat eigene Freiheitsgrade und trägt - mit gewissen Einschränkungen - auch materielle Attribute.
- ▶ Ein rein relationales Raum-Konzept, wie es z.B. Leibniz gegenüber Newton vertreten hat, ist in der ART *nicht* realisiert.

ENDE

1. Weyl: ETH-Zürich, Bildstelle
2. Newton: Newton Institute, Cambridge
3. Minkowski: Scan der Originalveröffentlichung
4. Waywiser: carlesedwin.com
5. Cantor: wikimedia.org
6. Gravitationswellen: Nature.com
7. M87, Neutron star: nsf.gov
8. Fierz, Pauli: ETH-Zürich, Bildstelle

Raum & Zeit

- Newton
- Minkowski
- Cantor

Feldbegriff

- Dualismus
- Theorie
- Maxwell

ART

- Theorie
- Erfolge
- Interpretation

Materie als Feld

- Hund
- Heisenberg
- Theorie
- Fierz & Pauli

Schluss