

Fragen der Theorieentwicklung

1. Wissenschafts theoretische Fragen

- *im Rahmen der Erkenntnistheorie, bezogen auf Physik*
 - *Fragen über die Grundlagen unserer Erkenntnis: Experiment, Mathematik, Symbol und Konzept*
 - *Fragen über den Status unserer Erkenntnis: z.B., Positivismus/Realismus Debatte*
 - *Fragen über die Struktur unserer Erkenntnis: Theorie, Experiment, Naturgesetze, Prinzipien*
 - *Fragen über den Vorgang und Aufbau unserer Erkenntnis: Logik der Forschung, Induktion, Hypothesenbildung, Theoriebildung, Kontinuität, Inkommensurabilität, Fortschritt*
 - *Geschichte der Physik als empirische Basis*
- *geführt übergreifend Physik/Philosophie*
 - *Philosophen/Wissenschaftstheoretiker: geschichtlich immer präsent (Aristoteles, Kant, Peirce)
Pierre Duhem, Karl Popper, Thomas Kuhn, Paul Feyerabend, Imre Lakatos, Hilary Putnam, Erhard Scheibe ..*
 - *Physiker: Heinrich von Helmholtz, Heinrich Hertz, Ernst Mach, Max Planck, Albert Einstein, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Steven Weinberg ..*

In Folgenden: der Ansatz Pierre Duhems als Beispiel und als Rahmen der Diskussion

2. Pierre Duhem

- *Biographisches*

1861 geboren, 1916 gestorben

absolviert das Physikstudium an der École Normale Supérieure in Paris

1895 Professur an der Université de Bordeaux.

Physik Forscher (physikalischen Chemie, Hydrodynamik, Strömungsgleichungen)

Buch „La théorie physique, son objet et sa structure“ 1906

- *Seine Zeit:*

Hochpunkt/Endphase der klassischen Physik, ihre Problematisierung, Anfänge der „modernen“ Physik

(Maxwell, Boltzmann, Hertz, Lorentz, Poincaré, Planck, Einstein, ...)

Philosophische Diskussion in der Physik: Realismus, Positivismus, Konventionalismus

Paradigma der klassischen Physik: Mechanik, klassische Feldtheorie

Analytische Mechanik (Hamilton, Legendre, Jacobi)

Rekonstruktion der Thermodynamik aus der statistischen Mechanik (aber: Reversibilität/Irreversibilität)

Probleme:

Diskussion: Reversibilität/Irreversibilität (Boltzmann, Poincaré, Mach u.a.)

Nicht-galileischen Invarianz der Maxwell'schen Gleichungen --> kein mechanistisches Modell (Ether)

Diskrete Natur des Lichts (Planck und Einstein)

- Duhem's Anliegen

erstes Anliegen: Physik von Metaphysik unabhängig zu machen --> Eigenständigkeit

Preis: Verzicht auf den Erklärungsanspruch,

Ziel: „naturgemäße Klassifikationen“ --> physikalischen Konzepte

sind mehr als willkürliche Instrumente

zweites Anliegen: ein konsistentes Bild des Aufbaus physikalischer Theorien zu schaffen

Theorie: formales, auf Mathematik basierendes Schema + Interpretationsprogramm

die Theorie verhält sich wie eine „Gesamtheit“

- Duhem's Rezeption

- seine Arbeit, insbesondere mit seinem 1906 erschienen Buch „La théorie physique, son objet et sa structure“

(„Ziel und Struktur der physikalischen Theorien“, 1908): grundlegend für die moderne Wissenschaftstheorie

- rezipiert als Instrumentalist: physikalische Theorien gesehen nur als Werkzeuge – also in Widerspruch zum Realismus

- allerdings ist seine Diskussion:

– raffinierter als diese Zuordnung (z.B., K.-N. Ihmig; auch die hier vertretene Einstellung)

– ein guter Rahmen für allgemeine Fragestellungen

3. Die physikalische Theorie zwischen Metaphysik und naturgemäßen Klassifikation.

Duhems Hauptargument:

1. In so fern „Erklärung“ Zugang zu einer „letzten Wirklichkeit“ bedeutet, impliziert dies eine metaphysische Setzung – und zwar, nicht hypothetisch sondern absolut (die Welt kann nur so und nicht anders sein).
2. Es gibt keine eindeutige Metaphysik, sondern viele widersprüchliche metaphysische Systeme (zB.: verschiedene Kosmologien, Atomen vs Kontinuum, etc).

Bemerkungen:

1. Erscheinungen führen uns nicht direkt zu „Dingen an sich“.
2. Erscheinungen sind nicht als einzelne eindeutig, treten aber nicht chaotisch auf, sondern stark korreliert.
3. Aus der Korrelationen der Erscheinungen können wir schrittweise „Begründungen“ finden, was einer Ökonomie des Denkens entspricht, denn mit wenigen Annahmen und mit Hilfe analytischer Überlegungen können wir viele Erscheinungen beschreiben. Das machen die Gesetze, Prinzipien, Theorien.
4. Eine Theorie ist nicht nur eine ökonomische Beschreibung sondern ein Erkennen von Korrelationen und Postulieren (Annahme) von Gründen (z.B., die Gravitationskraft) und derer Einbindung in einem strikten Rahmen: NK
5. Der Erfolg einer Theorie (Bestätigungen und **Voraussagen** neuer Erscheinungen) begründet ihr Schema.
6. Eine Metaphysik vorauszusetzen bedeutet ein Vorwegnehmen oder Kurzschluss in diesem Prozess, indem man von postulierten vermuteten Dingen an sich ausgeht und auf deren Basis und damit davon abhängig die Theorien konstruiert.
7. Die Aufstellung einer Theorie kann imetaphysische Annahme implizieren (mit Hypothesenstatus)

Duhems Ansatz:

1. Die einzige Möglichkeit, eine physikalische Theorie selbständig zu definieren ist, sie als mathematisches Schema, dessen Symbole auf physikalischen Größen hindeuten, zu definieren. Als Validation Kriterium gilt (nebst mathematische Konsistenz) nur die Übereinstimmung mit den Phänomenen.

2. Die Theorie erlaubt eine

A: *Ökonomie des Denkens*, die sich in Reduktion in mehrere Schritte ausdrückt (von Beobachtungen zu Gesetze, von Gesetzen zu Theorien; vgl. Cassirer: *Massaussagen, Gesetzaussagen, Prinzipienaussagen, allg. Kausal Gesetz*).

3. Diese Reduktion ist ein fortschreitendes Prozess (in der Entwicklung der Physik).

4. Eine Theorie ist *nicht nur eine ökonomische Darstellung der Gesetze*, sondern auch eine

B: *Klassifikation der Regeln und Gesetze*, wodurch diese als Instrumenten geordnet werden.

5. Eine erfolgreiche Theorie schafft Ordnung und erreicht Vollkommenheit, was in uns die Überzeugung erzeugt, dass eine *naturgemäße Klassifikation* erzielt wurde und keine künstliche Ordnung. Glaube oder Hoffnung!; Pascal, S.31)

6. **Der Ziel einer physikalischen Theorie ist daher**

C: *anstatt Erklärung, eine Naturgemäße Klassifikation was suggeriert, dass die logische Ordnung in der Theorie der Reflex einer ontologischen Ordnung ist.* („Übergeordneter Ziel“ gegenüber 1.)

7. Eine gute Theorie macht Aussagen für noch nicht beobachteten Phänomene (Fresnel, S.34). Das ist eine Bestätigung des Charakters als **naturgemäße Klassifikation**, denn einfache *Ökonomie des Denkens* kann sich nur darauf beziehen, was man beobachtet *hat*.

8. Die Geschichte der Physik zeigt in wesentlichem Kontinuität und Fortschritt, was den *NK*-Charakter bestätigt.

Bemerkungen:

1. Die von Duhem in Argument hineingezogene Kontinuität des physikalischen Fortschritts ist vereinfacht. In wie fern gilt sie, wie sind die falsche Entwicklungen zu bewerten, bezeugen diese eher von Instabilität, oder sind sie in Gegenteil ein Beweis für die Stabilität des Prozesses?
2. Duhem konfrontiert die *Voraussetzung* eines metaphysischen Systems mit dem (schrittweisen) *Erzielen* einer naturgemäße Klassifikation, die *eine ontologische Ordnung reflektieren soll*. Damit bekommen wir also immer bessere Erkenntnisse über diese ontologische Ordnung. Was ist der Status solcher Erkenntnisse?
3. Sind solche "Prinzipien" wie Homogenität des Raumes, Symmetrien, etc als metaphysisch zu verstehen, und sind sie dann nur heuristisch aktiv (wie Duhem behauptet) oder viel tiefer in unserer physikalischen Begriffsbildung verankert (Helmholtz oder Kant)?

Beispiele

A. Zu einer physikalischen Theorie: Klassische Gravitationstheorie.

Grundzüge:

- Postulat (Hypothese) einer universellen Anziehung zwischen massiven Körper (= Gravitationskraft)
- Fernwirkung, quantitatives Gesetz:
$$K = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$
- Paradigmatischer Beispiel: Sonnensystem
- Prinzipien (implizit oder explizit): absoluter Raum, absolute Zeit => Simultaneität, Galileische Relativität:

$$\begin{aligned} x' &= x - v t \\ t' &= t \end{aligned} \quad , \quad \Rightarrow \quad u' = v + u$$

- Bestätigung/Voraussagen: Ellipsen, Jupiter Monde → Lichtgeschwindigkeit, Korrekturen der Bahnen
Abweichungen: Spezielle/Allg. Relativitätstheorie; Dunkle Materie, etc

B: Zum Entwicklungsprozess der Erkenntnis:

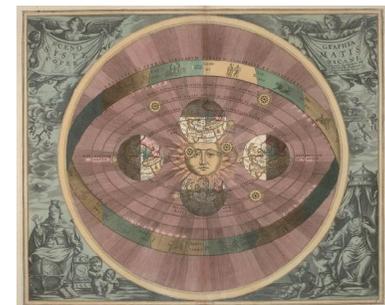
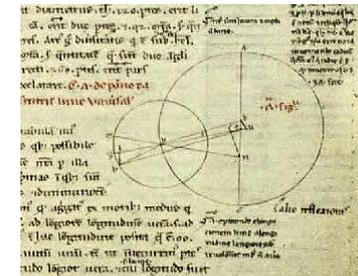
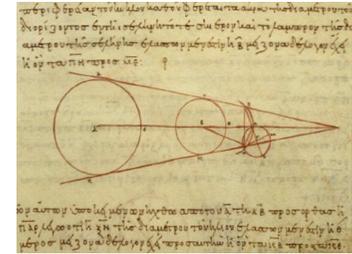
Kopernikanische Revolution – Einstein'sche Revolution

Geschichte:

- Heliozentrische Systeme: Aristarchos (3. Jh. BC), Aryabhata (6. Jh. AD)
- Geozentrische Systeme: dominant seit Antike bis Mittelalter: Ptolemäus (2. Jh. AD)
- Hybrid-Modelle: Tycho Brahe (1546-1601)
- Kopernikus (1473-1543): kinematisches Modell (hat nur Kreise)
- Kepler (1571-1630): kinematische Gesetze, Ellipse, Sonne in Zentrum
- Galilei (1564-1642): freier Fall, Symmetrien, Äquivalenzprinzip
- Newton (1642-1726), Gesetze der Bewegung, Gravitationskraft
- Maxwell (1831-1879), Elektrodynamik
- Einstein (1879-1955), relativitätstheorien

Entscheidend: a) Dynamik b) Entwicklung

- Erst im Kopernikanischen Modell könnte die Dynamik erkannt werden
(universelle Anziehung, Gravitationskraft) (Kraft → Wechselwirkung)
- Auf dieser Basis: Klassische Mechanik, ED, Paradigma der klassischen Physik
- Kinematik: spezielle Relativitätstheorie
- Dynamik: allgemeine Relativitätstheorie
- Keine absolute Raum/Zeit. Kraft als „effektiver Begriff (lokale Wechselwirkung)



4. Die physikalische Theorie zwischen Mathematik und Experiment und der kreative Prozess der Theoriebildung

Die Begründung der theoretischen Physik als mathematische Physik.

1. Die Beschreibung von Naturphänomenen braucht quantitative Eindeutigkeit. Das verlangt das Zugrundelegen eines mathematischen Schemas (Galilei: das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben). Das erfolgt in Zusammenhang und Wechselwirkung mit verschiedenen Schritten, die in der Mathematik stattfinden:

Aus der Physik kommen Anregungen an die Mathematik, die dann eine eigene Dynamik entwickelt; aber fast immer scheint die Physik irgendwann von fast allen mathematischen Ergebnissen Gebrauch zu machen. (Zitat Feynman , Nat. Ges., 73 ff)

2. Die Basis der Mathematisierung ist die richtige Behandlung von Größen, um sie auf reelle Zahlen abzubilden (*Quantitäten, Qualitäten, primäre Qualitäten.*)

3 In der mathematische Physik spielen eine große Rolle:

- Die Idealisierung und Abstraktion
- Die Qualifizierung von Aussagen (z.B., Präzision, Fehlerangaben),
- *Die Behandlung der Frage der mathematischen Konsistenz des theoretischen Schemas.*

Paradebeispiel: Renormierung in QFT. Die Gleichungen der Theorie und die Ausdrücke für messbaren Größen enthalten nicht definierten Operationen (z.B., Produkte von Dirac-Funktionen)

Behandlung: Umdefinition der Berechnungsregeln (Regularisierung, Renormierung der Parametern; sehr erfolgreich – g-2 in QED. Bekommt eine physikalische Basis im Rahmen der Renormierungsgruppe-Theorie (Integration UV Freiheitsgraden). *Wird damit zum Konstruktionsprinzip.*

Die Rolle und die Eigenart des physikalischen Experiments.

1. Das physikalische Experiment bleibt einerseits auf der Ebene der Erscheinungen, andererseits liefert es Stoff für theoretische Bearbeitung und trägt damit zur Erstellung einer „naturgemässen Klassifikation“ bei.
2. Das physikalische Experiment bildet die Basis für den induktiven Prozess der Erstellung experimenteller Gesetze.
3. Das physikalische Experiment impliziert immer einen theoretischen Kontext, und zwar auf zwei Ebenen:
 - a) Das Experiment basiert auf eine Reihe von Vorgänge, die theoretisch begründet sind (Geräte, Voraussetzungen, etc)
 - b) Das Experiment bezieht sich auf Größen und Beziehungen, die von einer Theorie zur Verfügung gestellt werden.

Damit ist, in den Worten Duhem's, ein Experiment nicht nur die Beobachtung einer Tatsache sondern gleichsam ihre theoretische Interpretation.

4. Weil theoretisch „beladen“ ist das physikalische Experiment weniger sicher als eine gewöhnliche Beobachtung, aber präziser und „brauchbarer“. Häufig missverstanden in wissenschaftstheoretische Kreisen.
 - Die Theoriebeladenheit ist mit Beobachtung von Neues verbunden, die Theorie erlaubt die Widersprüche fest zu machen. (Pauli und neutrino; dunkle Materie).
 - Durchführung und Interpretation des Experiments kann sich mit der theoretischen Einsicht ändern)(Michelson-Morley Experiment) – damit neue Erkenntnis!

Der kreative Prozess: die Aufstellung von Hypothesen

Im Prozess der Physik erkennen wir:

- Den analytisch-deduktive Teil des Prozesses mit Hilfe des mathematische Schemas.
- Den synthetisch-induktive Teil des Prozesses: Erkennen von Zusammenhängen aufgrund von Beobachtungent.
- Die eigentliche Aufstellung einer physikalischen Theorie ist ein kreativer Prozess, das durch die *Erstellung und Auswahl von Hypothesen* gekennzeichnet ist. Das geschieht verzahnt mit sowohl dem Experiment als auch der Mathematik.

(Für Karl Popper ist das Bilden und Prüfen von Hypothesen als Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnis; zur Extravaganz geführt: Paul Feyerabend, anything goes).

1. Die Hypothesen müssen widerspruchsfrei sein, und die Gesamtheit der durch mathematische Deduktion daraus gewonnenen Schlussfolgerungen müssen die Gesamtheit der experimentellen Gesetze in guter Näherung darstellen. (Nicht immer!: Kopernikanische Szstem, Bohr Atommodel, Quark Modell; vergleiche auch SRT und SM.)
2. Die Hypothesen sind keine spontane Schöpfungen sondern das Ergebnis einer fortschreitenden Entwicklung. Sie sind keine willkürliche Schöpfungen des Physikers sondern drängen sich ihm auf (SRT).
Komplexer Prozess von Widersprüchen (zu alten Theorien), offenen Vorschlägen, Bestätigungen, Auswahl von alternativen, mathematischer Ausbau, etc statt. Eher „geleitete Suche“ anstatt anything goes, so dass man von einer Aufdrängen der Hypothese in der Tat sprechen kann.
3. Was sich bewähren muss und daher geprüft werden kann ist nicht eine einzelne Hypothese sondern derer Gesamtheit einmal sie zu einer Theorie ausgebaut wurden (Duhem-Quine These).

5. Diskussion der Entstehung und des Etablierens des Standards Modell der Elementarteilchen

(Speziell-)relativistische Quantentheorie. Grundlage: Quantenfelder, die als Teilchen auftreten können. Diese können wir in Detektoren beobachten, direkt durch Dekohärenzeffekte (Spuren) oder indirekt durch ihren Einfluss auf andere Prozesse.

Vorbemerkungen:

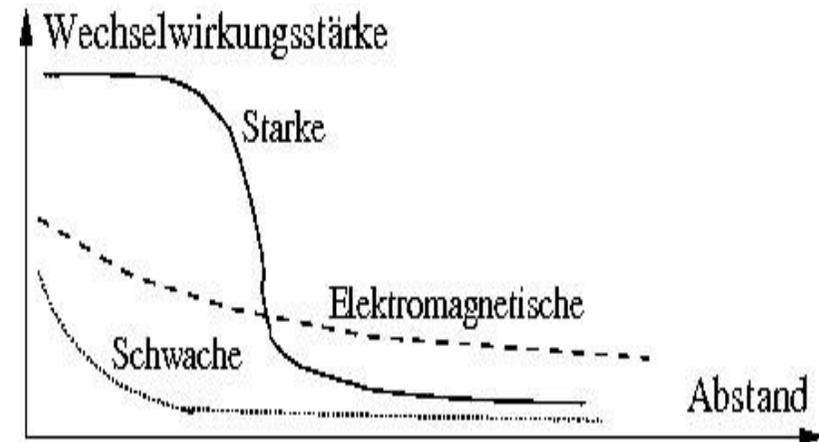
Mit dem SM der Kosmologie verbunden

Konstruktionsprinzipien:

Lokale Wechselwirkung

Symmetrien (RZ, innere)

Renormierbarkeit



Fasst zusammen 3 der 4 bekannten Wechselwirkungen:

elektromagnetische: Merkmale: hält die Atome zusammen.
Langreichweitig, anziehend/abstoßend.
Mittelstark, proportional mit dem Produkt der Ladungen.

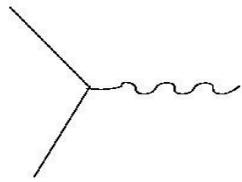
starke: Merkmale: bildet die Kernteilchen und hält die Kerne zusammen, bewirkt Teilchen-Transmutationen.
Kurzreichweitig zwischen den beobachtbaren Teilchen, führt aber zum *Confinement* der Konstituenten innerhalb der Teilchen. Sehr stark.

schwache: Merkmale: wirkt in Teilchen-Transmutationen mit und in den Kernen.
Kurzreichweitig. Schwach.

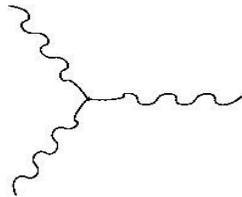
Beschreibung der Wechselwirkungen und Analyse von Prozessen

Materiefelder und „Kräfte“-Felder (Vermittler der Wechselwirkungen) als Bausteine

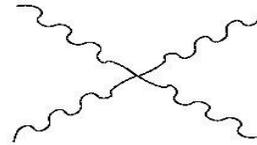
Lokale Wechselwirkungen als ein Konstruktionsprinzip



$$f(x).A(x).f(x)$$

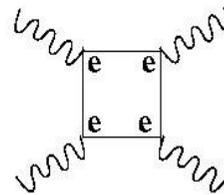
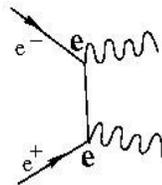
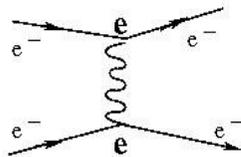
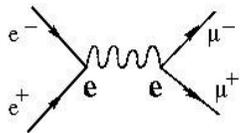


$$A(x).A(x).A(x)$$



$$A(x).A(x).A(x).A(x)$$

Beispiele von QED Prozessen:



Diese Beispiele von Graphen beschreiben:

- Elektron-Positron Annihilation mit Erzeugung eines Muon-Antimuon Paares via eines virtuellen Photons;
- Einen Beitrag zum Elektron-Elektron Coulomb Abstoßung durch Vermittlung (Austausch) eines virtuellen Photons;
- Die Elektron-Positron-Annihilation in 2 Photonen mit Hilfe (Austausch) eines virtuellen Elektrons ;
- Die Photon-Photon-Streuung, die durch virtuelle Elektronen ermöglicht wird.

Die graphische Darstellung entspricht präzisen Rechenvorschriften.

Symmetrien als Konstruktionsprinzip

Wir können durchführen

$$\begin{array}{ll} \text{R-Z Transformationen (Verschiebungen, Drehungen, etc) :} & v(\mathbf{x}) \rightarrow \mathbf{R} \cdot v(\mathbf{x}) \\ \text{Transformationen in einem inneren Raum (z.B., Phase) :} & f(\mathbf{x}) \rightarrow \exp(i \cdot a) \cdot f(\mathbf{x}) \end{array}$$

Symmetrien liegen vor, wenn Wechselwirkungen invariant unter eine oder andere Symmetrietransformation sind

Aus Symmetrien ergeben sich Erhaltungssätze

Als Folge der Raum-Zeitlichen Symmetrien, einschließlich Spezieller Relativität:

- Energieerhaltung:* Die Gesamtenergie, die Summe aller an einem Prozess teilnehmenden Energien (Kinetische- oder Bewegungsenergie, Potential- oder Lageenergie, Bindungsenergie, Ruheenergie: $m_0 c^2$) ist erhalten.
- Impulserhaltung:* Der Gesamtimpuls ist erhalten.
- Drehimpulserhaltung:* Der Gesamtdrehimpuls ist erhalten.
- Spinerhaltung:* Der Gesamtspin ist erhalten.

Als Folge weiterer Symmetrien der Quanten Theorien:

- Ladungserhaltung:* Die Summe der Ladungen (mit ihren Vorzeichen) ist erhalten.
- Baryonenzahlerhaltung:* Anzahl der Baryonen minus Anzahl der Antibaryonen ist erhalten.
- Leptonenzahlerhaltung:* Anzahl der Leptonen minus Anzahl der Antileptonen ist erhalten.

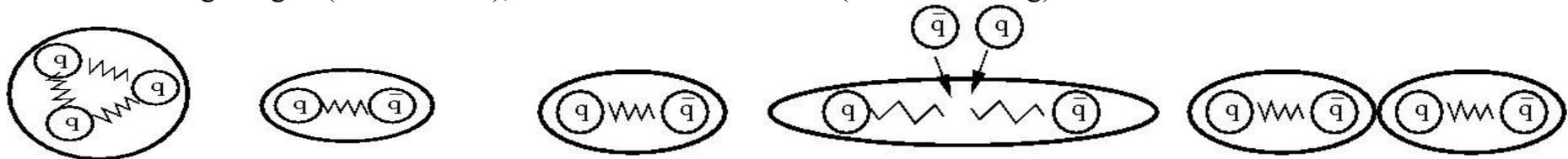
Speziell in SM im Konstruktionsschema eingebunden: *lokale Eichsymmetrien*

Theoretisches Schema des SM

Tabelle 1: die "gängige" Teilchen

Teilchen	Baryon- enzahl	Lepton- enzahl	Ladung	Spin	Masse	Typ	Wechsel- wirkung
p Proton	1	0	1	1/2	1,007276 u	Hadron	alle
n Neutron	1	0	0	1/2	1,008665 u	Hadron	alle
e^- Elektron	0	1	-1	1/2	0,000549 u	Lepton	El., Schw.
ν_e Neutrino	0	1	0	1/2	~ 0	Lepton	Schwache
γ Photon	0	0	0	1	0	Vermittler	Electr.

Die Hadronen sind nicht elementar (strukturlos) sondern aus 2 oder 3 elementare Felder (Quarks) zusammengesetzt. Die letztere bleiben gefangen (confinement), ihr Nachweis ist indirekt (durch Streuung)



Das SM beschreibt die Zusammensetzung der Hadronen und alle Prozesse mit Hadronen und Leptonen.

Symmetrieschema des SM (lokale Eichsymmetrien):

SU(3)

starke Ww (Teiltheorie QCD)

x SU(2) x U(1)

schwache und e-m Ww

Tabelle 2: Die Elementarteilchen (Materiefelder) der 1. Familie

<i>Elem. Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Baryonen-zahl B</i>	<i>Leptonen-zahl L_e</i>	<i>Spin</i>	<i>Ladung Q</i>	<i>Masse</i>
u \bar{u}	Up-Quark -Antiquark	$\pm \frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{2}$	$\pm \frac{2}{3}$	1 - 4 MeV/c^2
d \bar{d}	Down -Quark -Antiquark	$\pm \frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{2}$	$\mp \frac{1}{3}$	3 - 8 MeV/c^2
e^- e^+	Elektron Positron	0	+1 -1	$\frac{1}{2}$	-1 +1	0.5 MeV/c^2
ν_e $\bar{\nu}_e$	Neutrino Antineutrिन.	0	+1 -1	$\frac{1}{2}$	0 0	< 3 ev/c^2

Tabelle 3: Die 3 Familien (mit entsprechenden Antiteilchen)

<i>Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Masse</i>	<i>Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Masse</i>	<i>Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Masse</i>
u	Up	1 - 4 MeV/c^2	c	Charm	1-1,5 GeV/c^2	t	Top	170-180 GeV/c^2
d	Down	3 - 8 MeV/c^2	s	Strange	80 - 150 MeV/c^2	b	Bottom	4-4,5 GeV/c^2
e	Electron	0.5 MeV/c^2	μ	muon	106 MeV/c^2	τ	tau	1,77 GeV/c^2
ν_e	e -Neutrino	< 3 ev/c^2	ν_μ	μ -Neutrino	< 190 ev/c^2	ν_τ	τ -Neutrino	< 18 MeV/c^2

Zusammengesetzte Teilchen (Hadronen):

$$p = uud, \quad n = udd, \quad \bar{p} = \bar{u} \bar{u} \bar{d} \quad (\text{Baryonen}), \quad \pi^+ = u \bar{d}, \quad \pi^0 = u \bar{u} + d \bar{d} \quad (\text{Mesonen})$$

Tabelle 4: Die Vermittler-Teilchen

<i>Teilchen</i>	<i>Name</i>	<i>Spin</i>	<i>Ladung</i>	<i>Masse</i>	<i>Wechselwirk.</i>
γ	Photon	1	0	0	Electromg.
W^{\pm}	W-Boson	1	± 1	$80 \text{ GeV}/c^2$	El.-Schwach
Z	Z-Boson	1	0	$91 \text{ GeV}/c^2$	Schwach
G	Gluon	1	0	0	Stark

Dazu ein besonderes Teilchen: Das Higgs Meson

gebraucht, um ein zusammenhängendes Schema zu sichern (Symmetrien und Renormierung)

erlaubt die Erzeugung von Massen aller anderen Teilchen (durch entsprechenden Kopplungen = freie Parameter)

gehört zum $SU(2) \times U(1)$ Teil, hat 4 Komponente (2 komplexe Zahlen),

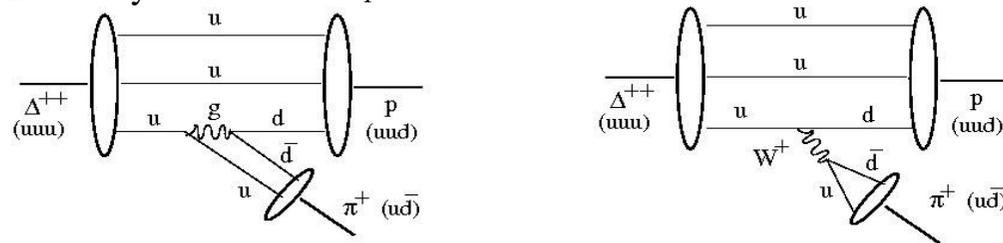
davon 3 eingebunden in der Umgestaltung der Wechselwirkung,

eine Komponente ist beobachtbar : Masse 126 GeV

Die Vermittlerfelder erlauben der Materiefelder zu wechselwirken : $e(x).A(x).e(x)$

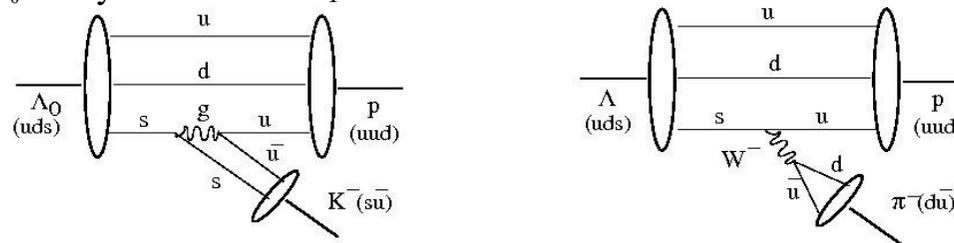
Hadronische Prozesse werden auf Quark Wechselwirkungen zurückgeführt:

Beispiel 1, der Zerfall eines Δ^{++} Baryons in einem p und einem π^+ -Meson:



Das erste Diagramm beschreibt einen starken Prozess (von einem Gluon vermittelt), der sehr schnell verläuft (10^{-23} sec). Im Prinzip könnte der Prozess auch nach dem zweiten Diagramm laufen (Quarkumwandlung durch W^+ Boson), dieser ist aber ein schwacher, unvergleichbar langsamer Prozess, der nicht mehr zum Tragen kommt (typische Zeitspanne $10^{-8} - 10^{-12} \text{ sec}$, besonderes Fall: Neutron Zerfall, Lebensdauer 10^3 sec , wegen der kleinen $n-p$ Massendifferenz).

Beispiel 2, das Zerfall eines Λ_0 Baryons in einem p und einem Meson:



Hier kann der starke Prozess (linkes Diagramm) wegen Energie-Impuls-Erhaltung nicht stattfinden, weil das leichteste Meson mit einem „strange“ Quark, das K Meson ($493,7 \text{ MeV}/c^2$) zu schwer ist (die Masse des Λ_0 Baryons, $1115,6 \text{ MeV}/c^2$, ist kleiner als die Summe der Massen von p und K). Jetzt kommt der schwache Prozess (rechtes Diagramm) zum tragen (10^{-10} sec).

Geschichte der Entstehung seit Mitte der 20. Jh. (aber mit schon früherer Vorgeschichte)

2 parallele Entwicklungen

Starke Wechselwirkungen (QCD)

Elektro-Schwache Wechselwirkungen (E-W Modell)

(beide *phänomenologisch* schon gewissermaßen bekannt und modelliert:

viele bekannte Teilchen mit ihren Eigenschaften – Masse, Ladung, weitere Quantenzahlen aus Erhaltungssätzen,

pion-Austausch-Modell für Kernkräfte – Yukawa - ,

Fermi-Modell für schwache Wechselwirkungen,

die sehr erfolgreiche quantenfeldtheoretische Theorie der QED für die elektromagnetische Wechselwirkungen)

Quark modell (Gell-Mann, Nee-mann, Zweig 1960-64)

1. Vereinigung von e-m und schw. Ww (Glashow 1960)

SU(3) flavour Symmetrie (nicht lokal, keine Dynamik)

nicht renormierbar

Entdeckung ungewöhnlicher Baryonen (Δ^{++})

Heranziehen nicht-abelschen, lokalen Eichgruppen

Struminsky, Han, Nambu Vorschlag (spätere Quarksfarbe) (1965)

Higgs Mechanismus (Higgs, Kibble, ... 1963)

Partonen (Feynman, Bjorken 1969)

Renormierbarkeit des Higgs Modells ('t Hooft.. 1972)

Heranziehen nicht-abelschen, lokalen Eichgruppen

E-W Modell (Vereinigung: Weinberg, Salam 1967)

asymptotische Freiheit (Politzer, Gross, Wilczek, 1973), QCD

Entdeckung neutraler Ströme (CERN 1973)

Nachweis von starken Eichbosonen durch Jets (Petra-Desy, 1979)

Beobachtung von e-w Eichbosonen (CERN, 1983)

Voraussage, dann Nachweis von neuem Materiezustand:

LEP

Quark-Gluon Plasma (ab 2006, CERN, BNL)

LHC Nachweis des Higgs Meson (CERN 2012)

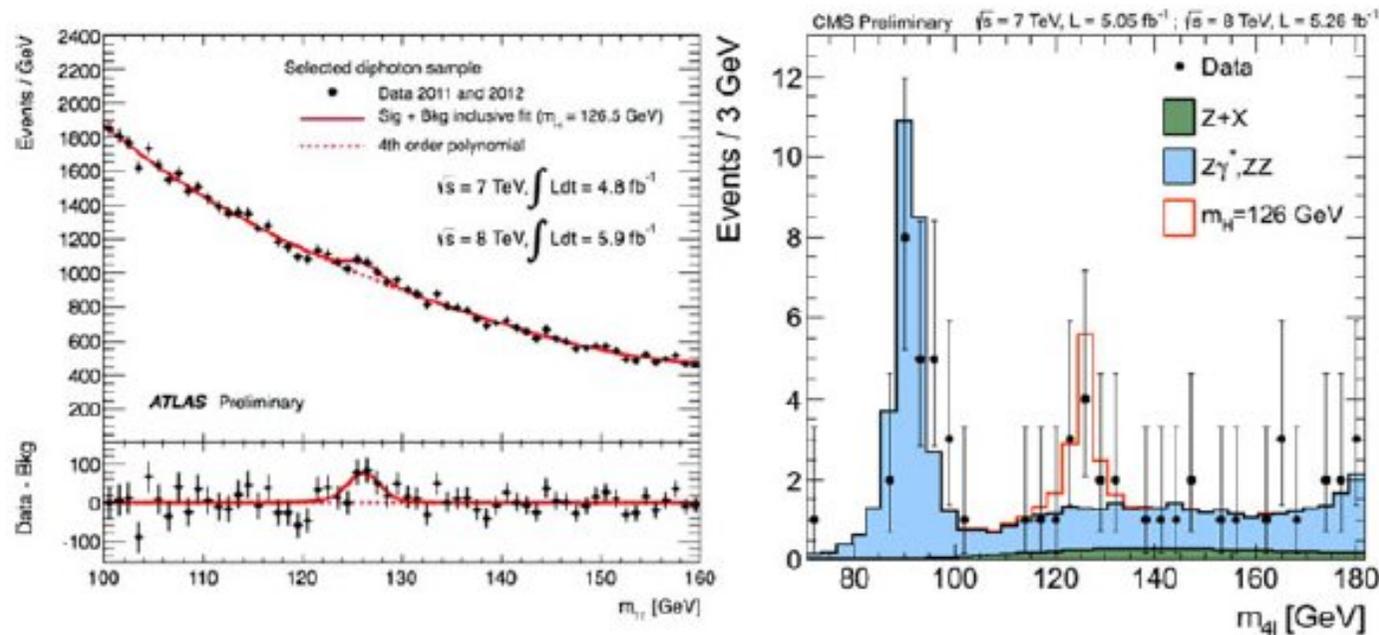


Abb. 14.11 Die ersten experimentell demonstrierten Spuren eines neuen Teilchens, das das Higgs-Boson H sein könnte, Stand 04.07.2012 (vorläufige Auswertung). *Links:* Die Zahl der beobachteten Paare von Photonen, die zum Zerfall eines H passen würden, in Abhängigkeit von ihrer invarianten Masse $m_{\gamma\gamma}c^2$ (d. h. der (Ruhe-)Masse des Objekts, das beim Zerfall dieses Photonenpaar erzeugt haben kann). Über einem glatten Untergrund zeigt sich bei 125,6 GeV schwach erkennbar ein Peak, der als Nachweis eines neuen Teilchens gilt. Daten des ATLAS-Detektors [49]. *Rechts:* Zahl der beobachteten Quartette von geladenen Leptonen, in Abhängigkeit von ihrer invarianten Masse $m_{4l}c^2$ (d. h. der (Ruhe-)Masse des Objekts, das beim Zerfall diese vier Leptonen erzeugt haben kann). Der starke blaue Peak ist ein Störsignal, verursacht von dem gleichzeitigen Zerfall zweier Z^0 -Bosonen, die ohne Mitwirkung des Higgs entstanden sein können, in je zwei Leptonen. Bei 126 GeV zeigen die Daten eine deutliche Erhöhung gegenüber dem glatten Untergrund, die als Nachweis eines neuen Teilchens gilt. Daten des CMS-Detektors [50]

Zusammenfassung:

- + Das SM erlaubt die Beschreibung aller Teilchen-Prozesse, einschliesslich der Zusammensetzung der Materie, und nicht nur als Denkökonomie sondern als NK. Es sagt voraus neue Erfahrungen.
- + Bestätigt die wichtige Konstruktionsprinzipien: Quantenfelder, lokale Eichsymmetrie, Renormierung (die Hypothesen einer Theorie werden durch den Erfolg der Theorie bestätigt)
- + Ist sehr fruchtbar, erlaubt die Vereinigung mit der Kosmologie, erlaubt die Hypothese weiterer Vereinigungen

- Hat sehr viele, nur empirisch bestimmbare, freie Parameter
- Entspricht nur einer partiellen Vereinigung
- Gibt kein Hinweis für die Einbindung der Gravitation

NB: wie jede Theorie entspricht das SM einem „abgeschlossenen konzeptuellen Schema“ (Heisenberg)

Meisten Zusammenhänge kann man nicht antasten

Einige Aspekte können geändert werden,

als weitere Spezifizierung (z.B. zusammengesetzte Higgs Bosonen),

als Erweiterung (in Richtung GUT – beyond the SM)

Die Geschichte der Entwicklung des SM als Beispiel für Theorieentwicklung, Hypothesenbildung, Kontinuität, ...

- Zeigt die enge Wechselwirkung theoretischer und empirischer Vorgänge,
 - Experimente erzeugen Neues (muon, Antiteilchen,..), antworten Fragen (Massen), prüfen nach (Higgs), ..
- Zeigt die Rolle „metaphysischer“ *Annahmen* als Konstruktionsprinzipien (Symmetrie, lokale Ww)
- Bestätigt eine bestimmte Art von Kontinuität, in der Altes in der Aufstellung eines konzeptuellen Schermas wirkt, als auch in der Aufstellung von Zwischenmodelle (Bag model), was Hinweise, wo man das Neue suchen muss, gibt.
 - Ausgehend von der SRT und der QM werden erste Versuche, sie zu vereinigen (Dirac, Antiteilchen)
 - Eine erste Vereinigungsversuch wird durch eine hybride, nicht Widerspruchsfreie Theorie (RQM) erzielt (was Hinweise gibt, wo man weiter suchen muss)
 - Ein erster (wichtiger) Erfolg wird in der QED erzielt, was ab jetzt Richtlinien gibt
 - In parallel werden Elektro-Schwache und Starke Wechselwirkungen angegangen, wobei erneuert nicht-widerspruchsfreie Modelle als forerunner, sowohl was die lokale Wechselwirkungsprinzip, als auch die Symmetrieprinzipien betrifft (4-Fermi Wechselwirkung, Quark Modell, Partonen ...)
 - Recheninstrumente aus der QED (Feynman Diagramme), Renormierung
 - Kontakt mit Statistischer Mechanik, suggeriert durch Symmetrieeigenschaften (lokale Symmetrien, Eichsymmetrien, Symmetriebrechung)
 - Neue Rechenmethoden (Gittertheorien), neue Perspektive auf Renormierung
- Verstärkt die Idee der Vereinigung als regulatives Prinzip
- nicht zuletzt: zeigt, dass breite, gemeinsame Arbeit erfolgreich sein kann, *auch in der Aufstellung einer neuen Theorie*

Literatur

J. Bleck-Neuhaus Elementare Teilchen, Springer 2013

U. Ellwanger Vom Universum zu den Elementarteilchen, Springer 2011