

Die erste Hälfte des 20. Jh.: die moderne Physik

Max Planck

Albert Einstein

Ernest Rutherford

Niels Bohr

Louis de Broglie

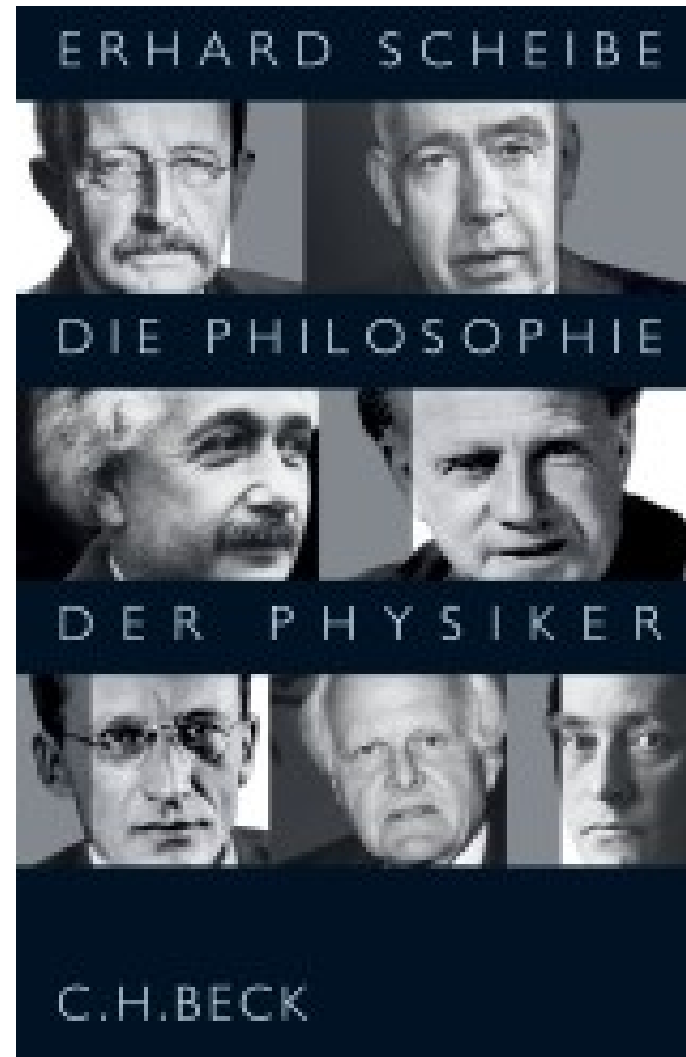
Werner Heisenberg

Wolfgang Pauli

Aufbau der Materie

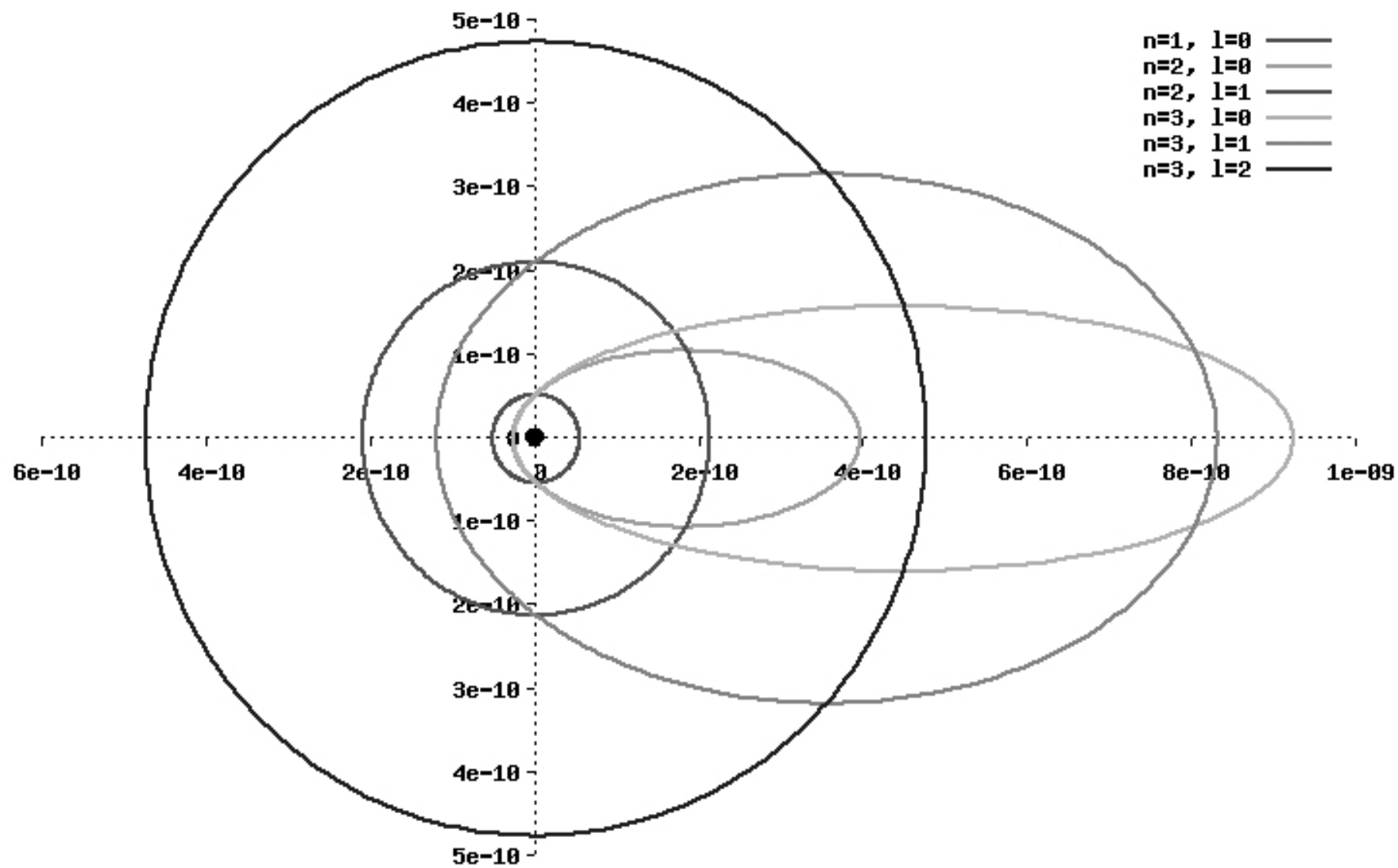
Teilchenphysik

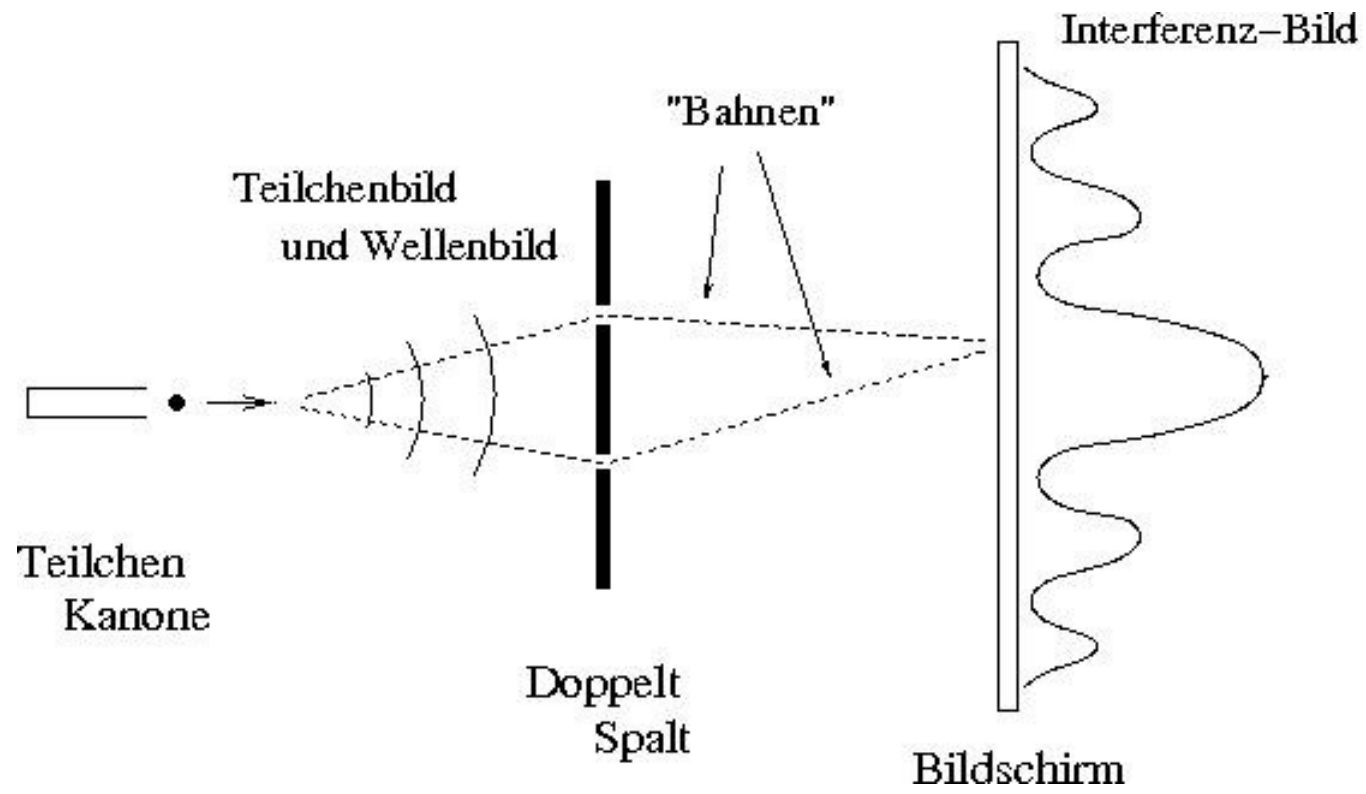
Physik von Raum-Zeit

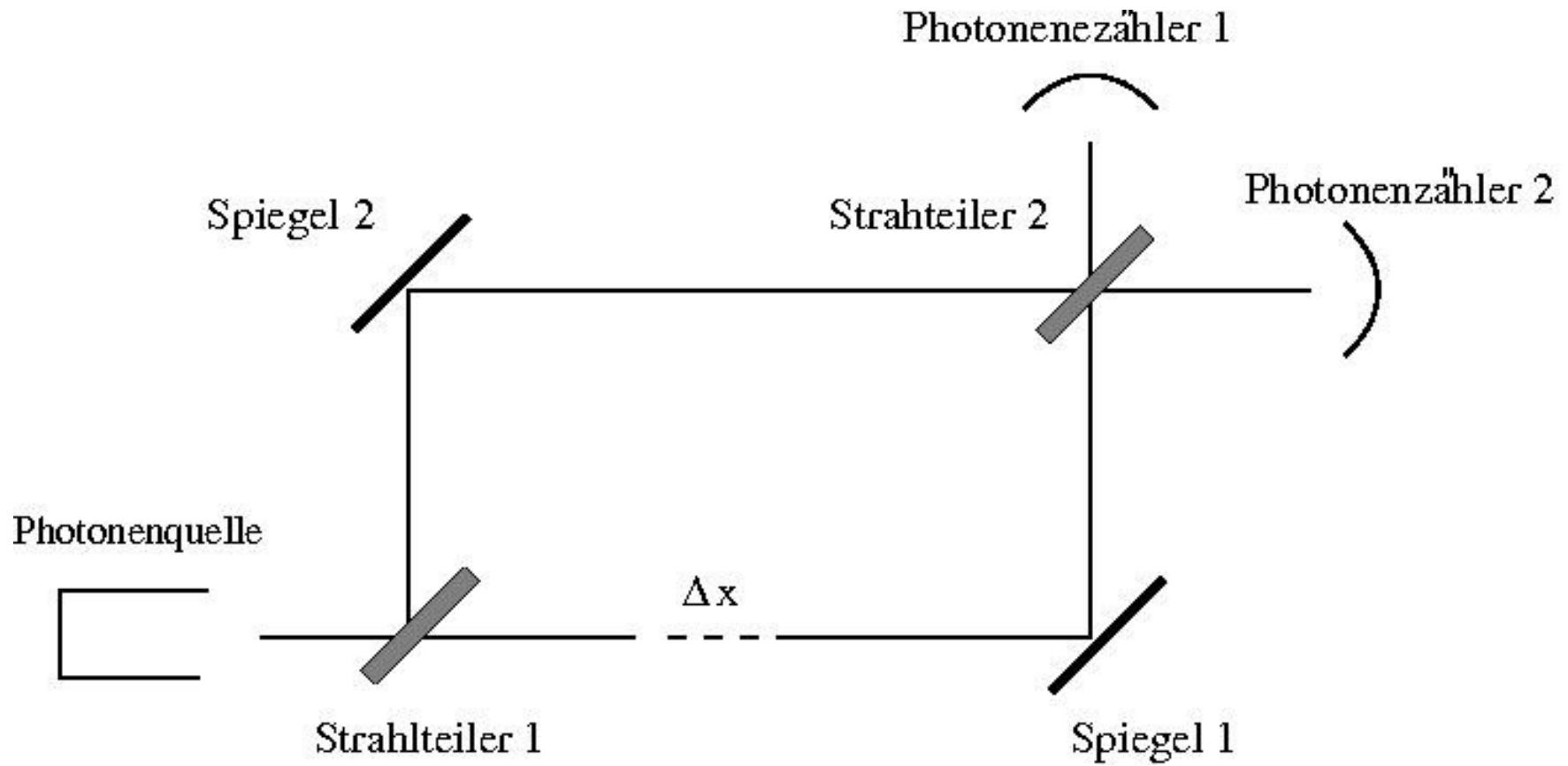


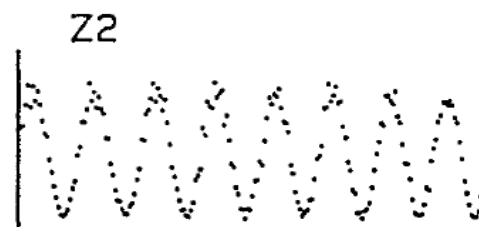
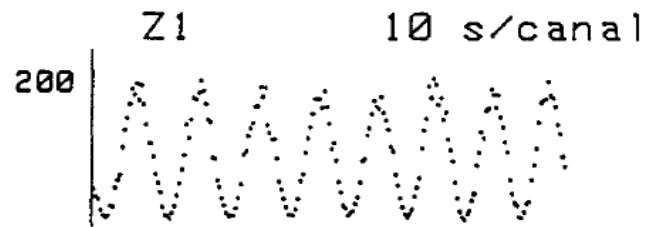
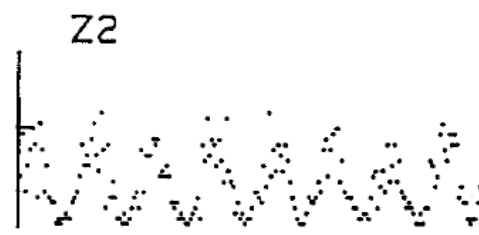
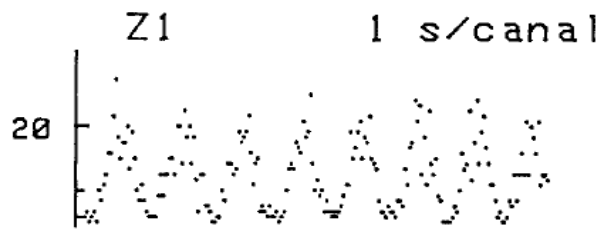
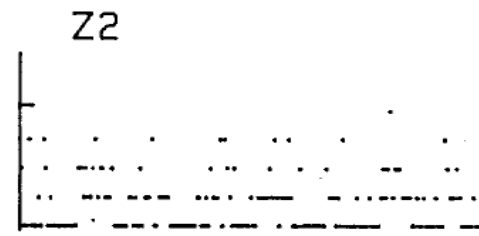
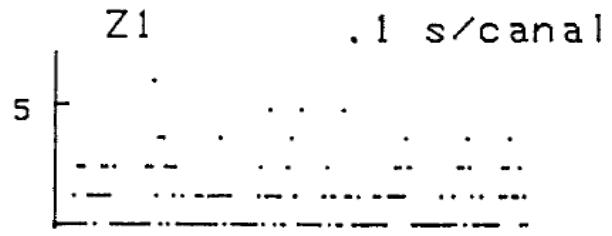
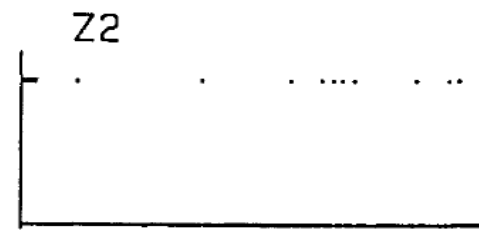
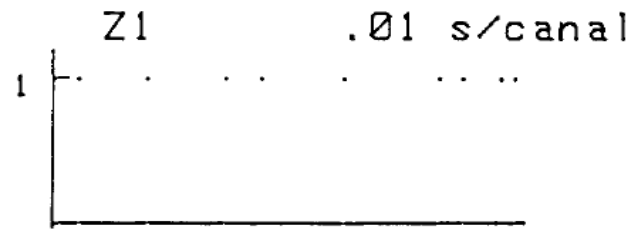
Quanten Mechanik:

- aus der Dualismus der kl. Physik (Teilchen-Phänomene *oder* Wellen-Phänomene)
 - dualistische Beschreibung desselben Phänomen (Teilchen *und* Wellen)
- löst die Probleme der kl. Physik
- Planck 1900: h , (Lösung der UV Katastrophe)
- Einstein 1905: Erklärung des Photoeffekts ($E = h \cdot f = c \cdot p \Rightarrow \lambda = h / p$)
- Einstein 1909: Duales Modell für Licht
- Bohr 1913: Atommodell (Stabilität der Materie – Rutherford Modell 1911;
empirische Formeln: Balmer -1885-, Lyman, Paschen). Noch keine Theorie: ad hoc Postulate
- Compton Effekt 1922
- de Broglie 1923 – Materiewellen ($p = h \cdot f / c = h / \lambda \Rightarrow \lambda = h / p$, nachgewiesen an Elektronen 1930)
- Heisenberg 1925: Operatoren
- Schrödinger 1926: Wellenfunktion, Gleichung
- Festigung als Theorie: 1920-1930, v. Neumann 1930
- Interpretationsvorschlag: Kopenhagener Deutung
- Kontroverse: EPR (1935), Schrödingers Katze (1935), Wigners Freund
- Bell, Everett, Decoherence ...









Formalism

Komplexe Zahlen, Operatoren Zustand – klassisch/quanten

QM-Axiomen

- I. Zustandsraum: Hilbert Raum (komplexe Zahlen, Metrik, Superpositionsprinzip, Konvergenz)
- II. Observablen, Operatoren, Kompatibilität; Unbestimmtheitsrelationen
- III. Mittelwerte und Wahrscheinlichkeiten (Born: statistische Interpretation)
- IV. Zeit-Entwicklung: Schrödinger Gl., Hamilton Operator
- V. Messprozess, Kollaps der W.F.

Neue Effekte (ggü klassischer Physik):

- Atomen-Spektren
- Interferenz
- Unbestimmtheit
- Tunnel-Effekt
- Verschränkung

Formulierungen und Zugänge:

Schrödinger und Heisenberg „Bilder“

Algebraische Formulierung

Pfad-Integral Formulierung

Interpretationen:

Kopenhagener Deutung

Statistische Deutung

Relative states (Everett) → many worlds, consistent histories ...

Alternativen: Bohm'sche Mechanik, Spontaner Kollaps

Die „neue“ Diskussion und weitere Anwendungen.

Bell-sche Ungleichungen und Ausschluss lokaler realistischer Interpretationen

Dekohärenz und Zugang zur klassischen Physik

Quanteninformation

Relativitätstheorien: Einstein

SRT (1905) Beruht auf:

Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit

Unabhängigkeit von Bezugssystem

→ Invariante Abstand → Lorentztransformationen

Vorangegangene Forschung: Lorentz, Poincaré; Michelson

Bestandteil der modernen QFT: SM

ART (1916) Beruht auf:

Äquivalenzprinzip

Raum und Zeit als Kontinuum

Moderne kosmologische Modelle

Gravitationswellen (Beobachtung 2015)

Die „Einsteinsche Revolution“: Neue Verständnis von R-Z, wodurch sich das ganze „Puzzle“ (Nicht-galileische Invarianz der ED, Lorentz-Kontraktion, Michelson, etc.) in einem Gesamtschema löst.

Das Standard Modell (Elementarteilchen und Kosmologie) und die gegenwärtige Physik

Relativistische Quantenfeldtheorien

Lokale Wechselwirkungen

Teilchenphysik: ab etwa 1930,

neue Werkzeuge (Wilson Kammer, Beschleuniger)

geladene Teilchen – und dann kam das Neutrino (Pauli 1930, exp. 1956) ...

QED (Feynman, Schwinger, Bethe, Dyson, Tomonaga, Dirac, ...) : *die* Quantenfeldtheorie

P.Th. , Renormierung

Experimentelle Bestätigung

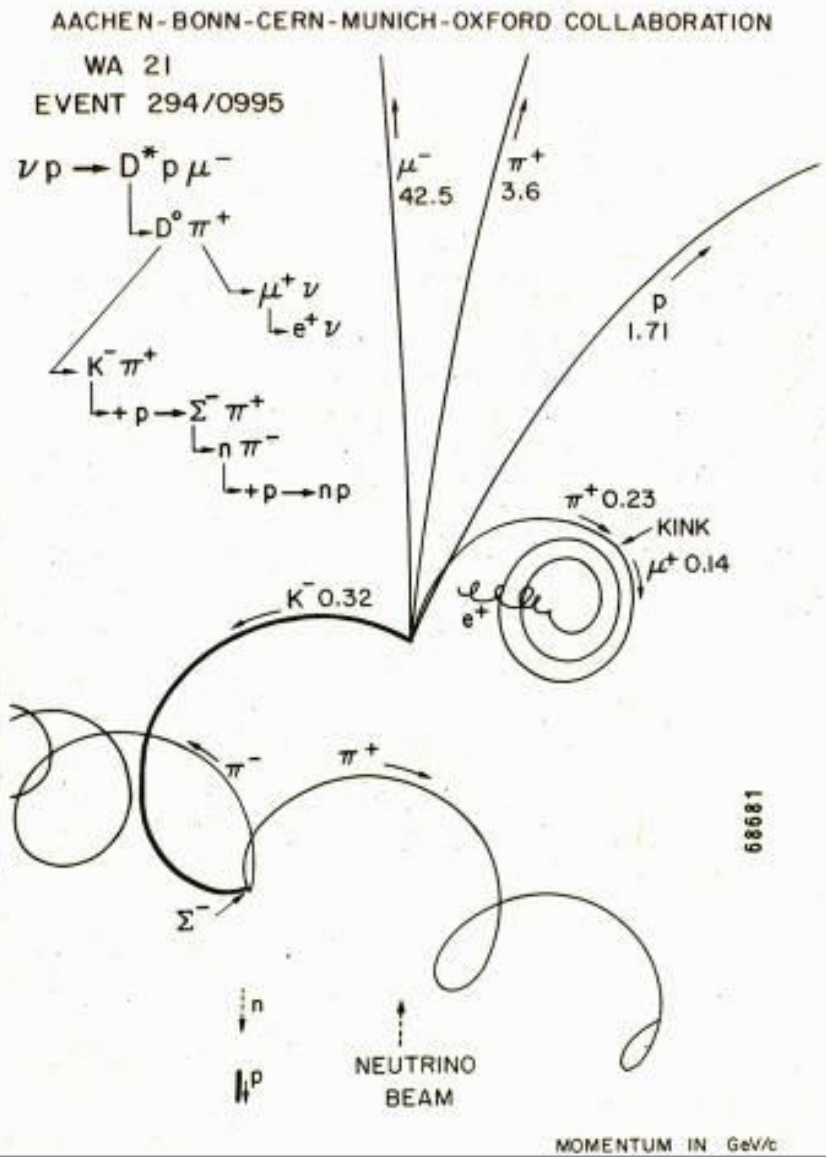
Starke Wechselwirkungen

Versuchte Anlehnung an der QED

Kern-Kräfte, Teilchenaustausch

Streuung-Experimente, Partonen, Quarks, ...





SM: Zwei parallele Entwicklungen

Starke Wechselwirkungen (QCD)

(beide phänomenologisch schon gewissermaßen bekannt und modelliert: viele bekannte Teilchen mit ihren Eigenschaften – Masse, Ladung, weitere Quantenzahlen als Folge von Auswahlregeln, pion-Austausch-Modell für Kernkräfte – Yukawa - , Fermi-Modell für schwache Wechselwirkungen, die sehr erfolgreiche Quantenfeldtheorie der QED für die elektromagnetische Wechselwirkungen)

Elektro-Schwache Wechselwirkungen

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

QED (Feynman, Schwinger, ... ~1950's)

Entdeckung ungewöhnlicher Baryonen (Δ^{++})

1. Vereinigung von el. und schw. Ww (Glashow 1960)

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

Higgs Mechanismus (Higgs, ... 1963)

Partonen (Feynman, Bjorken 1969)

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

Heranziehen nicht-abelschen Eichgruppen

asymptotische Freiheit (Politzer, Gross, Wilczek, 1973)

E-W Model (Weinberg, Salam 1967)

Confinement, nichtperturbative Renormirerung (Wilson 1974)

Entdeckung neutraler Ströme (CERN 1973)

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

Beobachtung von e-w Eichbosonen (CERN, 1983)

Higgs- Boson Nachweis: CERN 2012

8. Das Standardmodell der Elementarteilchen:

Das Standardmodell fasst unsere Erkenntnisse über die Elementarteilchen in einer Reihe von Quantenfeldtheorien zusammen, die teilweise vereint sind (miteinander *verstrickt*). Das Standardmodell beschreibt wie die üblichen, uns bekannten Teilchen gebildet sind.

Strikt elementar (“strukturlos”) sind im Standard Modell:

- die *Quarks*,
- die *Leptonen*,
- das *Photon* und die anderen Vermittler der Wechselwirkungen.

Die *Vermittlerfelder(-teilchen)* für die im Modell vertretenen Wechselwirkungen sind:

- die “*Gluonen*” für die *Starke Wechselwirkung*,
- die W^\pm und Z *Bosonen* für die *Schwache Wechselwirkung*,
- das *Photon* γ für die *Elektromagnetische Wechselwirkung*.

Die *Materiefelder* sind *Quarks* und *Leptonen*. Sie treten in 3 “Familien” (“Generationen”) auf.

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

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

Tabelle 3: Die 3 Familien (mit entsprechenden Antiteilchen)

Teilchen	Name	Masse	Teilchen	Name	Masse	Teilchen	Name	Masse
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

Züge der Entwicklung

Mathematik

„...denn Mathematik ist eben nicht allein eine andere Sprache, Mathematik ist eine Sprache plus Schlussfolgerungen; sie ist gleichsam eine Sprache plus Logik. ... Sie ist eine gewaltige Sammlung logischer Denkstrukturen. Mit ihrer Hilfe kann man eine Aussage in Beziehung zu einer anderen setzen.“¹

Hypothesenbildung, „Feynman's tight jacket“

“Die ganze Frage der wissenschaftlichen Vorstellung ist, dass was auch immer wir uns in der Wissenschaft vorstellen dürfen mit allem anderen, was wir kennen konsistent sein muss; dass die elektrische Felder und Wellen von denen wir sprechen nicht irgend welche glücklichen Gedanken sind, ... sondern Ideen, die mit allen uns bekannten physikalischen Gesetze zusammenstimmen müssen, ... unsere Gedanken sind in ein striktes Netzwerk gebunden ... ”

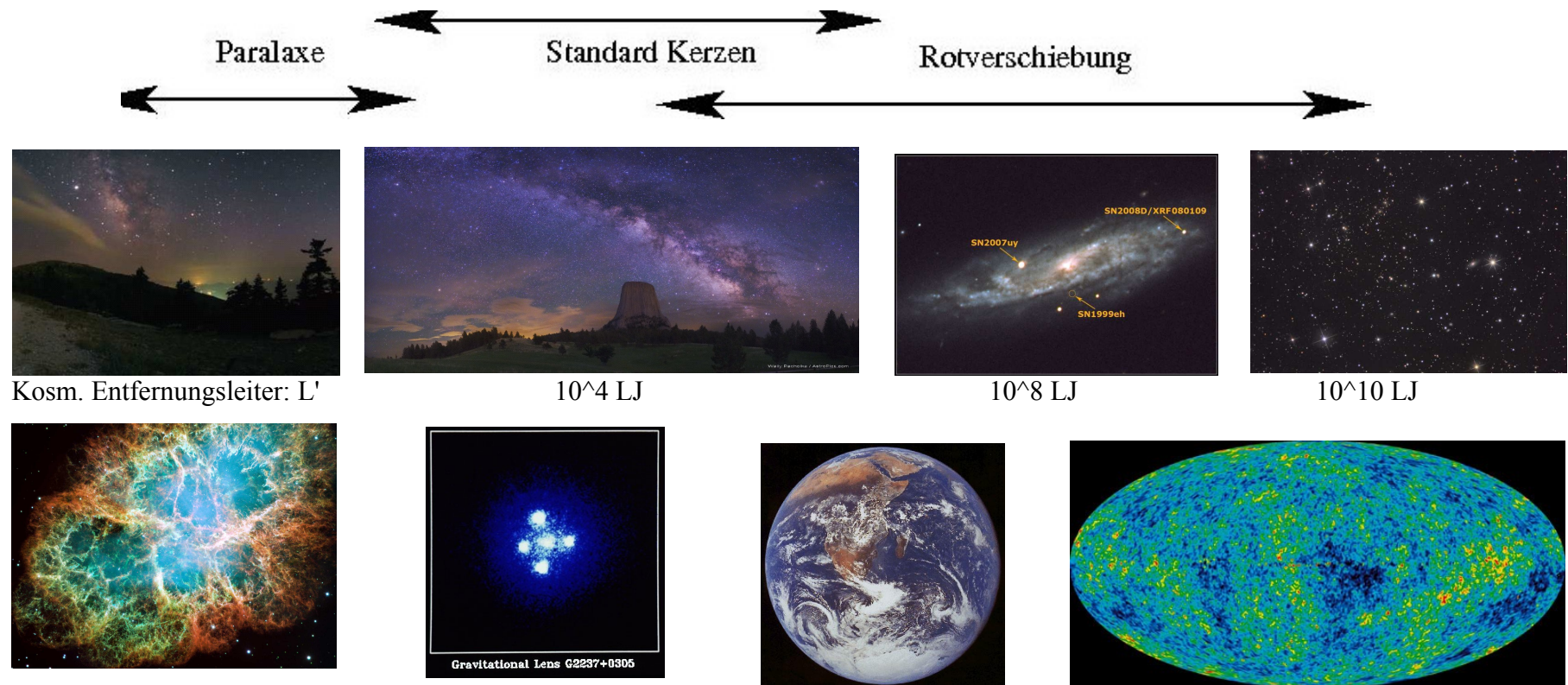
Kontinuität und Fortschritt, Das Neue und das Wiederfinden des Alten, z.B. Dekohärenz (siehe Bild)

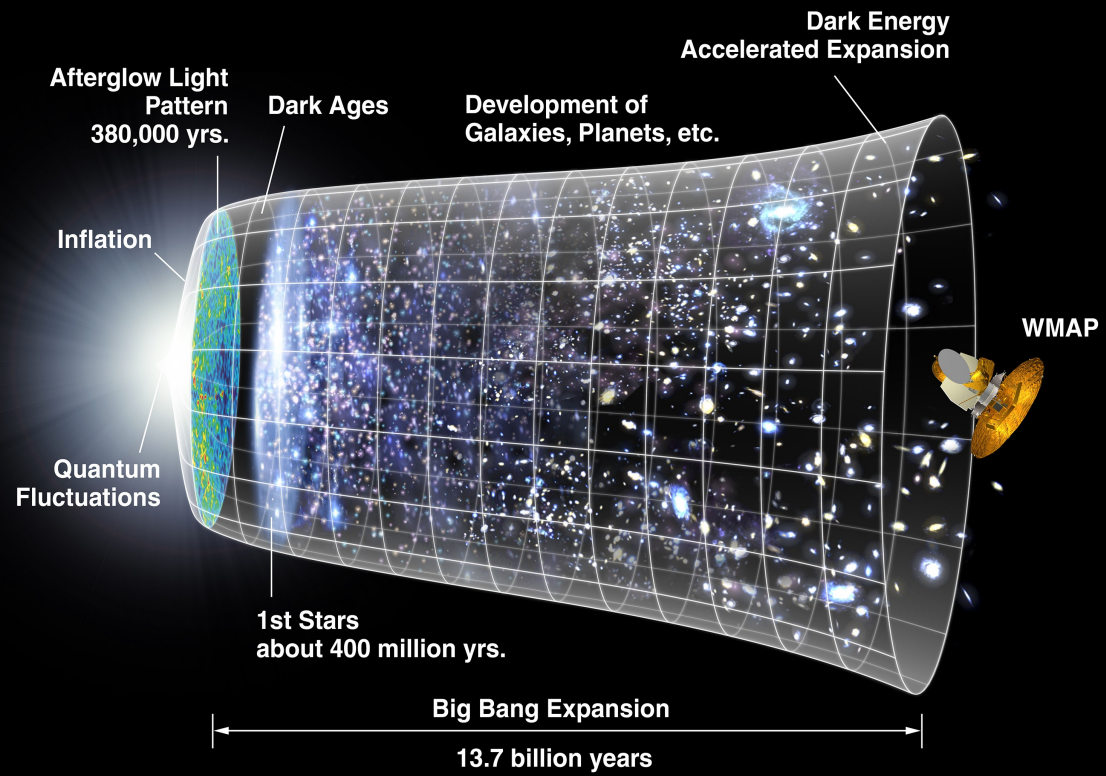
Reduktion und Vereinheitlichung, theoretisch und empirisch, SM (Elementarteilchen und Kosmologie)

¹ R. Feynman (1990), S. 73.

Das Standardmodell der Kosmologie

Neue Definition des Experiments und der Messung, „Quanten -klassische „friedliche Koexistenz“: QFT(SRT) und ART





NASA/WMAP Science Team

Charakter der heutigen Physik

Skalenvereinigung, von Mikro to Makro-Kosmos

das Standardmodell der fundamentalen Wechselwirkungen,

das Standardmodell der Kosmologie

gegenseitige Einfluss

Symmetrien und Erhaltungssätze, Symmetrien als Konstruktionsprinzip

Strukturgesetze, Dynamische Gesetze

Neue Definition des Experiments und der Messung,

Neue, bedeutende Fragen aus der Kosmologie in der Elementarteilchenphysik:(dark matter, dark energy)

Ziele

jenseits des Standardmodells der fundamentalen Wechselwirkungen

suche nach der Quantengravitation (jenseits der „friedlichen Koexistenz“)

Suche basiert auf

Fragen der theoretischen Konsistenz (GUT, Stringtheorien)

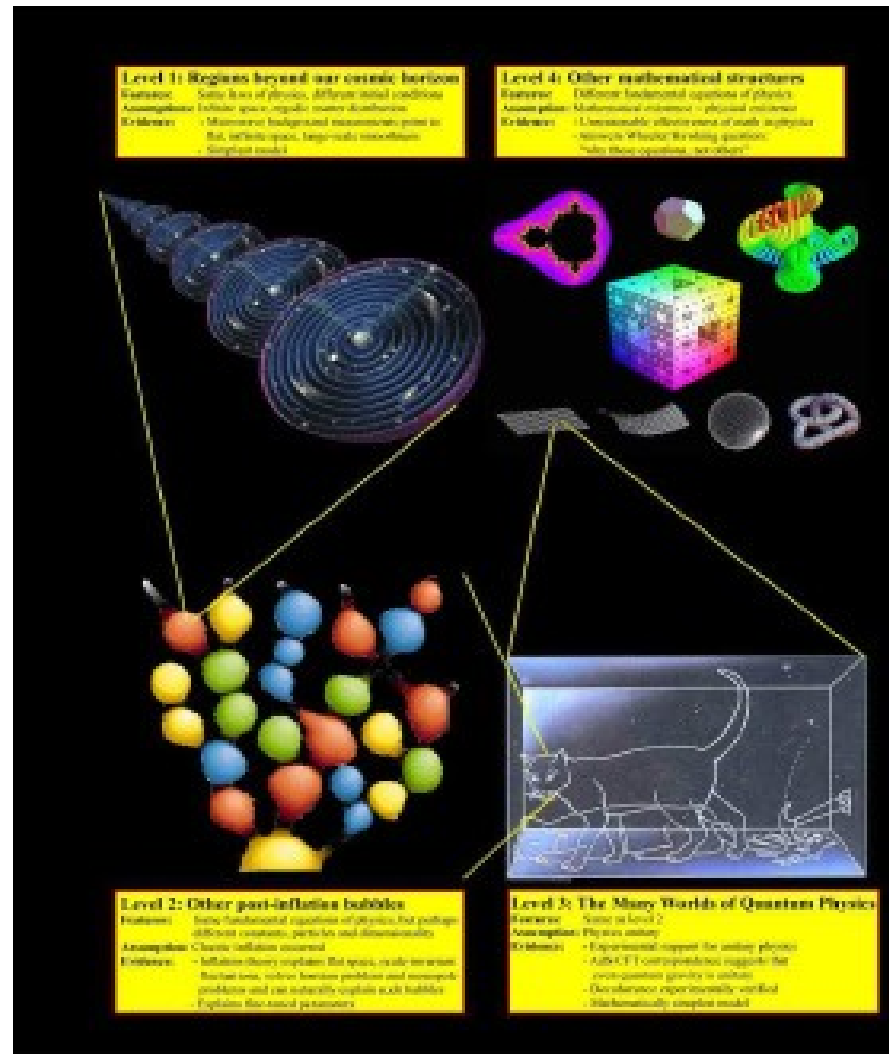
Impulse aus kosmologische Beobachtungen

Vereinheitlichung als regulative Idee

Neue Züge: mathematische Bilder (im Zusammenhang mit der Suche nach QG) -neue Intuitionen?

Andere Regionen
hinter Horizont

Andere Post-inflationäre
Bubbles



Neue mathematische
Strukturen

Die *Viele Welten* der
Quantenphysik

Theory of everything

Motivation:

Erfolge der Reduktion und Vereinheitlichung in der modernen Physik

Mechanik: Newton, Gesetze, Gravitation

Weitere Entwicklungen, Analytische Mechanik, Lagrange, Hamilton, Euler

Elektrodynamik: Faraday und die Feldvorstellung, Maxwell und Vereinheitlichung,

Thermodynamik und Stat. Mech., Gasentheorie

Vertrauen auf theoretische Zusammenhänge (Erhaltung gegen Galileische Rel.)

Suchen und Begründen neuartiger Hypothesen (Licht als Welle; Stat Mech.)

Mikroskopische Theorien

Mathematische Physik

„Quantisierung“ als universeller Vorgang

Stat. Mech. Methoden

Quantum – klassische Physik Verknüpfung (Korrespondenzprinzip, Dekohärenz)

Notwendigkeit, einer Quantentheorie der Raum-Zeit (kleine Abstände, große Energiedichte)

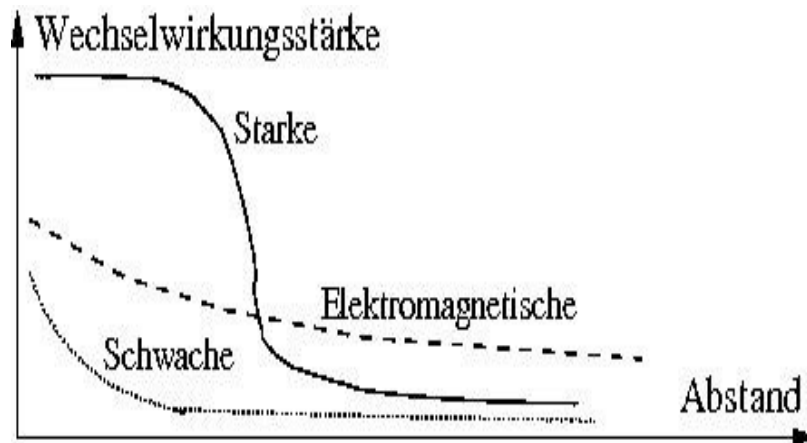
Grundlage

Vier fundamentale Wechselwirkungen

Mikroskopische Theorien und effektive Theorien, Renormierung (Wilson)

Kollektive Effekte, direkte Makroskopische Effekte aus Mikroskopische Wechselwirkungen

Das SM als Erfolgsmodell und zugleich unvollständig



Das SM 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 Kernen.

Kurzreichweitig. Schwach.

- + Das SM erlaubt die Beschreibung aller Teilchen-Prozesse, einschliesslich der Zusammensetzung der Materie
- + Bestätigt die wichtige Konstruktionsprinzipien: Quantenfelder, lokale Eichsymmetrie, Renormierung
- + 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

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*

Entwicklung der Forschungsstrukturen im 20. Jh

Erste Haelfte des 20. Jh

Universitaetsgruppen und -labors

Einzelne Instituten

Zaesur: das Manhattan Projekt

Ab Mitte 20 Jh,

Universitaetsgruppen und -labors

Einzelne Instituten

Forschungszentren

Forschungsgesellschaften,

Nationale und internationale Organe zur Forschungsunterstuetzung und -verwaltung

Neue ethische Fragen und Antworten!

Vor-Manhattan

Beispiele

Cavendish laboratory at the University of Cambridge, Gruendung 1874 :

Maxwell, Rayleigh, Thomson, Rutherford, Wilson, Bragg, Mott, ...

Universitaet Kopenhagen, Inst. Theor. Physik (heute: Niels Bohr Institut), Gruendung 1921

Bohr, der Geburtsort der QM (Heisenberg, Kramer, Klein)

Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (1911) → Max-Planck-Gesellschaft (ab 1948)

Das Manhattan-Projekt und das Los Alamos Laboratory, stark verbunden mit Univ. of California, Illinois.

ab 1942 unter Oppenheimer, Ziel Atombombe; Kontroll des Militaers (Gen. Groves)

Bethe, Vleck, Teller, Bloch, Weisskopf, Bohr, ..

Involviert ~100000 Mitarbeiter am Los-Alamos Lab.und andere Orte (USA, Kanada, GB)

Nach-Manhattan

Neu:

Grossforschung

Kooperationen und Internationale Vernetzung

Nationale Forschungsorgane

Beispiele

USA

DOE, energy.gov

18 National Labs, z.B.

ANL(Argonne),

FNAL(FermiNAcc),

LBNL(LawrenceBerkely),

LLNL(LawrenceLivermore),

NREN(RenewableEnergy),

BNL (Brookhaven Nat. Lab.).

...

Beispiel BNL:

Anlagen: RHIC Beschleuniger, Synchrotron Licht-Quelle, Center of functional Nanomaterials

Research: Photon sciences, QCD matter (auch *QG Plasma*), Energy research, Materials science
Physics of the universe, Climate, Environmental and Biosciences



Gegründet 1947, DOE

~3000 Scientists and support, ~4000 visitors/year

Nobel Prize in Physics

- 1957 – [Chen Ning Yang](#) and [Tsung-Dao Lee](#) – [parity laws](#)[21]
- 1976 – [Samuel C. C. Ting](#) – [J/Psi particle](#)[22]
- 1980 – [James Cronin](#) and [Val Logsdon Fitch](#) – [CP-violation](#)[23]
- 1988 – [Leon M. Lederman](#), [Melvin Schwartz](#), [Jack Steinberger](#) – [Muon neutrino](#)[24]
- 2002 – [Raymond Davis, Jr.](#) – [Neutrino oscillation](#)[25]

Nobel Prize in Chemistry

- 2003 – [Roderick MacKinnon](#) – [Ion channel](#)[14]
- 2009 – [Venktraman Ramakrishnan](#) and [Thomas A. Steitz](#) – [Ribosome](#)[26]

Contributing partner to ATLAS (LHC)

Deutschland

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

unterstützt Forschung vorwiegend in Universitäten, Emmy Noether Programm

Max-Planck-Gesellschaft, ab 1948, Grundlagenforschung

80 Institute (Physik, Chemie, Geisteswissenschaften, etwa 5200 Wissenschaftler+PhD+ ..

Fraunhofer Gesellschaft, ab 1949, angewandte Forschung

etwa 23000 Mitarbeiter in verschiedenen Instituten

Beispiel AEI (Hannover, Potsdam/Golm)



Quantengravitation und Stringtheorie, Astrophysikalische und Kosmologische Relativitätstheorie, Vereinheitlichung
Mathematische Begründung der Einsteinschen R-Z Theorie,

Gravitationswellen, Neutronensterne, Schwarze Löcher,
Theoretische und Mathematische Physik

~ 300 Mitarbeiter und Besucher

Europa

Europäische Forschungsprogramme, ab 1984, Horizont 2020, 80 Geuro

„ .. von der Grundlagenforschung bis hin zur Vorbereitung marktfähiger Produkte und Dienstleistungen. Hochschulen, Forschungseinrichtungen, Unternehmen (insbesondere auch kleine und mittlere Betriebe) sowie weitere Akteure, die in die Entwicklung von Innovationen eingebunden sind, stellen die Zielgruppen des Programms dar ...“

... weltweit finanzstärkste Forschungs-Förderungsprogramm .

CERN ab 1954



21 Mitglied Länder

Eigene Wissenschaftler + Besucher:

~ 2500 staff-members, ~ 12000 ass.

Anlagen: LHC u.a., Detektoren: ATLAS, ..

In wesentlichem: HE Physik

Kooperationen mit nationalen

Universitäten und Instituten

Einige Resultate:

1973: The discovery of [neutral currents](#) in the [Gargamelle](#) bubble chamber;

1983: The discovery of [W and Z bosons](#) in the [UA1](#) and [UA2 experiments](#);

1989: The determination of the number of light [neutrino](#) families at the LEP

1995: The first creation of [antihydrogen](#) atoms in the [PS210 experiment](#);

1999: The discovery of direct [CP violation](#) in the [NA48 experiment](#);

2010: The isolation of 38 atoms of [antihydrogen](#);

2011: Maintaining [antihydrogen](#) for over 15 minutes;

2012: A [boson](#) with mass around $125 \text{ GeV}/c^2$ consistent with long-sought [Higgs boson](#). at LHC

(Nobel Preis 2013, Englert und Higgs, fuer den vorhergesagten, am CERN bestaetigten Boson)

SM und jenseits, QG Plasma, Supersymmetrie, etc

und WWW !

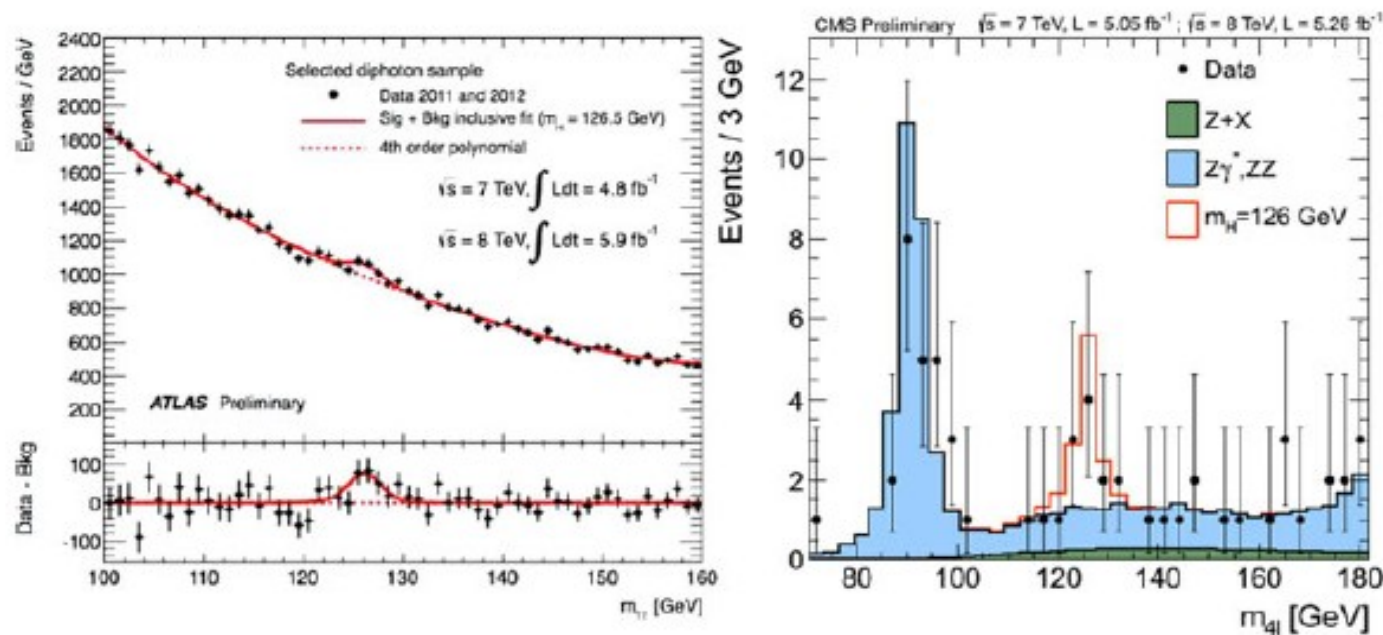


Abb. 14.11 Die ersten experimentell demonstrierten Spuren eines neuen Teilchens, das das Higgs-Boson H sein könnte, Stand 04.07.2012 (vorläufige Auswertung). *Links:* Die Zahl der beobachteten Paare von Photonen, die zum Zerfall eines H passen würden, in Abhängigkeit von ihrer invarianten Masse $m_{\gamma\gamma}c^2$ (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]

