

Von Newton zur Quantengravitation

Ein Streifzug durch die Entwicklung der Theoretischen Physik

Matthias Blau

Institut für Theoretische Physik
Albert Einstein Center for Fundamental Physics
Universität Bern

Astronomische Gesellschaft Bern, 22. März 2011

Einleitung

Von den Schwierigkeiten, über theoretische Physik zu reden



- 1 Moderne theoretische Physik beginnt vor ca. 100 Jahren, ungefähr dort wo die Schul/Allgemein-Bildung aufhört:
Quantentheorie / Relativitätstheorie (1905 Bern: Einstein)
- 2 Die Sprache der theoretischen Physik ist die Mathematik (nicht weil wir schwer verständlich sein wollen: Alltagssprache ungeeignet für Beschreibung von Phänomene die weit über unsere Alltagserfahrung hinausgehen)

Übliche Methode, diese Probleme zu vermeiden (Infotainment TV)

- Spektakuläre Bilder, zB von Sternen und Galaxien; effektvolle Computer-Animationen, zB von explodierenden Schwarzen Löchern, vibrierenden Strings etc.; dramatische Musik
- mag unterhaltsam sein, aber gibt es bei mir heute nicht: **Sorry!** (andere können das auch besser als ich)

Die Ohnmacht der Bilder

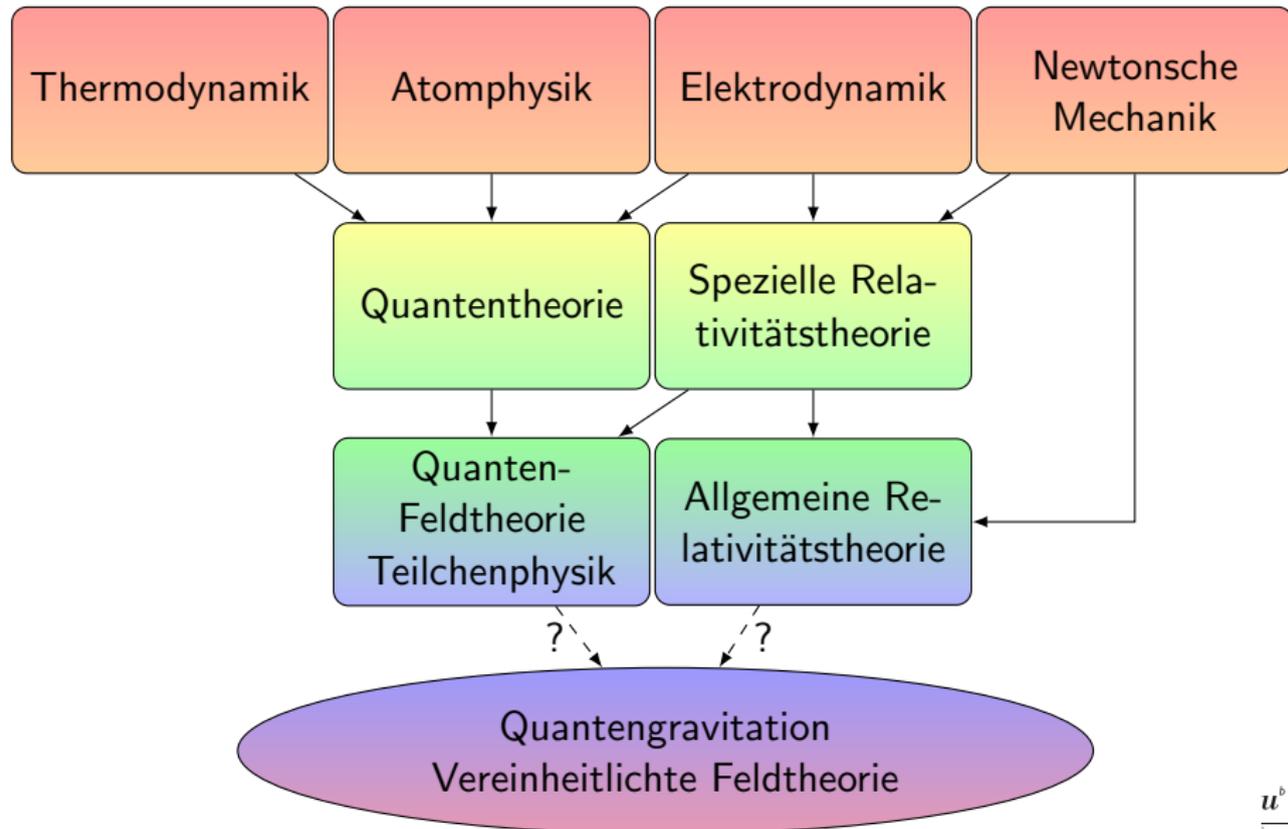
- Nicht sinnvoll, mit den allerneuesten spektakulären (spekulativen) Entwicklungen oder Entdeckungen anzufangen, wenn Verständnis für die Physik des 20. Jhdts (was ist erreicht worden, was nicht) fehlt
- **Physik als Bildergeschichte macht nicht nachvollziehbar, wie wir denken und warum wir tun was wir tun**

Was machen wir stattdessen? Worum geht es (mir) heute?

- Was ist theoretische Physik?
- Historischer Überblick
- Wie erfolgt Fortschritt in der theoretischen Physik?
- Wo stehen wir heute?
- Warum sind wir damit nicht zufrieden
- Was sind die grossen offenen Fragen?
- Ausblick: Vereinheitlichte Feldtheorie? Quantengravitation?

Ziel

- nicht detailliertes Verständnis davon, *was* wir tun
- aber zumindest Verständnis dafür, *warum* wir es tun



Was ist theoretische Physik?

Eine mögliche Definition (Wikipedia)

Theoretische Physik ist die Beschreibung von **Gesetzmässigkeiten** der Physik durch **mathematische Theorien / Modelle**.

Bemerkungen

- Achtung: umgangssprachlich werden **Theorie** und **Hypothese** oft synonym verwendet. Für uns ist **Theorie** ein detailliertes (und oft schon lange etabliertes) mathematisches Modell, eine **Hypothese** dagegen nur ein Vorschlag, eine Idee!
- Es gibt theoretische Physik als Disziplin überhaupt nur, weil es (aus welchem Grund auch immer) relativ einfache **Gesetzmässigkeiten** zu geben scheint.

Gesetzmässigkeiten: Äpfel, Planeten & Co.

- Beobachtung: es gibt Dinge die sich immer wiederholen, und die daher verlässlich **vorhersehbar** und **vorhersagbar** sind:
 - zB: Äpfel fallen zu Boden wenn man sie loslässt
- Es gibt dabei **gewisse Gesetzmässigkeiten**:
 - zB: Äpfel fallen immer gleich schnell und das unabhängig von Ort, Zeit, Farbe, Temperatur, Mondphase, ...
- Es gibt sogar **recht allgemeine Gesetzmässigkeiten**:
 - zB: nicht nur Äpfel sondern alle Objekte fallen universell gleich schnell im Gravitationsfeld (Galilei)
- Es gibt **ganz universelle Gesetzmässigkeiten**
 - zB: Fallen von Äpfeln und die Bewegung von Planeten um die Sonne werden durch das selbe Gesetz beschrieben (**Newton**).
- **Gesetzmässigkeiten \Rightarrow Vereinheitlichung**
(d.h. Vereinheitlichung liegt in der Natur der theoretischen Physik)

Von Äpfeln zur Allgemeinen Relativitätstheorie

Eine Bemerkung am Rande

Einstein (mit seinem unübertroffenen Talent, durch einfache Fragen tiefe Zusammenhänge zu entdecken) fragte sich:

Warum fallen eigentlich alle Objekte gleich schnell?

- alle Objekte fallen gleich schnell
 - ⇔ träge Masse = schwere Masse
 - ⇔ Beschleunigung = Schwerkraft

Einsteinsches Äquivalenzprinzip
- Und von dort ist es nicht weit zu der Erkenntnis (**Einstein**) dass die Schwerkraft nicht eine Kraft ist wie alle anderen sondern die Manifestation einer **gekrümmten Raum-Zeit!**.
- ⇒ **Allgemeine Relativitätstheorie**

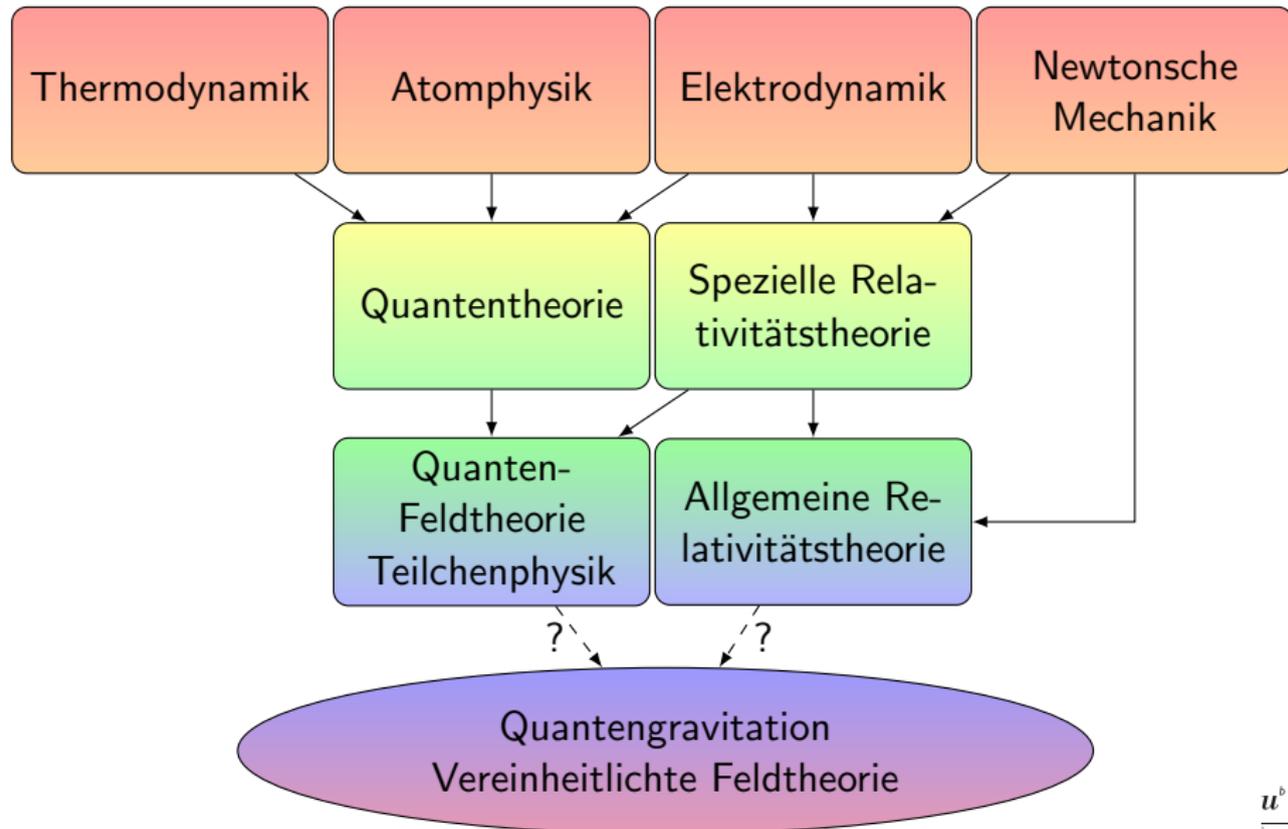
Typische Vorgehensweise

- Durch Beobachtung und Abstraktion / Idealisierung **Gesetzmässigkeiten finden**
- präzise **mathematisch formulieren**
- neue Dinge **erklären**, neue Phänomene **vorhersagen** oder bestehende Theorien / Modelle **vereinheitlichen**
- Vorhersagen **überprüfen** (oder überprüfen lassen)

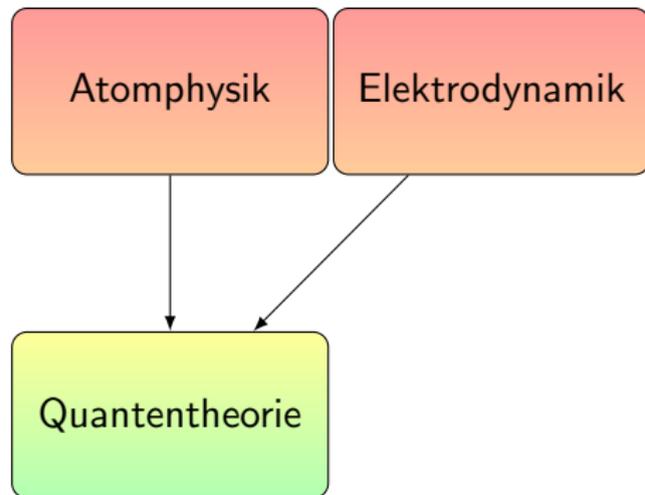
Fortschritt wird stimuliert durch ...

- Neue experimentelle Phänomene & Entdeckungen
- Konflikt zwischen Theorie und Experiment
- Konflikt zwischen etablierten Theorien
⇒ begrenzte Gültigkeit etablierter Theorien
- Suche nach fundamentalerer Beschreibung
(neue Perspektive, Vereinheitlichung, ...)

Historischer Überblick (selektiv, Karikatur)



Beispiel Konflikt Experiment - Theorie



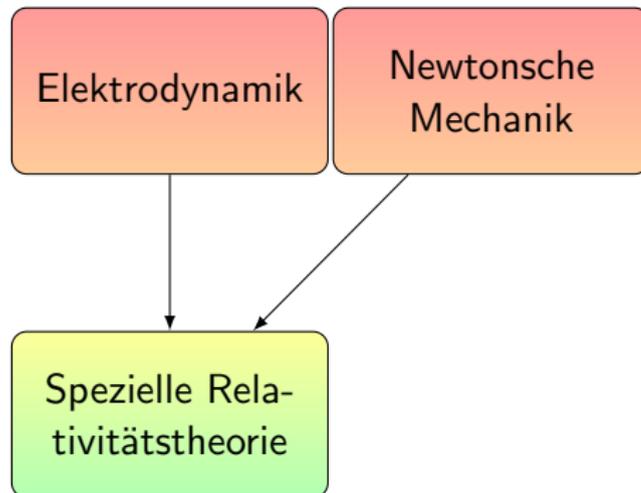
Rutherfordsches Atommodell
(positiver Kern + Elektronen)

- + beschleunigte Ladungen
- + Stabilität von Atomen

} ⇒ ???

- **Gesetzmässigkeiten der Physik auf (sub-)atomaren Niveau**
- Konsequenzen dieser Gestezmässigkeiten sind (selbst für Physiker) relativ **unintuitiv** und bisweilen **bizarrr**, aber
 - funktioniert (hervorragend)
 - gibt keinen (evolutionären) Grund warum sich Elementarteilchen so verhalten sollten, dass menschliches Gehirn dies als intuitiv empfindet
- Zustände eines Systems werden durch **Wellenfunktionen** beschrieben
- Mögliche Aussagen über Messungen an einem System sind typischerweise probabilistischer Natur (**Wahrscheinlichkeitsaussagen**)
- Charakteristische Eigenschaft: **Heisenbergsche Unschärferelation**
- Gesetze der Quantenphysik sind im Alltag vernachlässigbar, aber unser Alltag beruht ganz wesentlich auf ihnen (Stabilität der Materie), und eine komplexe Welt ohne eine Form der Quantentheorie ist wohl kaum möglich

Beispiel Konflikt Theorie - Theorie (- Experiment)

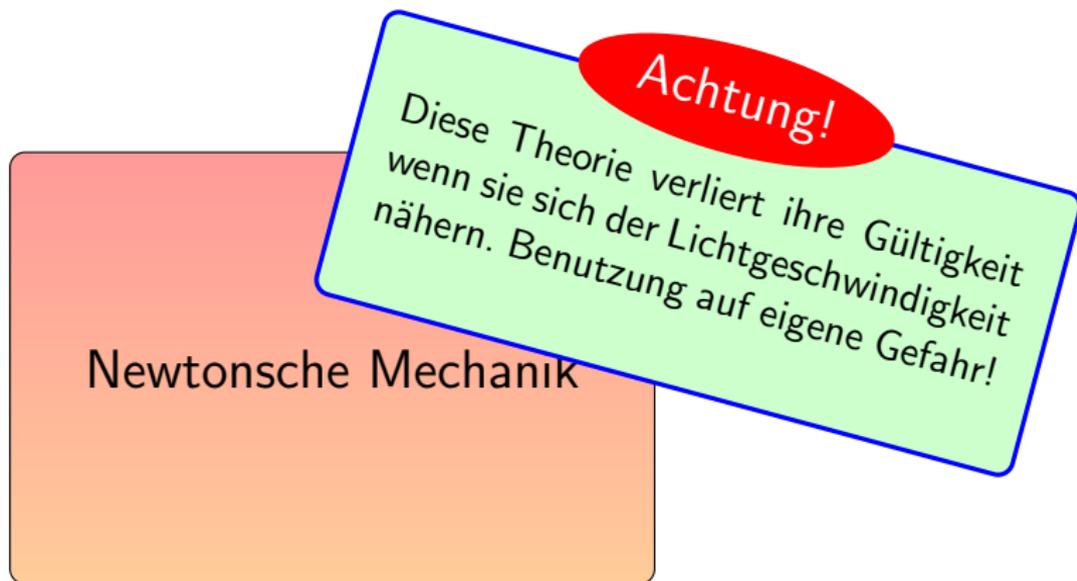


+ Ätherhypothese
+ Relativitätsprinzip
+ Michelson-Morley Experiment
(Invarianz der Lichtgeschwindigkeit) } $\Rightarrow ???$

Beispiel Gültigkeitsgrenzen: Konsumentenschutz-Hinweise für Theorien

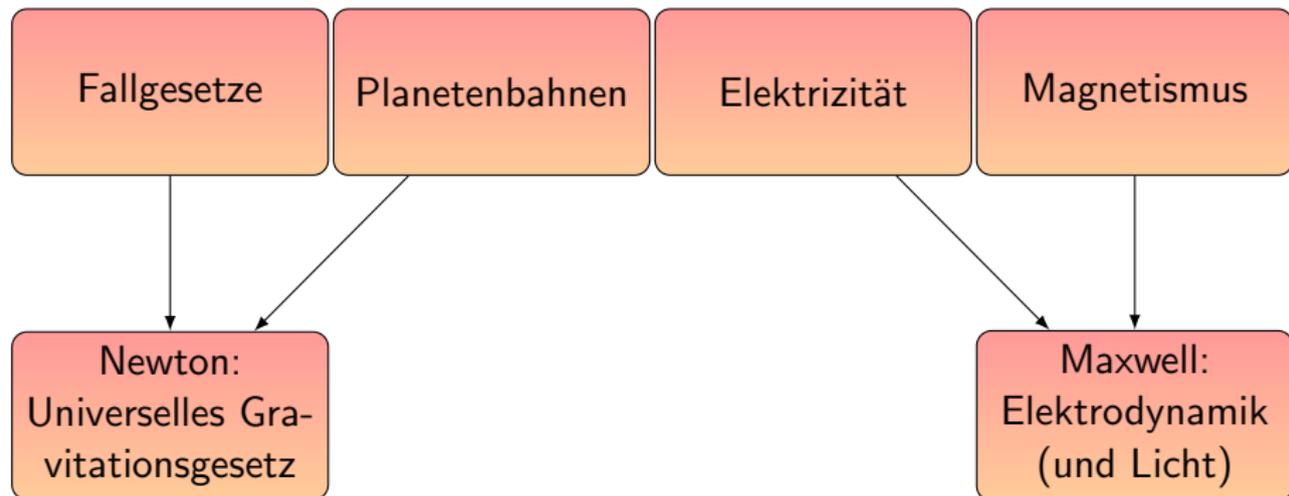
Newtonsche Mechanik

Beispiel Gültigkeitsgrenzen: Konsumentenschutz-Hinweise für Theorien

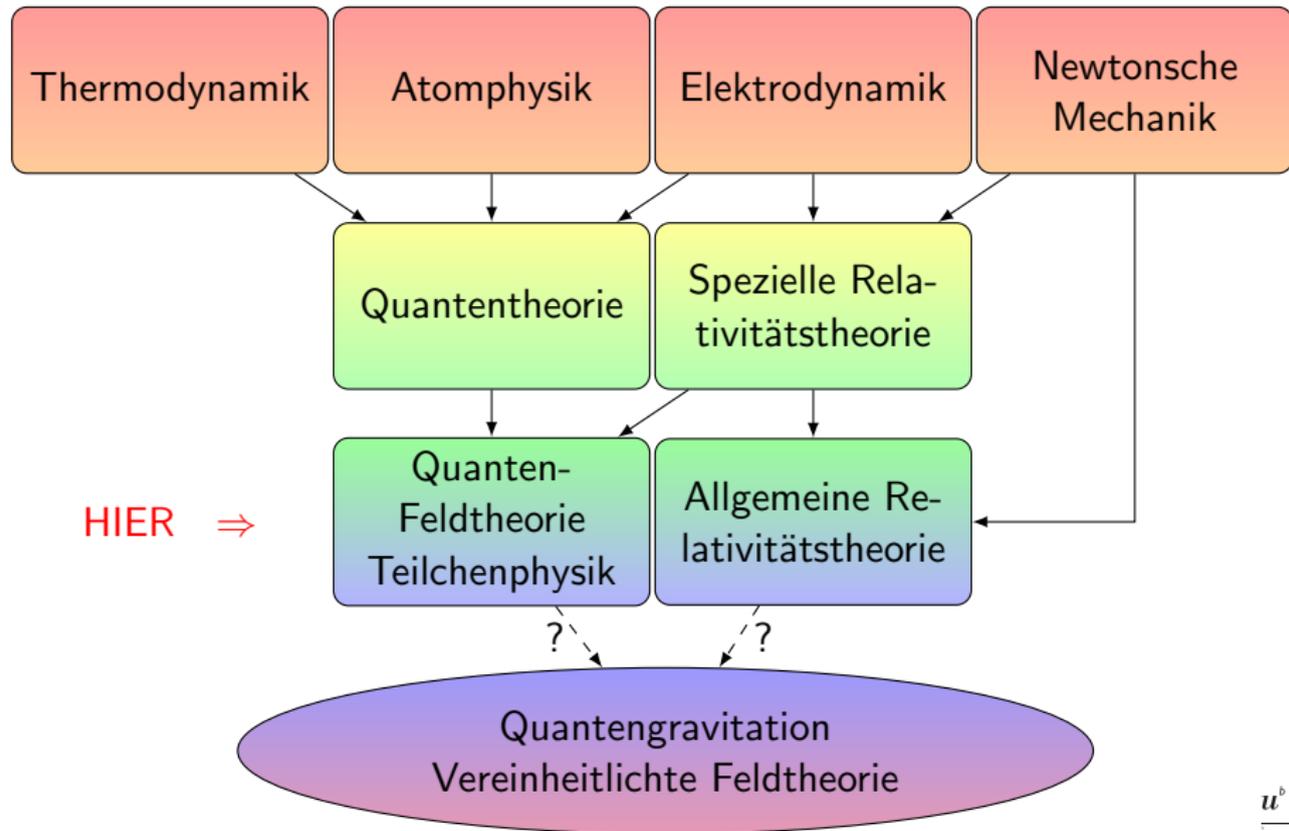


Wichtig: Gültigkeitsgrenzen hinterfragen, ausloten, erkennen!

Beispiele Vereinheitlichung



Theoretische Physik: Wo stehen wir heute?



Erfolgreiche Beschreibung der Welt “im Kleinen”

- Das **Standardmodell der Teilchenphysik**
- Quantentheorie der elektromagnetischen, starken und schwachen Kernkräfte
- beschreibt Elementar(?)teilchen und ihre Wechselwirkungen

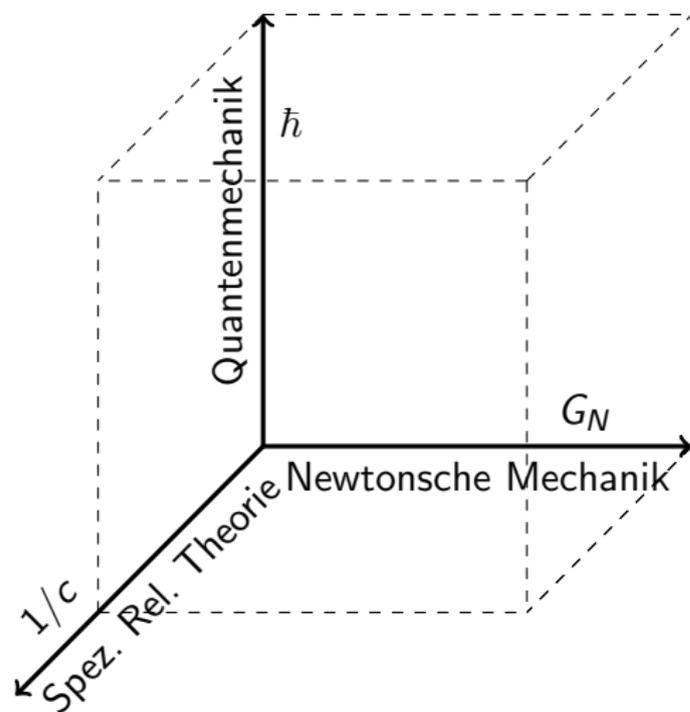
Erfolgreiche Beschreibung der Welt “im Grossen”

- Die **Allgemeine Relativitätstheorie**
- klassische Theorie der Schwerkraft (Schwerkraft = Manifestation einer gekrümmten Raum-Zeit)
- beschreibt Sonnensystem, Galaxien, Schwarze Löcher, Kosmologie (“Big Bang”)

Warum sind wir damit nicht zufrieden?

- Das Standardmodell ist etwas (sehr?) **unbefriedigend**, da es sehr *ad hoc* und **unnatürlich** zu sein scheint, und zB nicht die Massen der Teilchen vorhersagen kann.
- Standardmodell (SM) und allgemeine Relativitätstheorie (ART) sind **nicht unbegrenzt gültig**:
 - SM nur dann wenn man Schwerkraft vernachlässigen kann;
 - ART nur dann wenn man Quanteneffekte vernachlässigen kann
 - Wie beschreiben wir Universum als es sehr jung/klein war?
(Unterschied zwischen “im Kleinen” und “im Grossen” verschwindet)
- SM und ART können nicht wirklich erklären, **warum** unsere Welt so ist wie sie ist (sonder sie nur beschreiben **wie** sie ist)

Der Theoriewürfel (Bronstein, 1930)



Die Achsen: die Naturkonstanten G_N , c und \hbar

G_N : Newtons (oder Gravitations-) Konstante

- Gravitationskraft $F = -G_N M_1 M_2 / r^2$
- $G_N \approx 10^{-11} \text{m}^3 / \text{s}^2 \text{kg}$
- $G_N \rightarrow 0$: “Gravitationskraft vernachlässigbar”

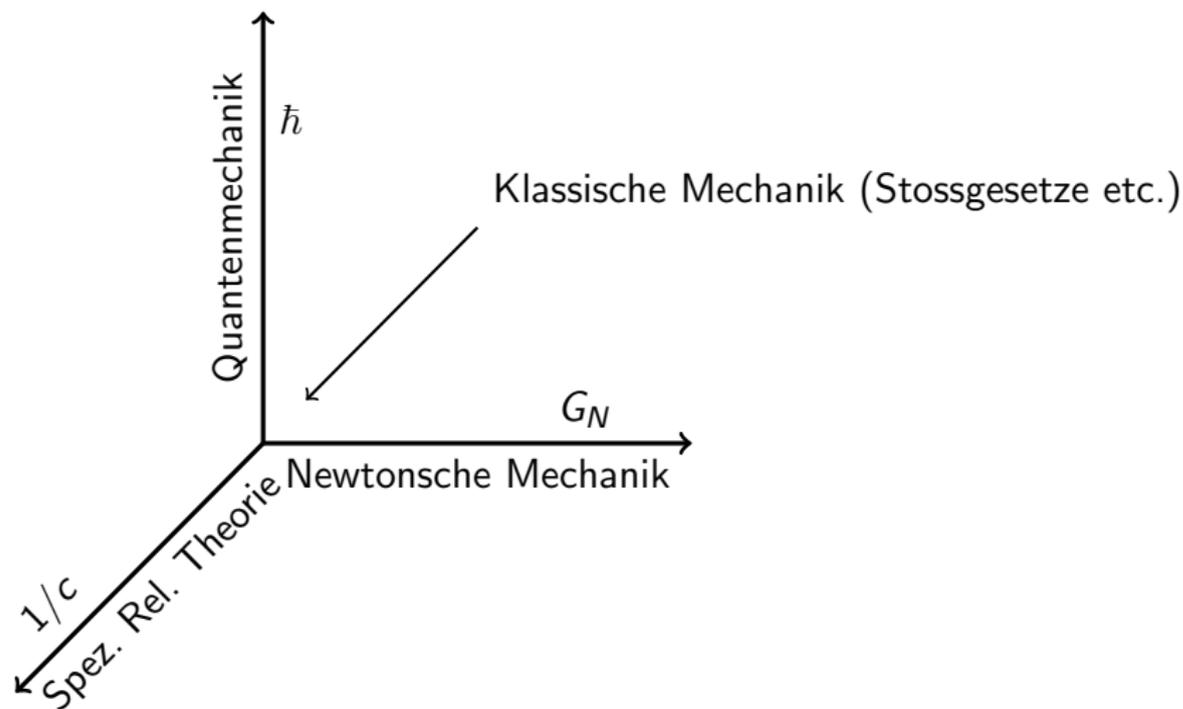
c : Lichtgeschwindigkeit

- $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$, $1/c \approx 3 \times 10^{-9} \text{s/m}$
- $c \rightarrow \infty$ oder $1/c \rightarrow 0$: “relativistische Effekte vernachlässigbar”

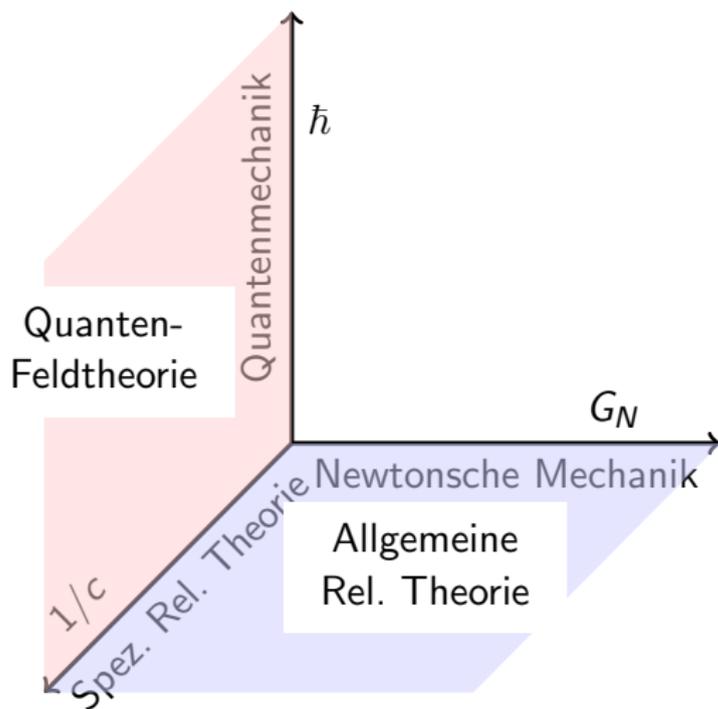
$\hbar = h/2\pi$: Plancksche Konstante (Wirkungsquantum)

- Photonen $E = h\nu$; Atomradius $R \sim \hbar^2 / me^2$
- $\hbar \approx 10^{-34} \text{kg m}^2 / \text{s}$
- $\hbar \rightarrow 0$: “Quanteneffekte vernachlässigbar”

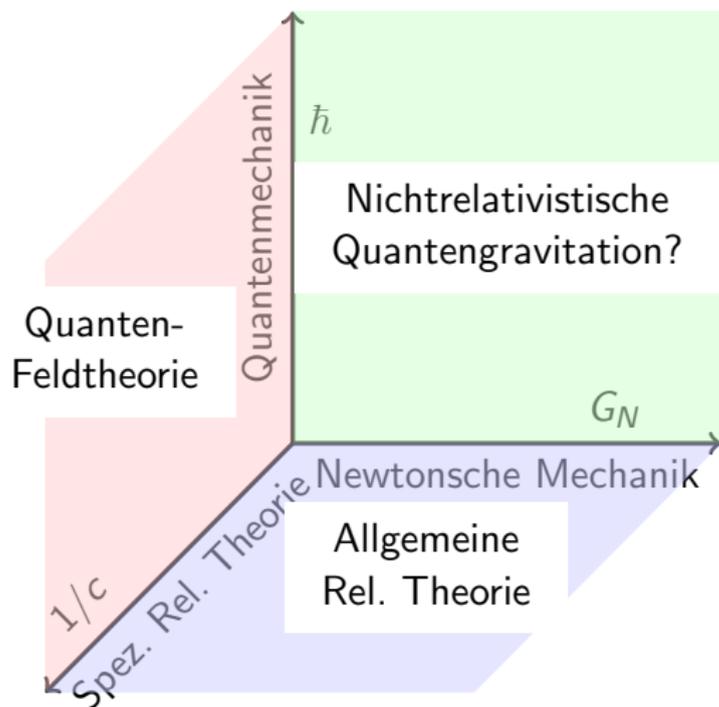
Zurück zu unserem Würfel

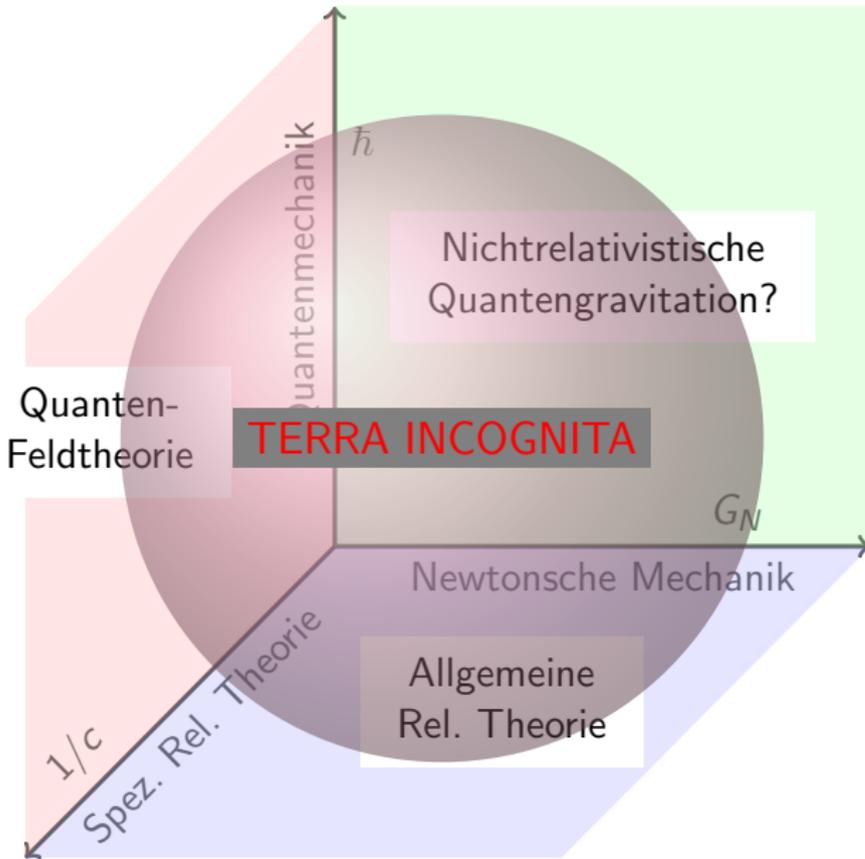


Was wissen / verstehen wir heute?



Was kennen wir alles nicht?





- Heutige Physik so erfolgreich, weil $G_N, 1/c, \hbar$ so klein sind!
- Größenordnungen, Gültigkeitsgrenzen:
Planck-Länge $L_P = \sqrt{\hbar G_N / c^3} \approx 10^{-35} \text{ m}$
Planck-Energie $E_P = \sqrt{\hbar c^5 / G_N} \approx 10^9 \text{ J} \approx 10^{19} \text{ GeV} \sim 10^{32} \text{ K}$
- Ganz allgemein ist eine Theorie der **Quantengravitation** ein mathematisches Modell der Physik das gültig ist, wenn man relativistische, Gravitations- und Quanten-Effekte nicht vernachlässigen kann. (zB frühes Universum, Schwarze Löcher)
- Suche nach einer konsistenten Theorie der Quantengravitation ist der Versuch, die beiden tragenden (und separat spektakulär erfolgreichen) Säulen der Physik des 20. Jhdts,

Quantenphysik & Allgemeine Relativitätstheorie

miteinander zu vereinbaren.

- Erste technische Arbeiten zur Quantengravitation: \sim 1930
- Nobel-Preisträger die sich mit dem Problem beschäftigt haben: Einstein, Bohr, Heisenberg, Dirac, Pauli, Salam, Schwinger, Weinberg, Feynman, Veltman, 't Hooft, Gross, Wilczek (kurz: alles was Rang und Namen hat . . .)
- **Ergebnis:** viele Einblicke aber keine Quantengravitation
- **Problem:**
nicht nur technisch sondern auch konzeptionell extrem schwer
Was ist eine **Quanten-Raum-Zeit-Geometrie?**
Was bedeutet eine **Wellenfunktion des Universums?**
- **die grosse Herausforderung für die theoretische Physik des 21. Jhdts**

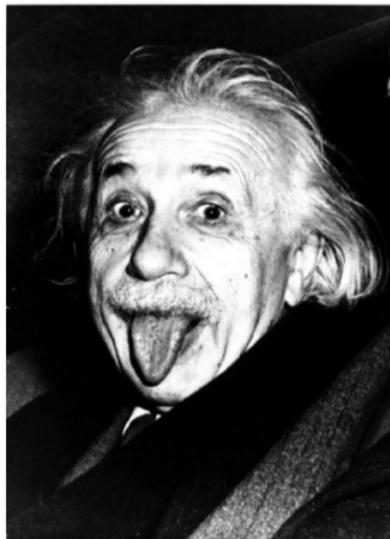
Quantengravitation: Warum?

- **Konsistenz / Vollständigkeit:**
fundamental ist die Wechselwirkung von klassischer (dh nicht-Quanten) Gravitation mit Quanten-Materie inkonsistent
- **Notwendigkeit:**
Schwarze Löcher, frühes Universum, ...?
- **Hoffnungen und Erwartungen:**
eine Theorie der Quantengravitation wird uns auf alle möglichen offenen fundamentalen Fragen Antwort geben können, insbesondere solche die zum Inhalt haben **warum unser Universum so ist wie es ist**

Was sind einige dieser grossen offenen Fragen?

- Gibt es tatsächlich nur die uns bereits bekannten 4 Kräfte? Wenn ja, warum? Und wenn nicht ...?
- Besteht unsere Welt tatsächlich (nur) aus den uns bereits bekannten 3 Raum-Dimensionen und einer Zeit-Richtung? Wenn ja, warum? Und wenn nicht ...?
- Was ist der Ursprung unseres Universums und woraus besteht es? Was war “vor dem Big Bang”? (sinnvolle Frage?)
- Gibt es eine **vereinheitlichte Feldtheorie** die all dies erklärt? (Journalisten nennen das die *Weltformel* - ein dummes Wort) Ist **String-Theorie** der richtige Weg?
- Gibt es einen fundamentalen Zusammenhang zwischen Informationstheorie (Entropie), Schwerkraft und Quantentheorie?
- Und schliesslich, eine meiner Lieblingsfragen: **Was ist Zeit?** (abgesehen von dem was ich vermutlich jetzt nicht mehr habe)

Fazit: Wir haben noch viel zu tun!



Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!