

Zahlen in der Physik: *vom Mikro- zum Makro-Kosmos*

Hans Peter Nilles

Bethe Center for Theoretical Physics (bctp) and
Center of Science and Thought (CST)
Universität Bonn



Wo sind wir 2018?

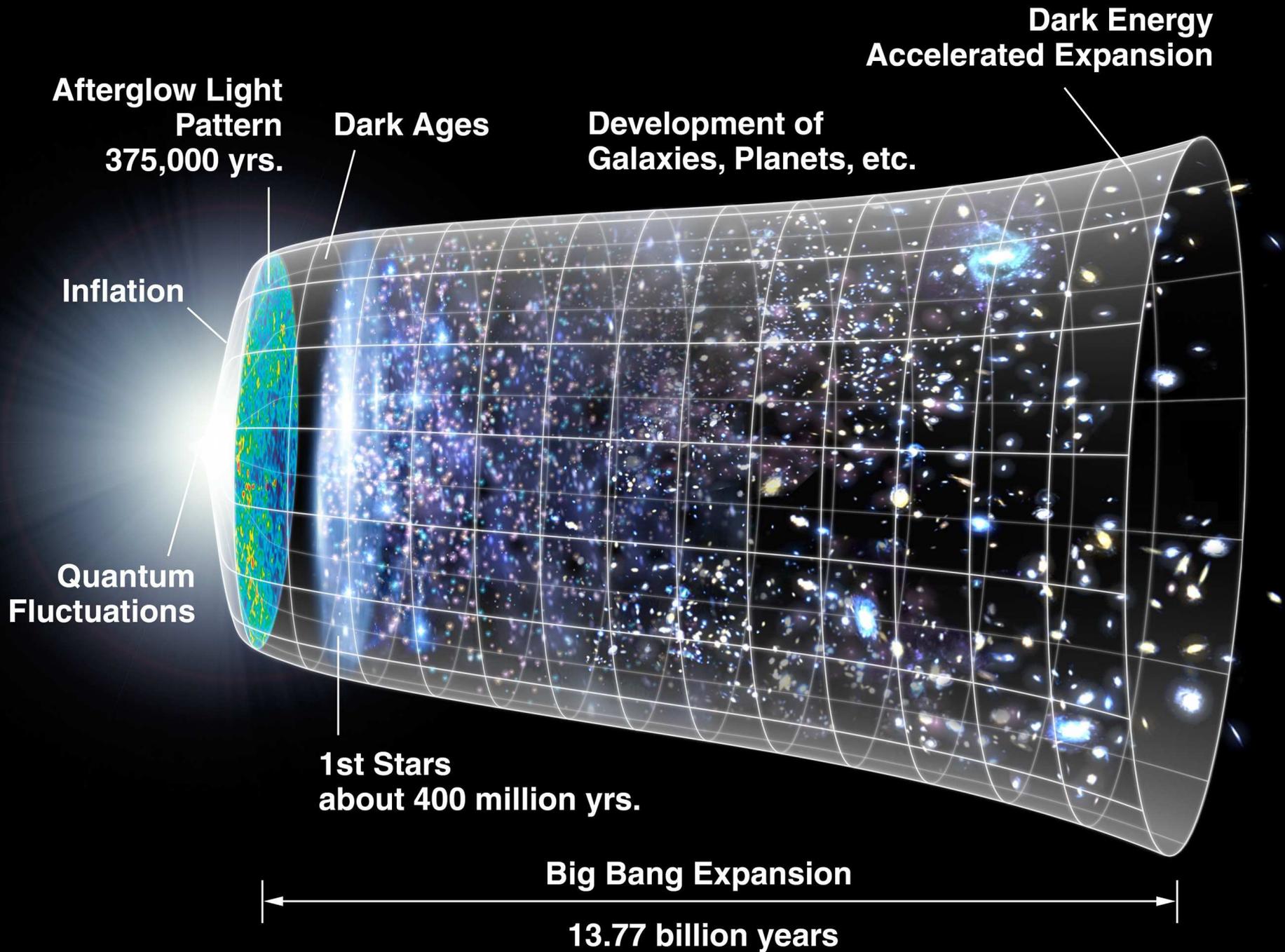
Im Vergleich zu 1980:

- 10^4 mal besser: **Auflösung heute 10^{-20} Meter**
- aber Quarks und Leptonen erscheinen immer noch fundamental

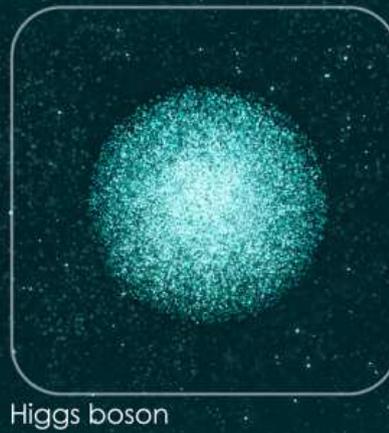
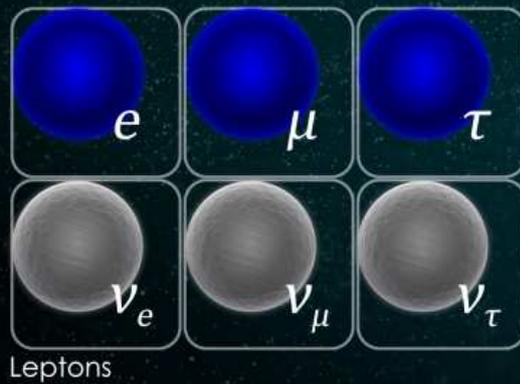
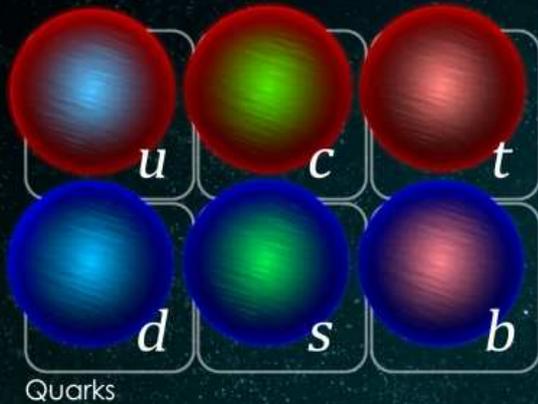
Große Fortschritte im Verständnis des Universums:

- **Standardmodell der Teilchenphysik**
- **Λ CDM-Modell der Kosmologie**

Erlauben die Beschreibung aller bekannten kosmischen Phänomene (obwohl einige fundamentale Größen noch nicht verstanden sind).



Standard Modell



Status Quo

Wo sind die Grenzen?

- Gibt es eine **fundamentale Länge**?
- Wie groß ist das Universum?

Standard Modell und Λ CDM beschreiben alle Phänomene

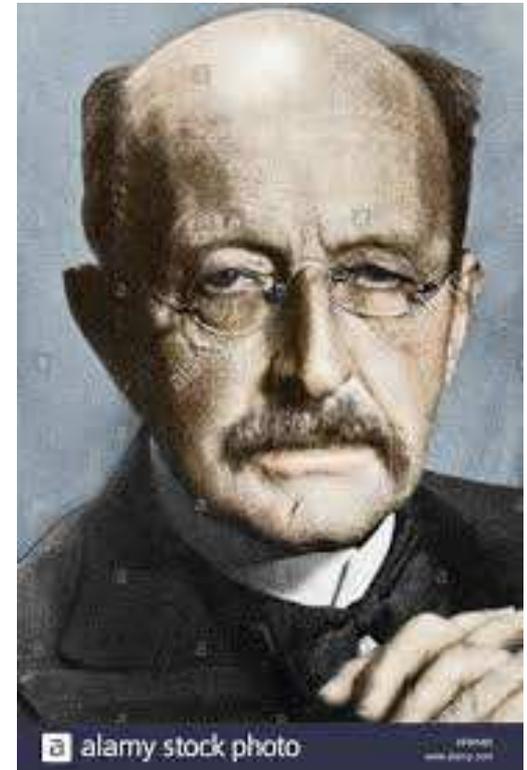
- **Ende der Physik?**
- Vergleich zum Jahre 1900 ("alles verstanden" aber man wusste nicht warum die Sonne scheint)

Damals wie heute bleiben Fragen offen, und die sind zum Teil so komplex, dass wir **nicht wissen wie wir überhaupt Lösungsansätze formulieren sollen!**

Die Vision: Max Planck 1899

Die Frage nach den fundamentalen Naturkonstanten!

- h
Plancksches Wirkungsquantum
- c :
Lichtgeschwindigkeit
- G
Gravitationskonstante



(M. Planck, 1858-1947)

definieren ein fundamentales Maßsystem.

Die Zahlen

Die Größenordnungen sind extrem für unsere Erfahrungen

- $\hbar = 1,054571800 \times 10^{-34} \text{ [(kg} \times \text{m}^2\text{)/sek]}$
sehr klein, relevant für die Quantentheorie
- $c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ [m/sek]}$
sehr groß, relevant für die Relativitätstheorie
- $G = 6,67408 \times 10^{-11} \text{ [m}^3\text{/(kg} \times \text{sek}^2\text{)]}$
sehr klein, relevant für die Gravitationstheorie

Mit einem Trick kann man diese fundamentalen Größen in ein fundamentales Maßsystem umschreiben.

Der "Plancksche Trick"

Man benutzt Kombinationen der Naturkonstanten zur Definition fundamentaler Einheiten:

- $l_P = \sqrt{\hbar G/c^3} \sim 1,6 \times 10^{-35}$ [m]: **Planck-Länge**
- $t_P = \sqrt{\hbar G/c^5} \sim 5,4 \times 10^{-44}$ [sek]: **Planck-Zeit**
- $M_P = \sqrt{\hbar c/G} \sim 2,2 \times 10^{-8}$ [kg]: **Planck-Masse**

Fundamentale Einheiten für Länge und Zeit sind sehr klein.

Dagegen entspricht M_P in etwa dem 10^{19} -fachen der Proton-Masse und ist daher im Mikrokosmos sehr groß.

Fundamentales Maßsystem

Originalzitat von Planck über die Größen l_P , t_P und M_P :
(Sitz. Preuss. Akad. Wiss. (1899) Seite 479-480)

- "Diese Größen behalten ihre natürliche Bedeutung so lange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtfortpflanzung im Vacuum und die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in Gültigkeit bleiben, sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die nämlichen ergeben."

Planck-Länge als kleinste (fundamentale) Länge?

$$l_{\text{Planck}} \sim 10^{-35} \text{ Meter}$$

Offene Fragen

Wir sind bei einer Auflösung von etwa 10^{-20} Meter. Es fehlen also 15 Größenordnungen (um 1900: 10^{-10} Meter)

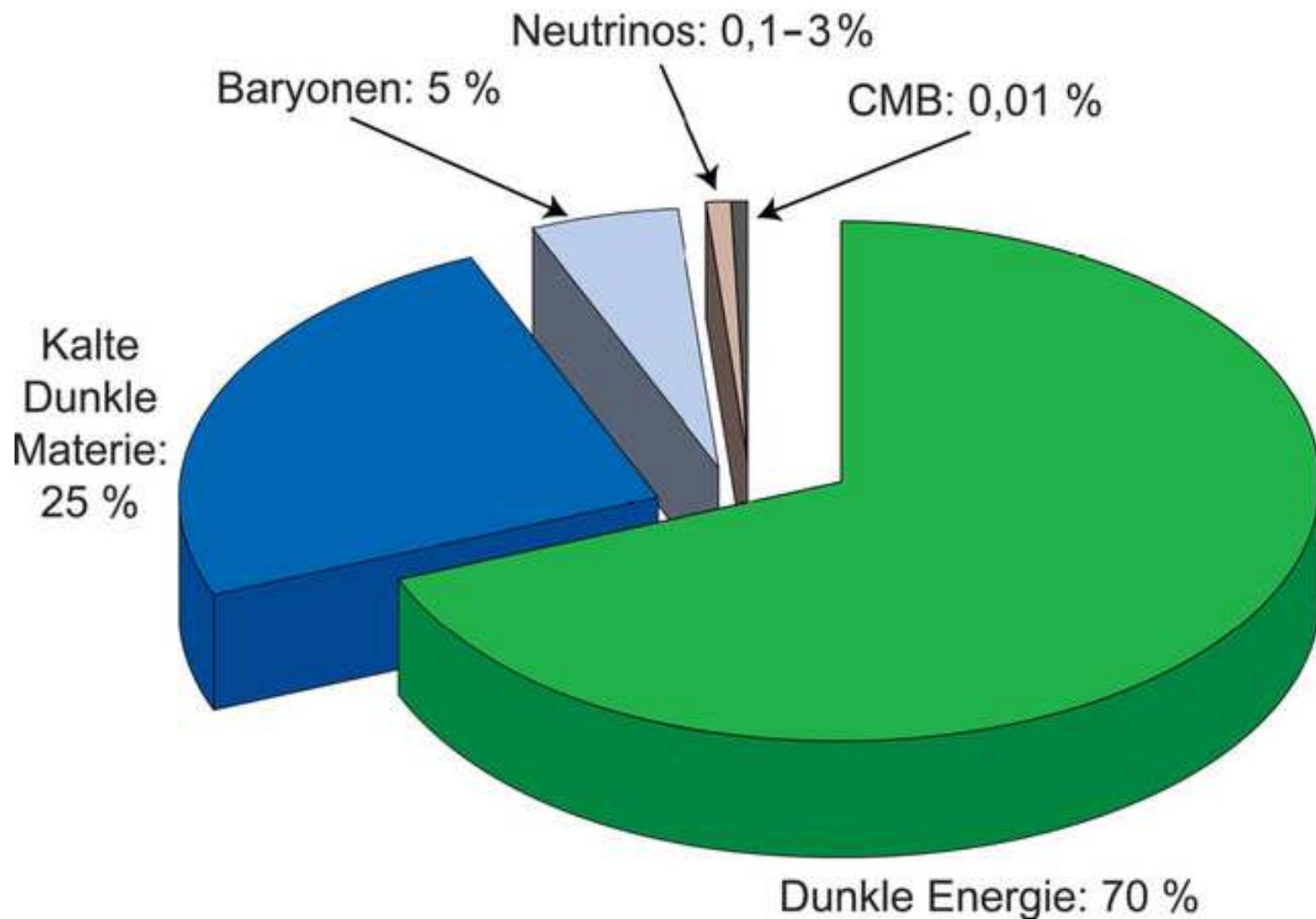
- Bleiben Quarks und Leptonen bis zu l_P fundamental
- wie entwickeln sich die fundamentalen Kräfte

Zudem sind einige Fragen offen:

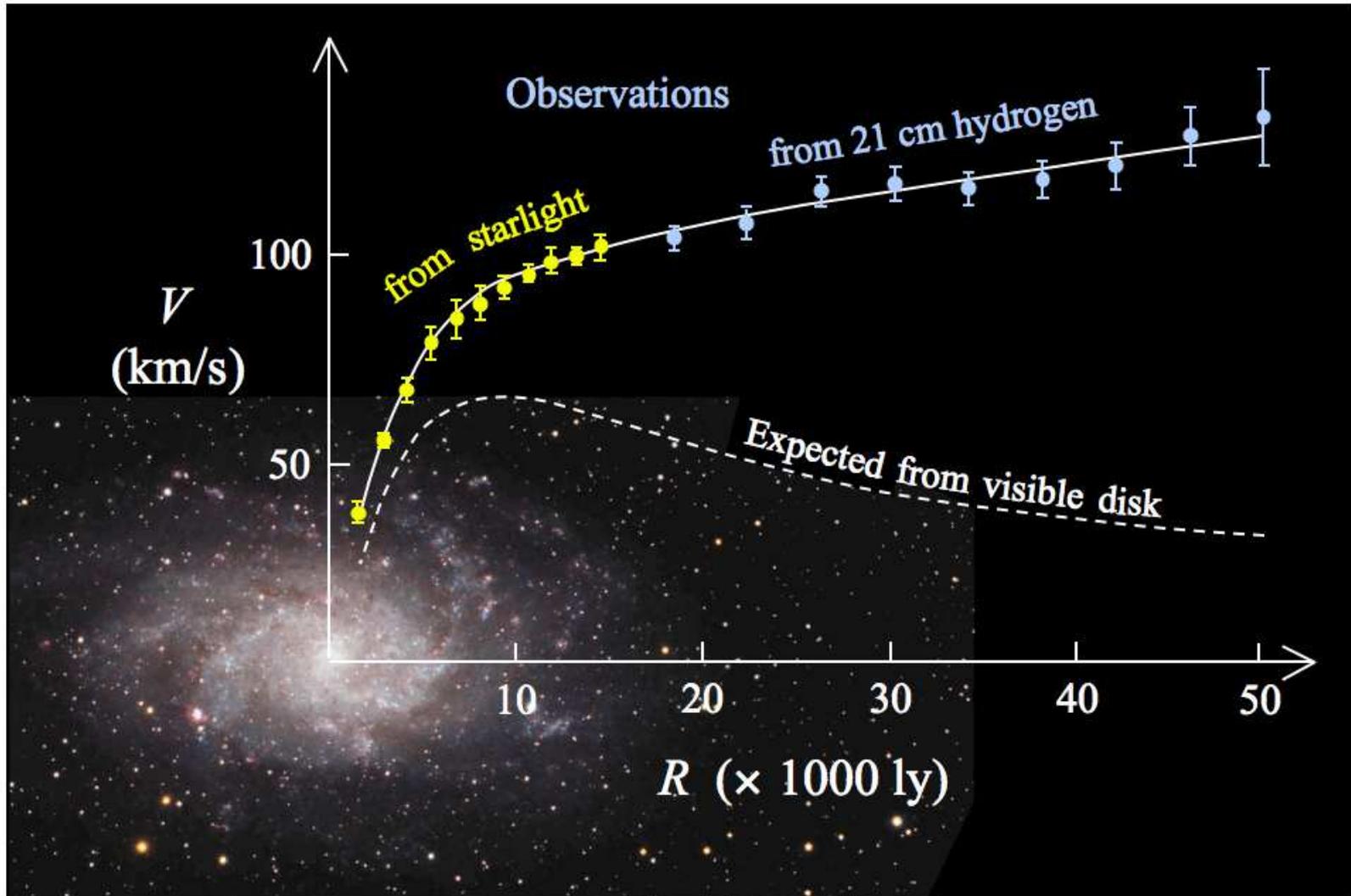
- Existenz der dunklen Materie (DM)
- Herkunft der dunklen Energie (DE)

Es wäre also arrogant zu behaupten, dass wir alles verstehen und die Rätsel der Physik gelöst sind (vergleiche die Situation zum "Ende der Physik" um 1900).

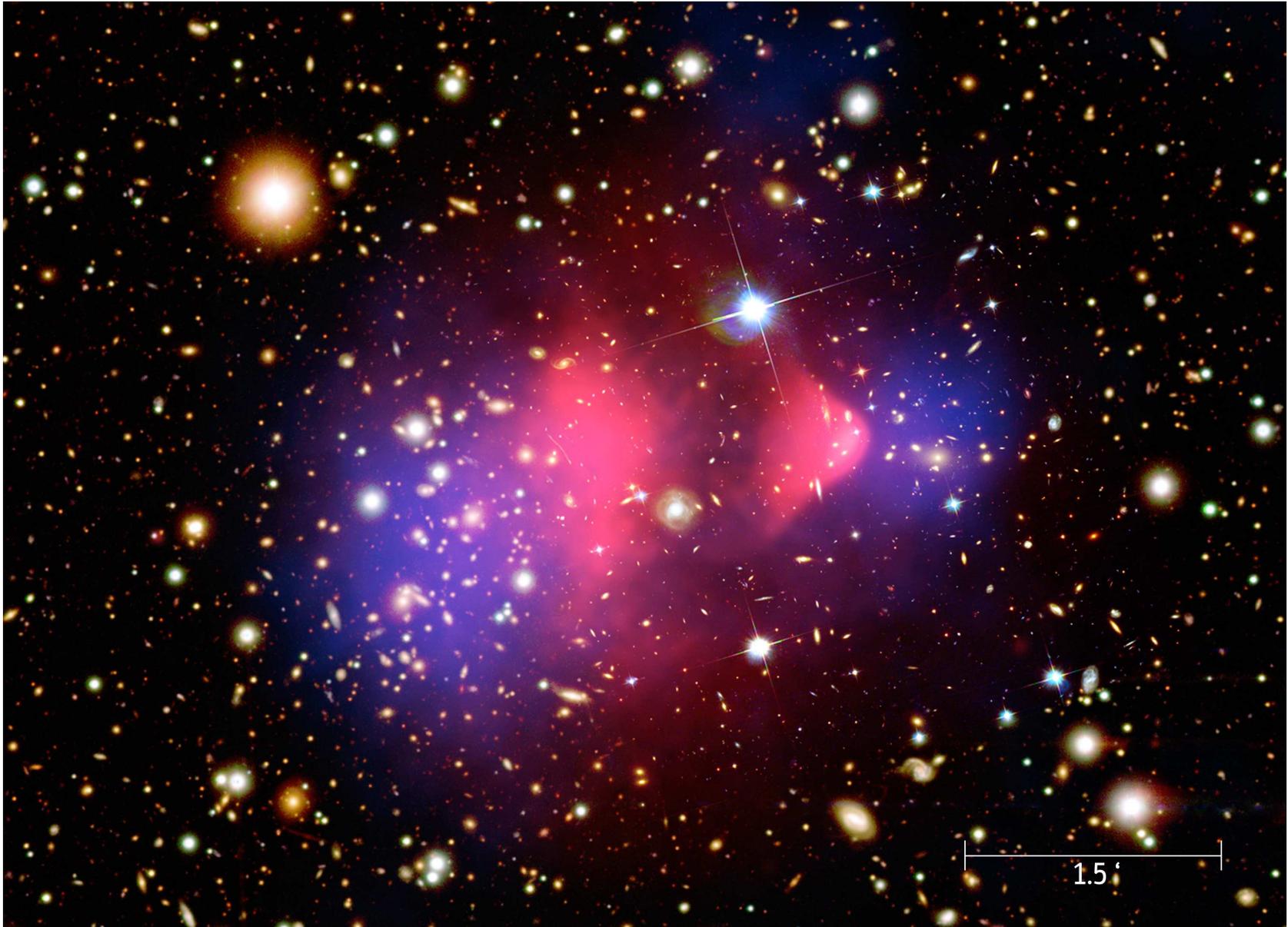
Energie-Kuchen



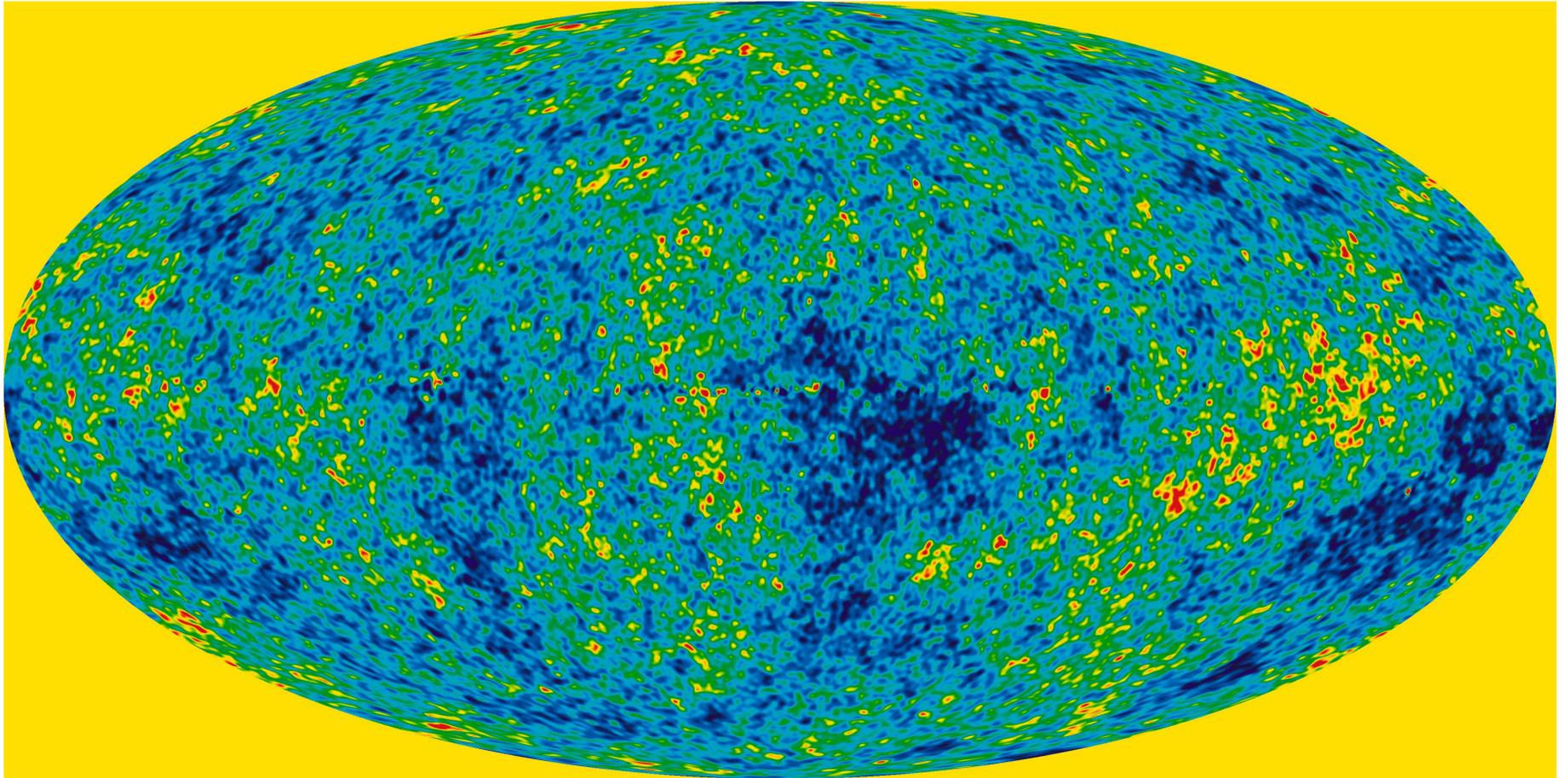
Galaxien



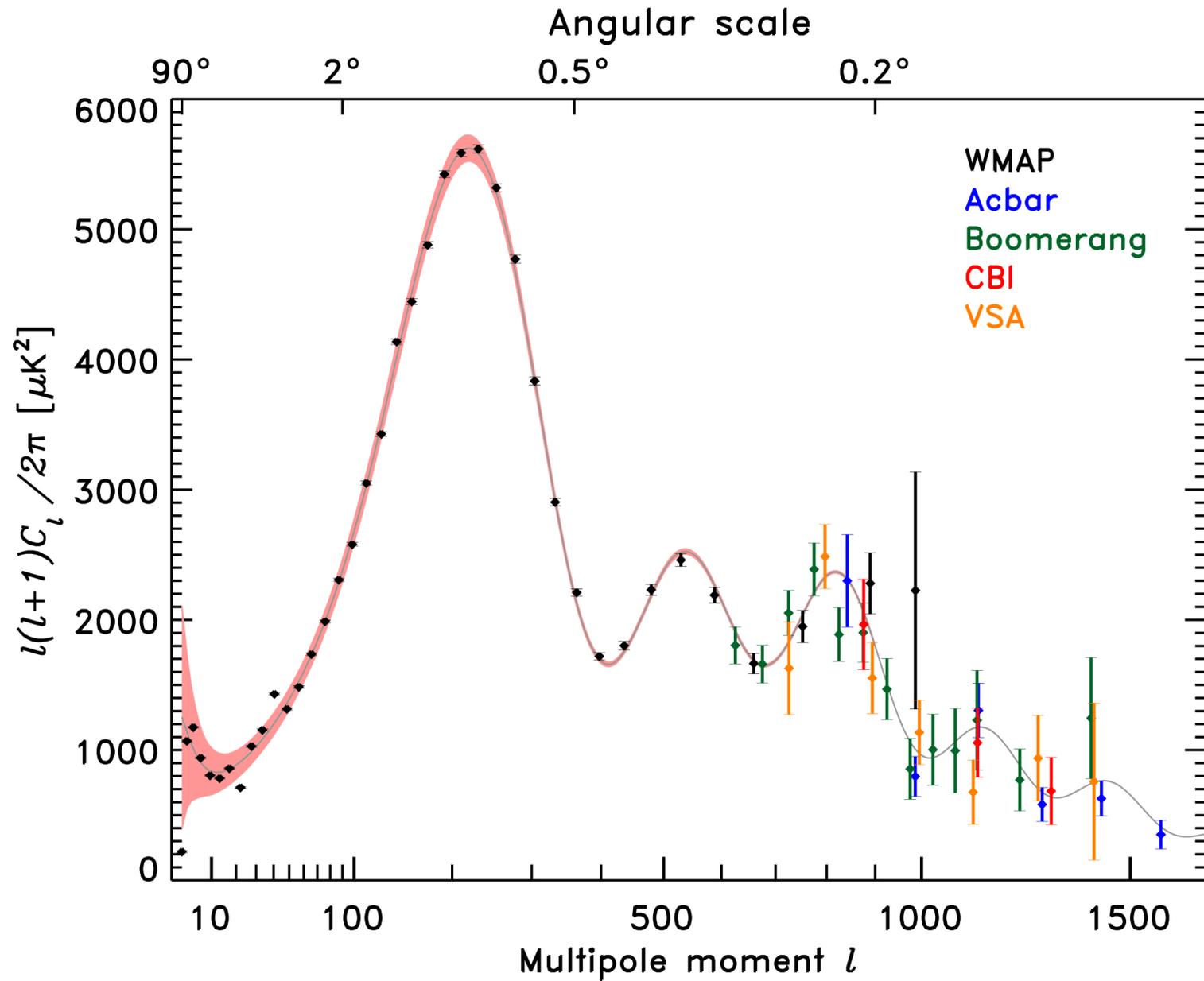
Kalte Dunkle Materie



Kosmische Hintergrundstrahlung



Spektrum



Dunkle Materie und dunkle Energie

- **Kalte Dunkle Materie (CDM)** verhält sich wie normale Materie (Klumpenbildung)
- **Dunkle Energie (DE)** bewirkt das Gegenteil. Sie führt zu einer beschleunigten Expansion des Universums

Kandidaten:

- DM könnte aus neuen **Elementarteilchen** bestehen
- Beschreibung der DE durch **kosmologische Konstante?**

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Ein großes Rätsel

Ursprünglich hatte Einstein Λ nicht berücksichtigt:

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2}g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- Ausdehnung des Universums (Friedmann-Lemaître)
- Einstein führte Λ daraufhin ein
- Ausdehnung des Universums beobachtet (Hubble)

Einstein: "Größte Eselei meines Lebens"

- DM könnte aus neuen **Elementarteilchen** bestehen
- Beschreibung der DE durch kosmologische Konstante (oder alternativ als "**Vakuumenergie**" E_{VAC})

Die Zahlen

Inzwischen ist der Wert der dunklen Energie gemessen.
(Nobelpreis 2011: Perlmutter, Schmidt, Riess)

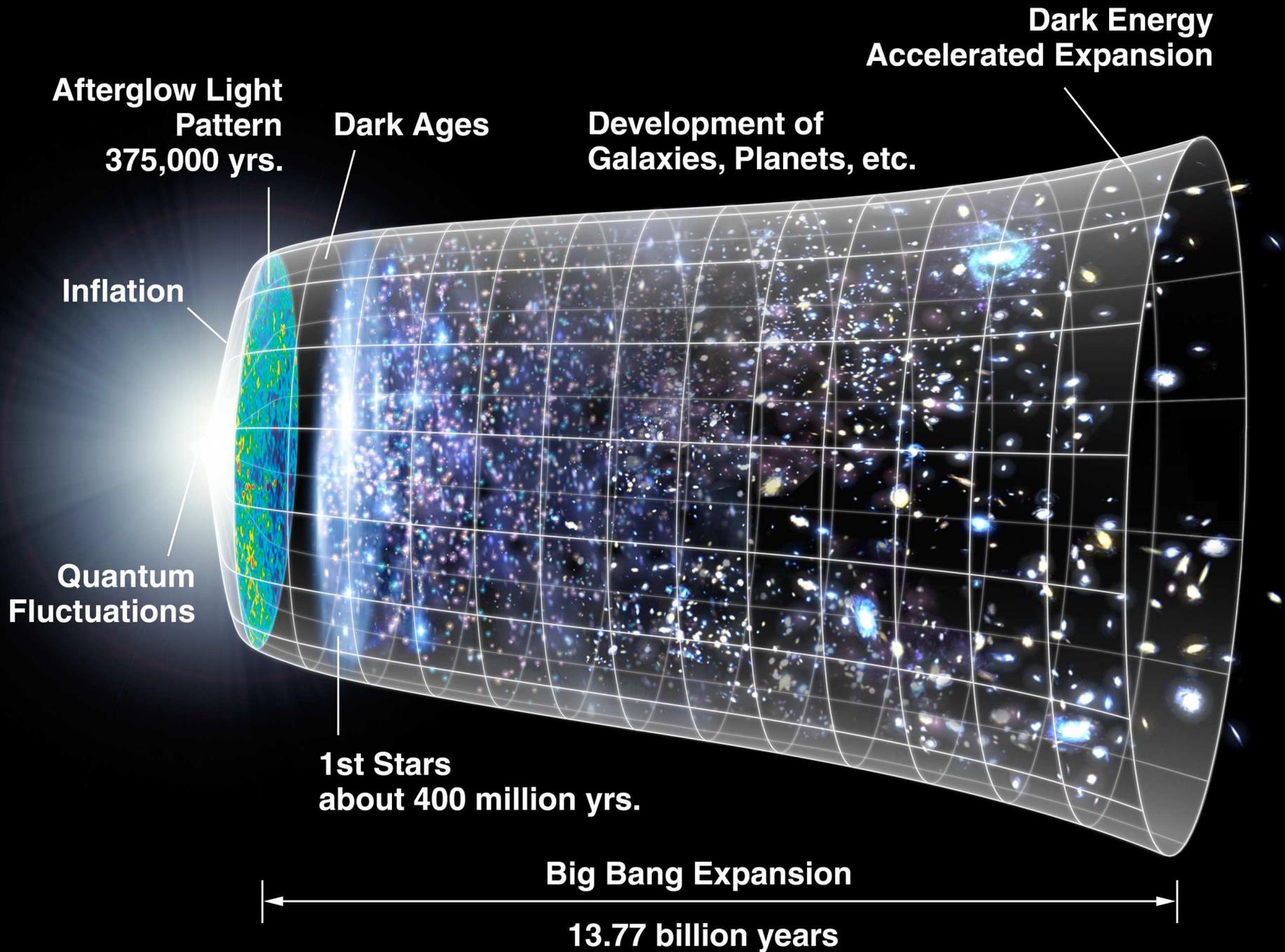
Trick analog zu Planck 1899

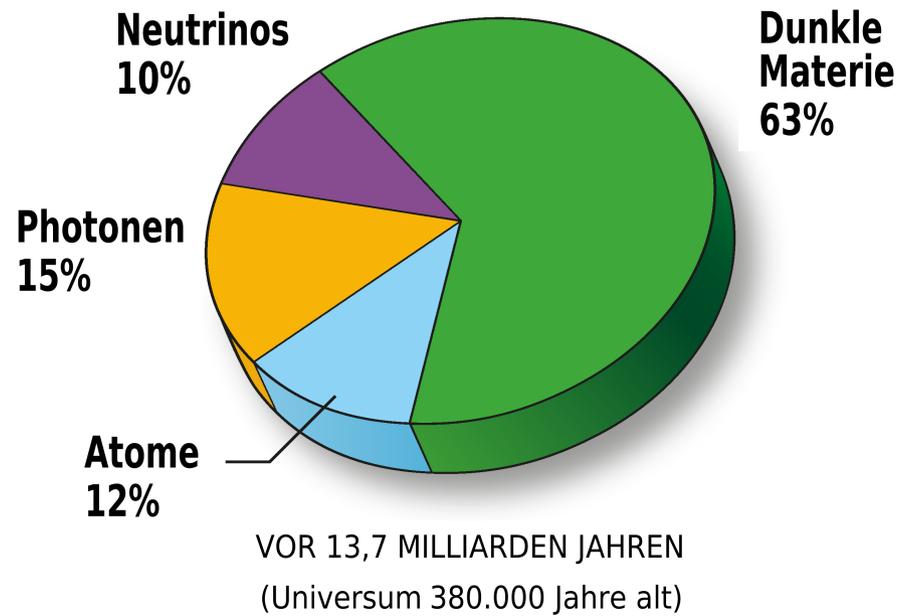
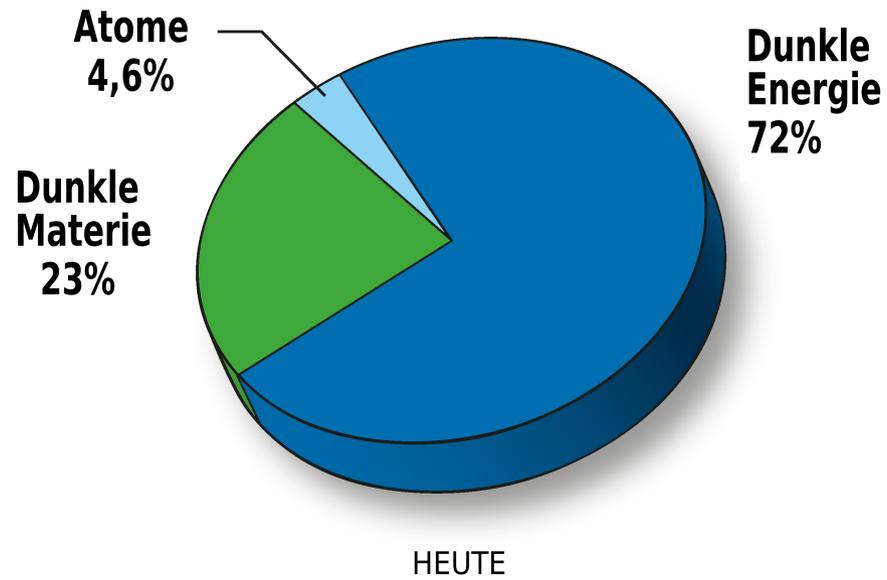
$$\Lambda \times G^2 \sim 10^{-124}$$

Gibt es einen Grund für diese extrem kleine Zahl? Dies ist bekannt als das "Problem der kosmologischen Konstanten".

- Planck-Masse $M_P \sim 10^{19}$ GeV
- Vakuumenergie $E_{\text{VAC}} \sim 10^{-3}$ eV ($\Lambda = E_{\text{VAC}}^4$)
- Kosmologisch relevante Frage: Ist Λ konstant?

Kann sich die "Vakuumenergie" (DE) zeitlich ändern?





Bausteine und Kräfte

Fragen an eine fundamentale Theorie

- Was sind die Bausteine der Materie?
- Vereinheitlichung der Wechselwirkungen?

Wo sind wir?

- 4 fundamentale Kräfte
- Quarks + Leptonen fundamental?
- **Haben die Kräfte einen gemeinsamen Ursprung?**

Vereinheitlichung der Wechselwirkungen inkompatibel mit Spektrum des Standardmodells. Neue Teilchen erforderlich.

Der Weg zur Einheit

Magnetismus

E.+M.

Elektrizität

$SU(2) \times U(1)$

Schwache WW

100 GeV

GUT

Starke Wechselwirkung (QCD)

10^{16} GeV

M_{GUT}

?

Planeten-
bahnen

Schwerkraft (Gravitation)

10^{19} GeV

M_{Planck}

Erd-

anziehung

Gravitation

- Definition des Begriffes Kraft

- Grundlegende Erkenntnisse zur Schwerkraft (Gravitation)



(I. Newton, 1642-1726)

- Bewegung der Himmelskörper und Erdanziehung haben den gleichen Ursprung und werden durch die gleichen Gesetze beschrieben!

Elektrizität und Magnetismus



J. C. Maxwell, 1831-1879

- Maxwellsche Gleichungen
- Elektromagnetische Wechselwirkungen
- Die Einheit von Elektrizität und Magnetismus
- Der Begriff des elektromagnetischen Feldes
- Endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit!

Elektromagnetische Wellen

- Elektromagnetisches Feld hat physikalische "Substanz"
- und ist nicht nur ein mathematisches Konstrukt.

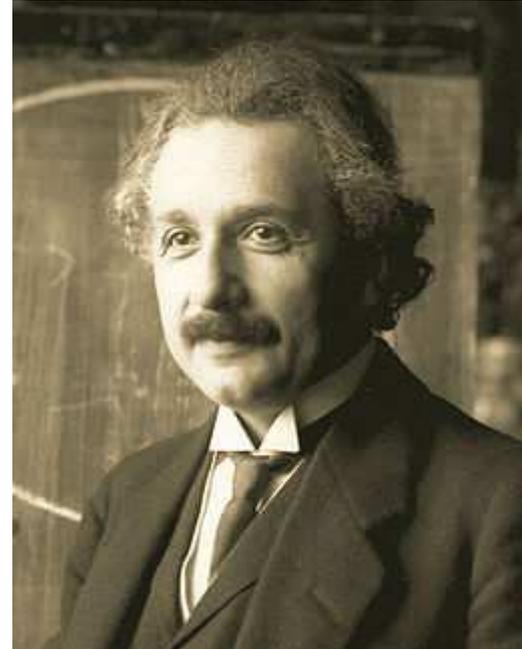


(H.Hertz, 1857-1894,
Univ. Bonn 1889-1894)

- Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen
- Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit!

Die Substanz des Feldes

- Photo-Effekt:
Lichtquanten
(Photonen)
- Spezielle
Relativitätstheorie



(A. Einstein, 1879-1955)

- Feld-Quanten als Substanz der Kraftfelder
- das Konzept des Austauschteilchens fundamentaler Wechselwirkungen

Allgemeine Relativitätstheorie

Die allgemeine Relativitätstheorie ist eine Erweiterung der Newtonschen Theorie der Gravitation

- beschrieben durch ein Gravitationsfeld
- endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit der gravitationellen Wirkung
- **Existenz von Gravitationswellen (bestätigt 2016)**
- Graviton als Feldquant?
- Gravitation als geometrische Eigenschaft (Krümmung) der Raum-Zeit

Gravitationswechselwirkungen sehr viel schwächer als elektromagnetische Wechselwirkungen.

Auf dem Weg zur "Weltformel" 1920

Zu diesem Zeitpunkt kannte man zwei fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation und Elektromagnetismus

Physik der Atome und Moleküle kann komplett durch elektromagnetische Wechselwirkungen erklärt werden.
Entwicklung des Kosmos durch Gravitation.

- Suche nach einheitlicher Theorie (Kaluza-Klein)
- aber dann wurden empirisch zwei neue offenbar fundamentale Kräfte entdeckt
- Schwache und starke Wechselwirkung im subatomaren Bereich

Fundamentale WW

- **Starke Wechselwirkung:**

Stärke 1, Reichweite 10^{-15} m

- **Elektromagnetismus:**

Stärke 10^{-2} , Reichweite ∞ , **Photon**, Spin 1

- **Schwache Wechselwirkung:**

Stärke 10^{-5} , Reichweite 10^{-17} m

- **Gravitation:**

Stärke 10^{-38} , Reichweite ∞ , **Graviton**, Spin 2

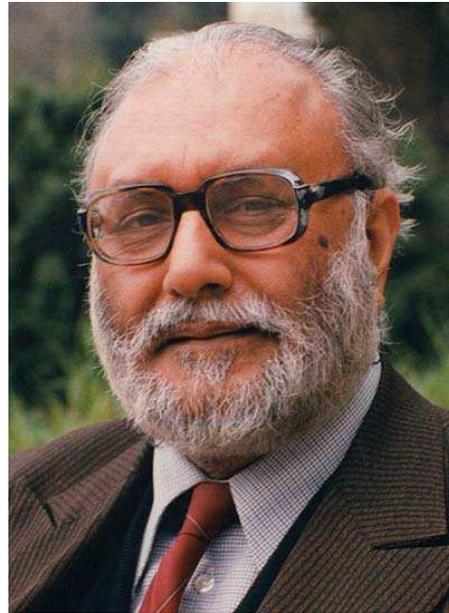
Theoretische Entwicklungen

- Quantenelektrodynamik (QED) als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen
- Konzept der Eichtheorien (Yang-Mills Theorien) als Verallgemeinerung der QED
- Die Beschreibung von schwacher und starker Wechselwirkung im Rahmen von Eichtheorien

Theoretische Entwicklungen

- Quantenelektrodynamik (QED) als quantenmechanisch korrekte Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen
- Konzept der Eichtheorien (Yang-Mills Theorien) als Verallgemeinerung der QED
- Die Beschreibung von schwacher und starker Wechselwirkung im Rahmen von Eichtheorien
- Einheitliche Beschreibung von schwacher Wechselwirkung und Elektromagnetismus im Rahmen des Standard-Modells

Glashow-Salam-Weinberg



- Beschreibung der schwachen und elektromagnetischen WW im Rahmen der Eichtheorie $SU(2) \times U(1)$
- Vorhersage der Eichbosonen W^+ , W^- , Z (1967)
- Nachweis 1983 am CERN in Genf

Fundamentale Wechselwirkungen

- **Starke Wechselwirkung:**

Stärke 1, Reichweite 10^{-15} m, **Gluonen**, Spin 1

- **Elektromagnetismus:**

Stärke 10^{-2} , Reichweite ∞ , **Photon**, Spin 1

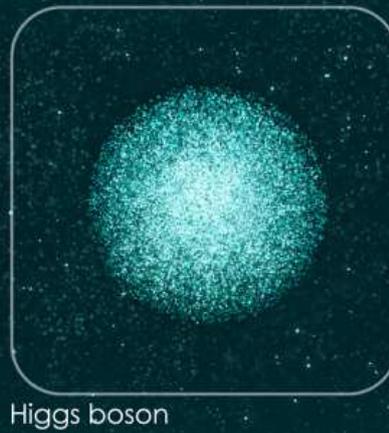
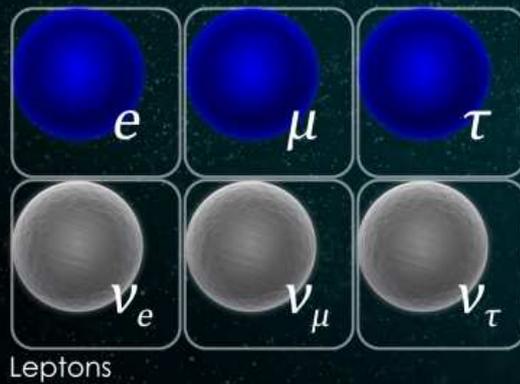
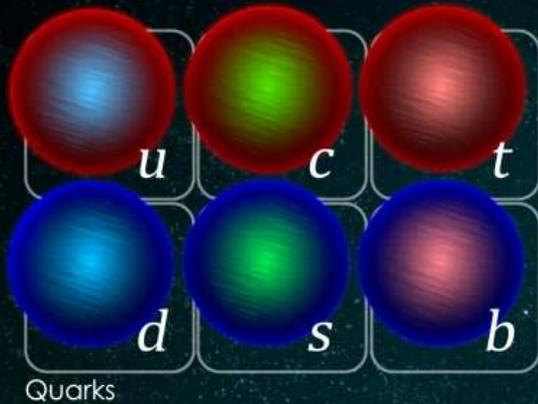
- **Schwache Wechselwirkung:**

Stärke 10^{-5} , Reichweite 10^{-17} m, **W^+ , W^- , Z** , Spin 1

- **Gravitation:**

Stärke 10^{-38} , Reichweite ∞ , **Graviton**, Spin 2

Standard Modell



Einheit der Wechselwirkungen

Magnetismus

E.+M.

Elektrizität

$SU(2) \times U(1)$

Schwache WW

100 GeV

GUT

Starke Wechselwirkung (QCD)

10^{16} GeV

M_{GUT}

?

Planeten-
bahnen

Schwerkraft (Gravitation)

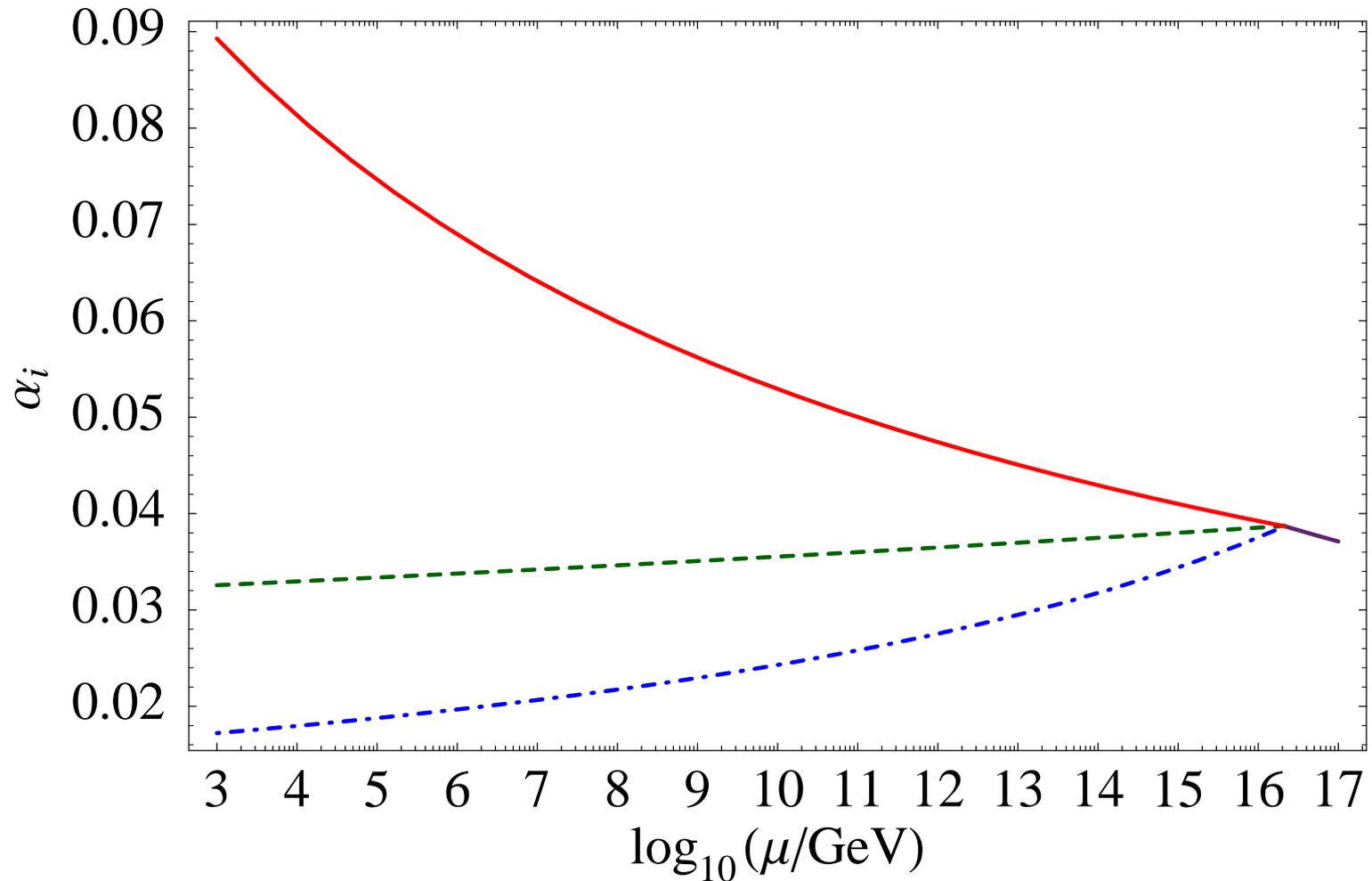
10^{19} GeV

M_{Planck}

Erd-

anziehung

Von 10^{-20} [m] bis 10^{-32} [m]



Der Weg zur "Großen Vereinheitlichung"

Weltformel 2020?

Vieles noch zu verstehen:

- Physik jenseits des SM (Vereinheitlichung der WW)
- Ursprung DM (neues Elementarteilchen)
- Ursprung DE (kosm. Konstante oder Vakuumenergie)
- inflationäres Universum
- Asymmetrie Materie - Antimaterie

Größte Probleme insbesondere im Zusammenhang mit der Gravitation. Paradoxa etwa in Bezug auf schwarze Löcher und Hawking-Strahlung.

Konsistente quantenmechanische Beschreibung der Schwerkraft steht noch aus.

Theoretische Entwicklungen

Die Suche nach der “Weltformel” (über Umwege?)

- Stringtheorie
- zusätzliche Raumdimensionen (Kaluza-Klein)
- 10-dimensionale Raumzeit und Bran-Welten
- holographisches Prinzip
- AdS/CFT Dualität

Die Gravitation ist die bisher am wenigsten verstandene der fundamentalen Kräfte!

Wir sollten auf Überraschungen gefasst sein (wie beim Problem der Sonne um 1900)

Status Quo

Wir haben theoretische Modelle, die alle bekannten Phänomene beschreiben

- Standard-Modell der Teilchenphysik
- Λ CDM-Modell der Kosmologie

Herkunft von DM und DE noch nicht verstanden.

Große Fortschritte aber auch schon in diesem Jahrzehnt.

- **Higgs-Boson 2012** (Nobel-Preis 2013)
- **Gravitationswellen 2016** (Nobel-Preis 2017)

Es sieht so aus, als wären wir auf dem richtigen Weg.

Ein langer Weg liegt vor uns

Fundamentale Größen:

- $l_P = \sqrt{\hbar G/c^3} \sim 1,6 \times 10^{-35}$ [m]: Planck-Länge
- $t_P = \sqrt{\hbar G/c^5} \sim 5,4 \times 10^{-44}$ [sek]: Planck-Zeit
- $M_P = \sqrt{\hbar c/G} \sim 2,2 \times 10^{-8}$ [kg]: Planck-Masse

Auflösung 1899 war 10^{-10} [m] und ist heute 10^{-20} [m]

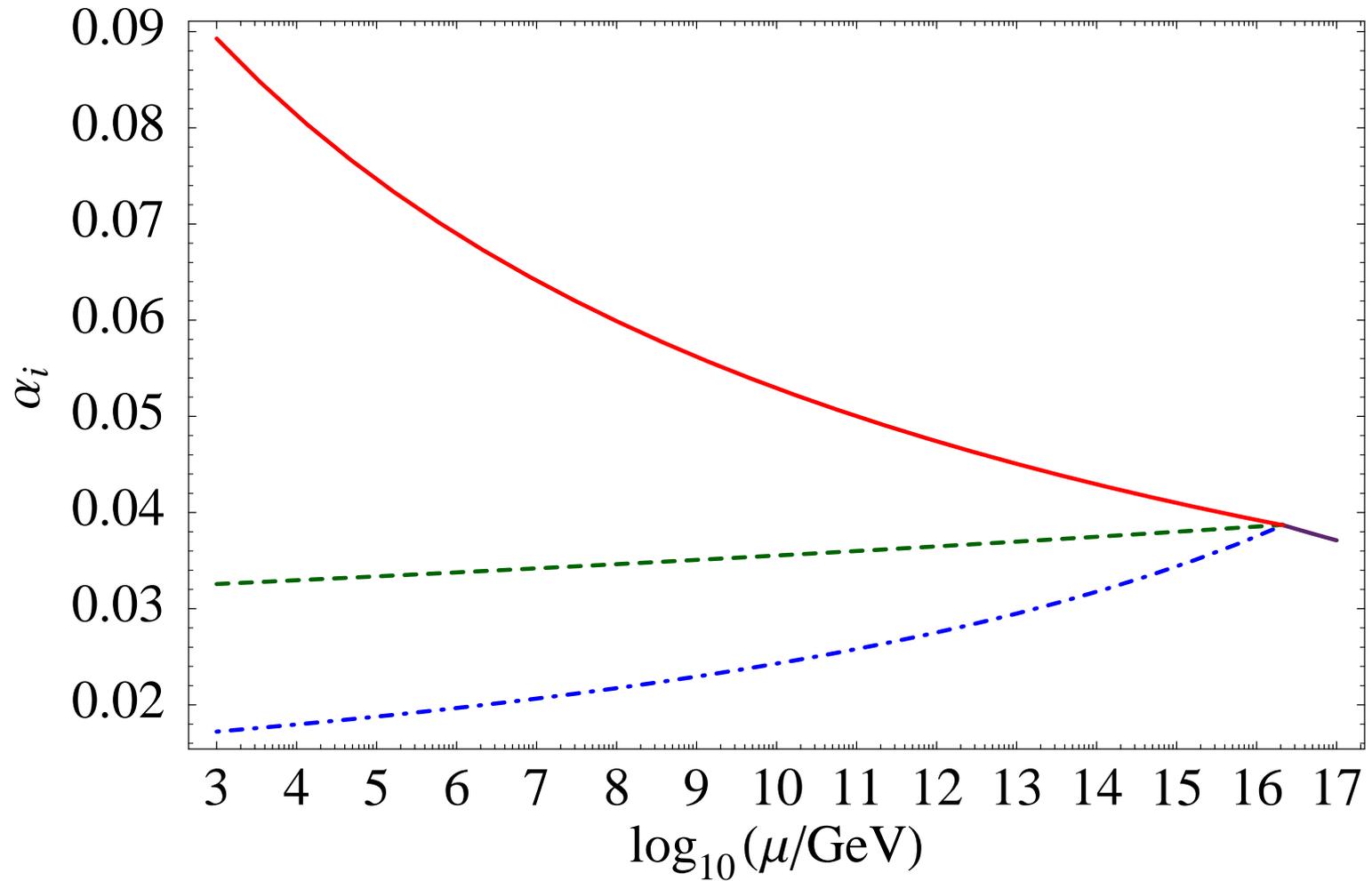
Damals wie heute bleiben Fragen und die sind zum Teil so komplex, dass wir nicht wissen wie wir überhaupt Lösungsansätze formulieren sollen!

Und es ist noch ein weiter Weg bis zur Planck-Länge!

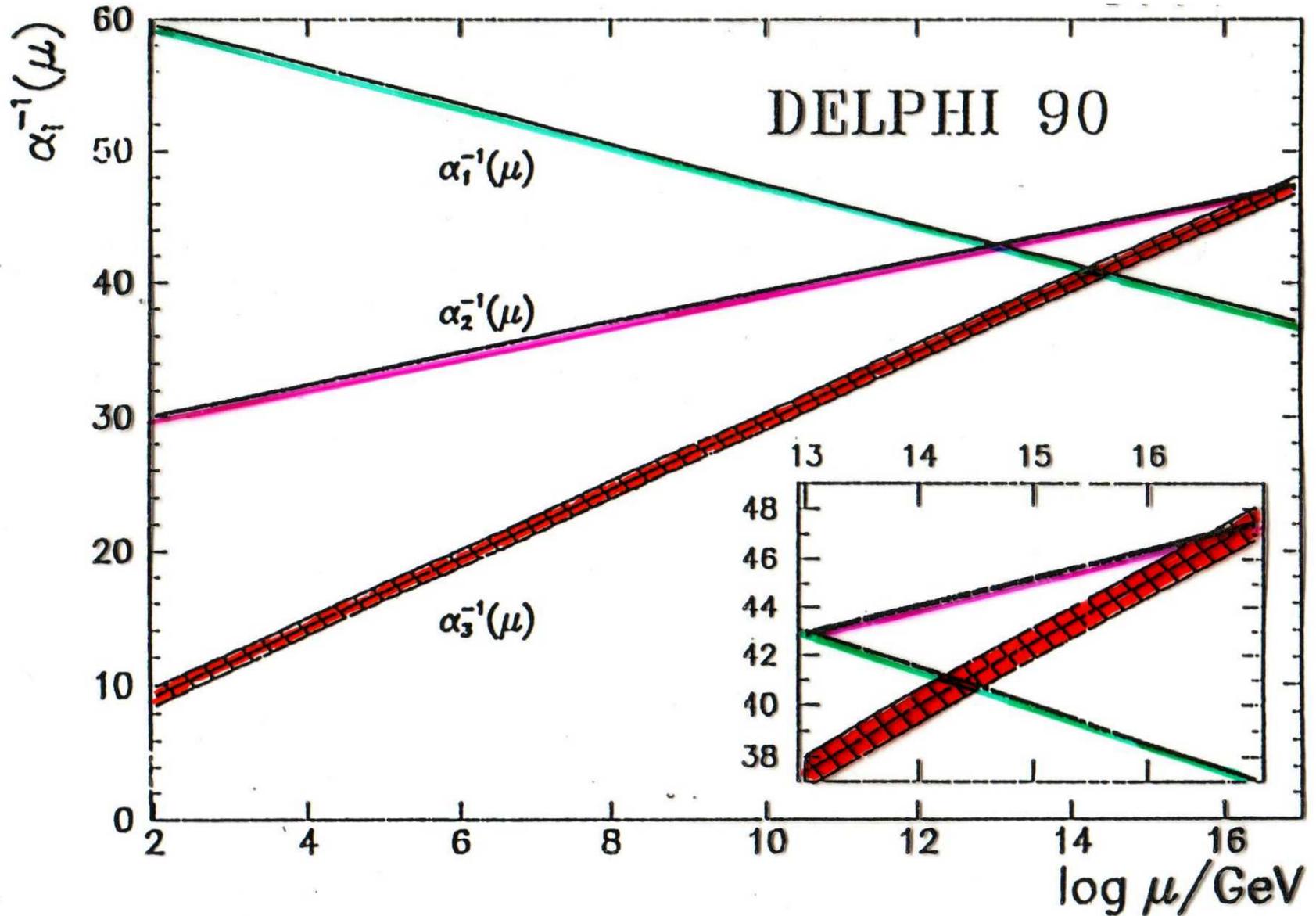
Der Weg ist das Ziel



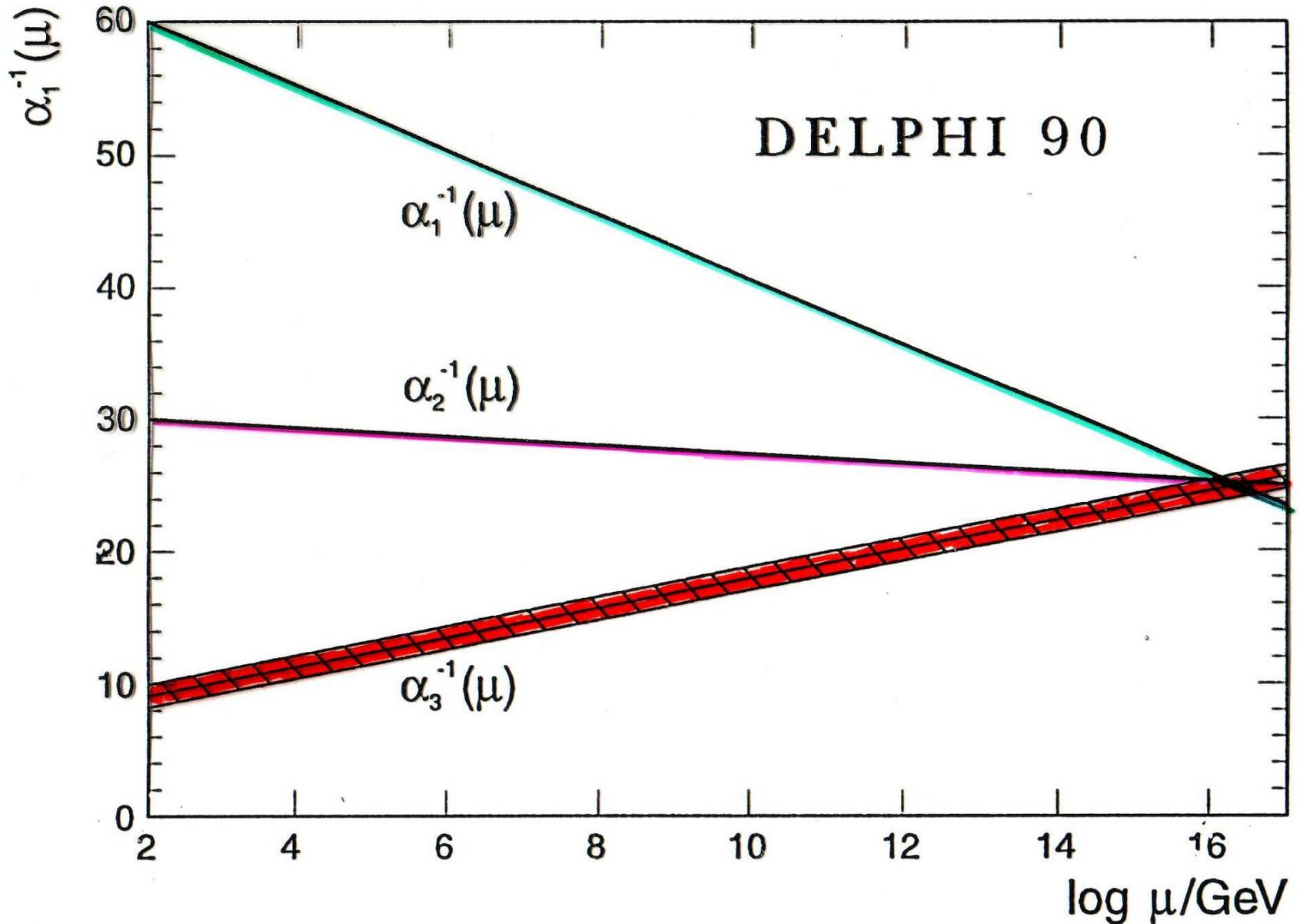
Anhang



Standard Modell



Erweitertes Standard-Modell



SM + MSSM

