

# Neues aus der Teilchenphysik

## Spektakuläres Ergebnis des Myon $g-2$ Experiments und seine Folgen

Prof. Dr. Dominik Stöckinger  
Institut f. Kern- und Teilchenphysik  
TU Dresden

Fermilab Messung:  $g=2.002\ 331\ 841\ 22(82)$

Standardmodell Rechnung:  $g=2.002\ 331\ 836\ 20(86)$

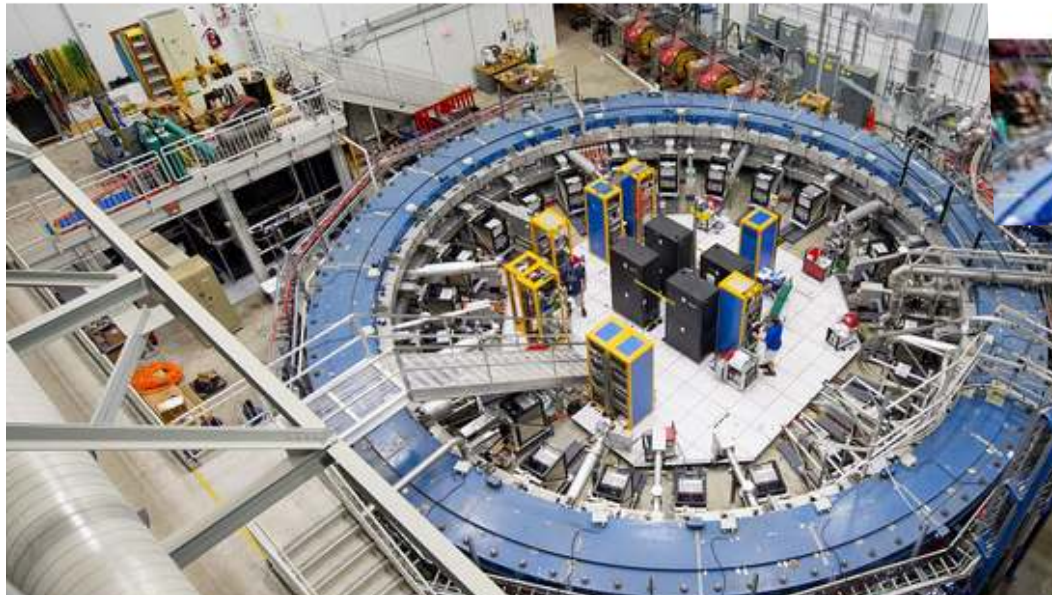
# Der Riss im Weltmodell

Eine mit Spannung erwartete Messung widerspricht dem Standardmodell der Teilchenphysik. Eine Spur zu neuen Naturgesetzen? Forscher sind begeistert, mahnen aber noch zur Vorsicht.

von [Robert Gast](#)

## Abschied vom Standardmodell?

VON MANFRED LINDINGER - AKTUALISIERT AM 07.04.2021 - 18:55



**Myon-Experiment**

### "Ich hätte es mir nicht besser erträumen können"

Das Wackeln eines Teilchens namens Myon beweist: Das Standardmodell der Physik bildet nicht die Wirklichkeit ab. Und das ist toll? Ja, sagt Physiker Dominik Stöckinger.

Interview: **Theresa Palm** und **Dagny Lüdemann**

5. April 2021, 20:09 Uhr / 452 Kommentare /

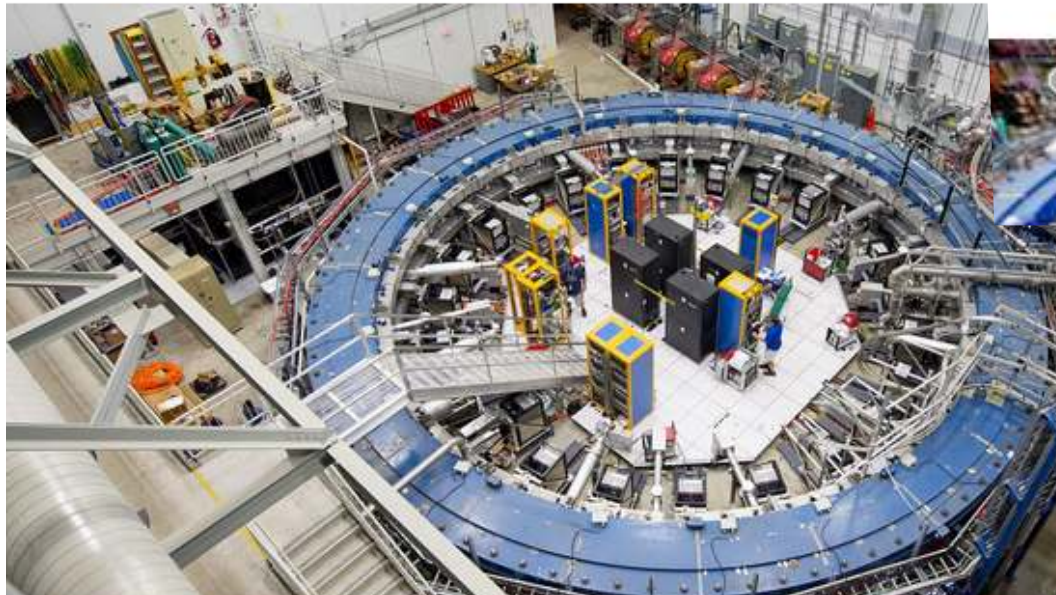
Artikel hören



# Der Riss im Weltmodell

Eine mit Spannung erwartete Messung widerspricht dem Standardmodell der Teilchenphysik. Eine Spur zu neuen Naturgesetzen? Forscher sind begeistert, mahnen aber noch zur Vorsicht.

von [Robert Gast](#)



## Abschied vom Standardmodell?

VON MANFRED LINDINGER - AKTUALISIERT AM 07.04.2021 - 18:55

Myon-Experiment

### "Ich hätte es mir nicht besser erträumen können"

Das Wackeln eines Teilchens namens Myon beweist: Das Standardmodell der Physik bildet nicht die Wirklichkeit ab. Und das ist toll? Ja, sagt Physiker Dominik Stöckinger.

Interview: **Theresa Palm** und **Dagny Lüdemann**

8. April 2021, 20:09 Uhr / 452 Kommentare /

Worum geht es hier?  
Es geht ums große Ganze!

Fermilab Messung:  $g=2.002\ 331\ 841\ 22(82)$

Standardmodell Rechnung:  $g=2.002\ 331\ 836\ 20(86)$

# Dresdner Arbeitsgruppe...

y Dresden Group A

Stöckinger-Kim

häfer (Diploma: 2-loop MSSM)

n Weitershausen (Diploma: 2-

chsel (Diploma: renormalization f

Gnendiger (PhD: 2-loop SM ar

n Passehr (Diploma: 2-loop fermion/sfermion MSSM)

ther (D

ach (D

Krpou

ts predi

neschk

dtner (

bell (Ba

l model)

reifent

Fagnoli (Brazil: 2-loop fermion/sfermion MSSM)

herchiglia (Brazil: 2-loop two-Higgs doublet model)

Kotlarski (postdoc: MRSSM)

rt (Bachelog: Vector-like Leptons)



Dominik Stockinger – Institut für Kern- und Teilchenphysik, I U Dresden

# Theoretische Physik...

Glasgow 2007



Muon g-2 Theory Initiative est. 2017

<https://muon-gm2-theory.org>

...gies for obtaining the **best theoretical predictions for these hadronic corrections** to the experimental result."

...workshops in 2017-2020, (virtual) plenary workshop June 28 – July 2, 2021 hosted by KEK (Ja

...ated 10 June 2020 (132 authors, from 82 institutions, in 21 countries)

...ous magnetic moment of the muon in the Standard Model"

... et al, arXiv:2006.04822, Phys. Repts. 887 (2020) 1-166]

Group photo from the Seattle workshop in September 2019



Thomas Teubner

1. experimentelles Kollaborationstreffen 2011; nun: 190 Personen, 7 Länder



Dominik Stöckinger – Institut für Kern- und Teilchenphysik, TU Dresden

# g und g-2 des Myons

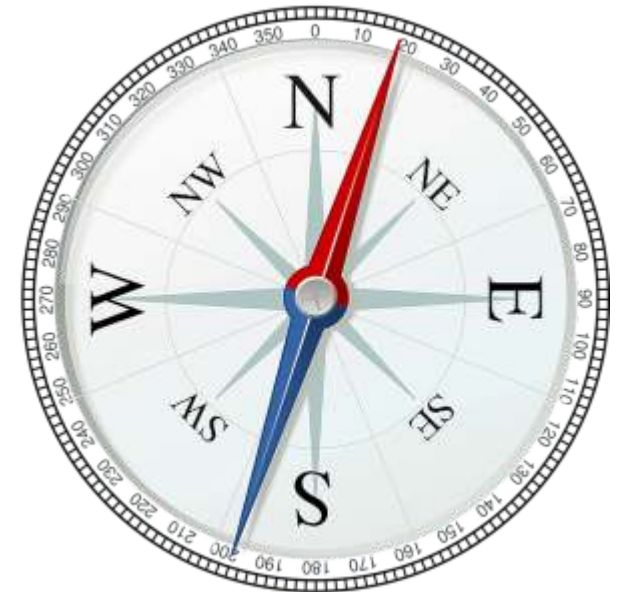
Fermilab Messung:  $g=2.002\ 331\ 841\ 22(82)$

Standardmodell Rechnung:  $g=2.002\ 331\ 836\ 20(86)$

- Was ist g? Was sind Myonen?
- Was ist unser „Weltbild“?
- Was bedeutet das Ergebnis? Warum die Begeisterung?

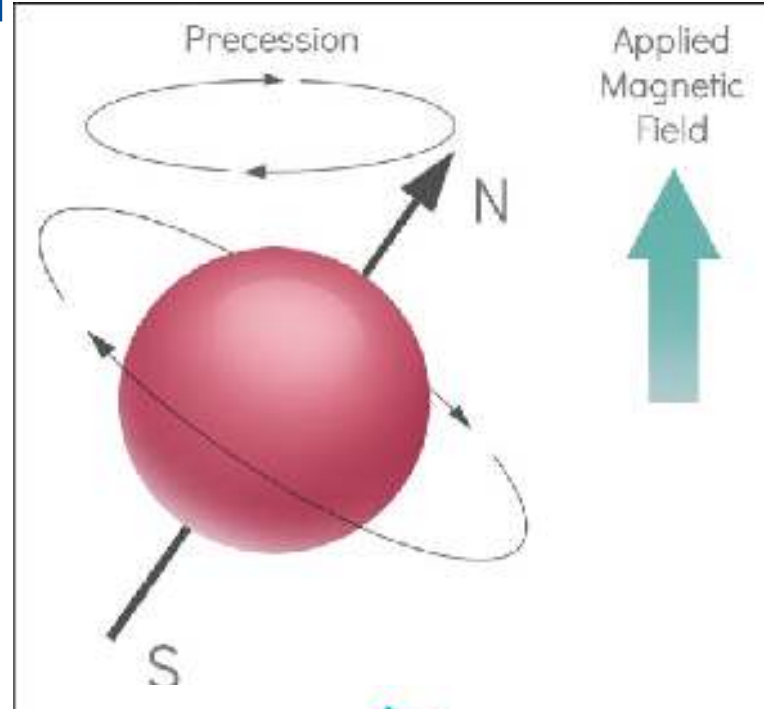
# Was ist $g$ ?

- Teilchen besitzen:
  - Masse
  - Elektrische Ladung
  - Magnetisches Moment,  $g$
- 
- Beim Myon kann  $g$  gemessen und berechnet werden-sensitiv auf Quantenfluktuationen aller Teilchen!

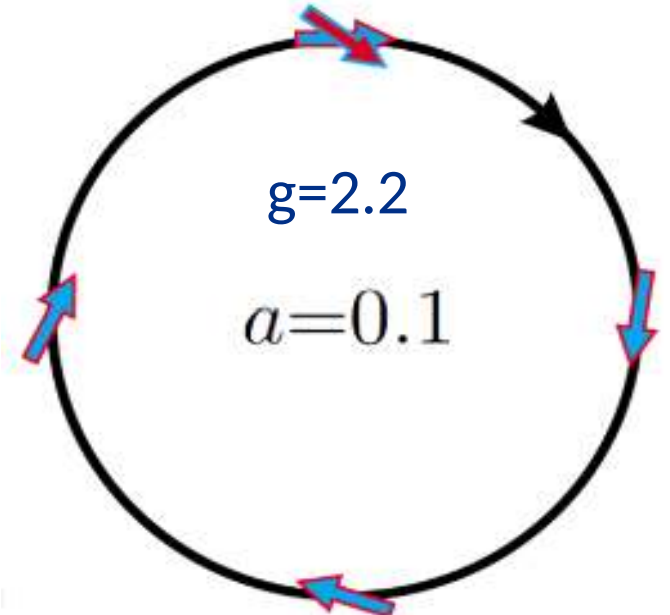
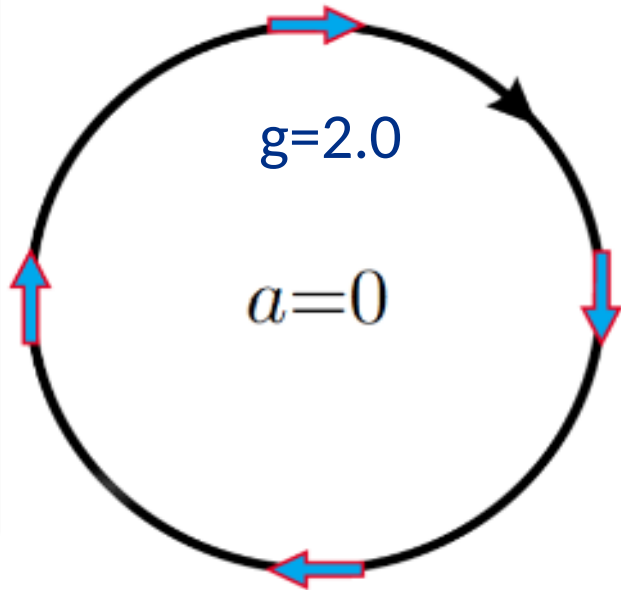


<https://www.schlauerlernen.de/magnetfeld/>

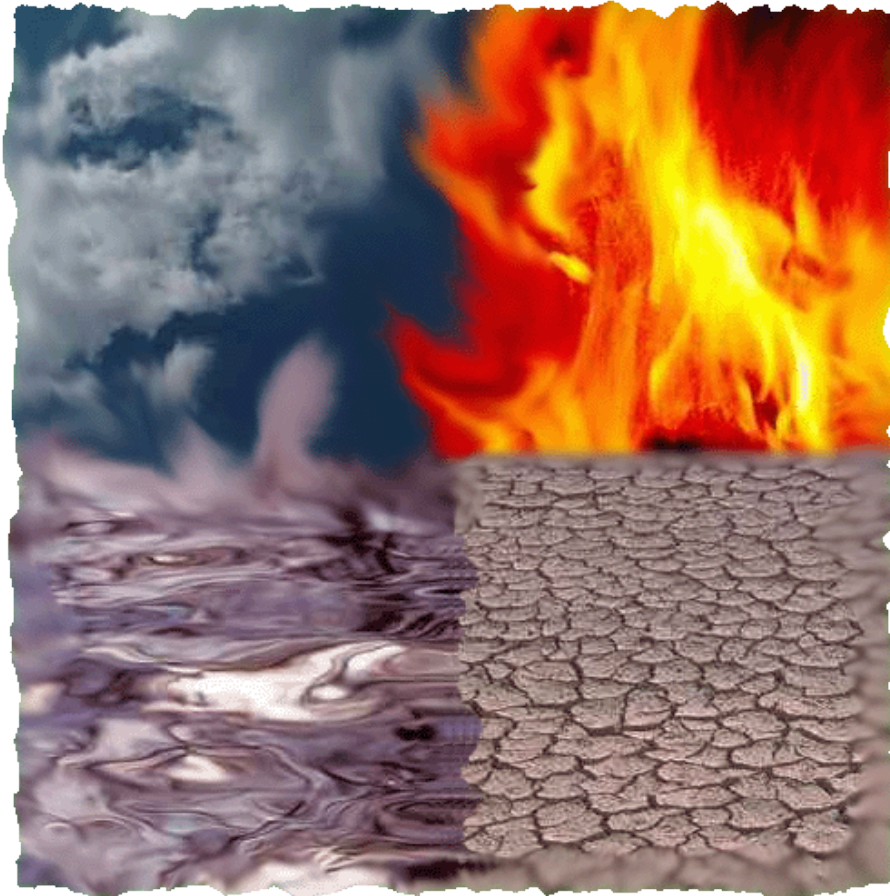
# Erklärung von g: Kreisel und Myon



Kreisel-  
geschwindigkeit  
intrinsisch  
beschrieben  
durch eine Zahl:  
**g**

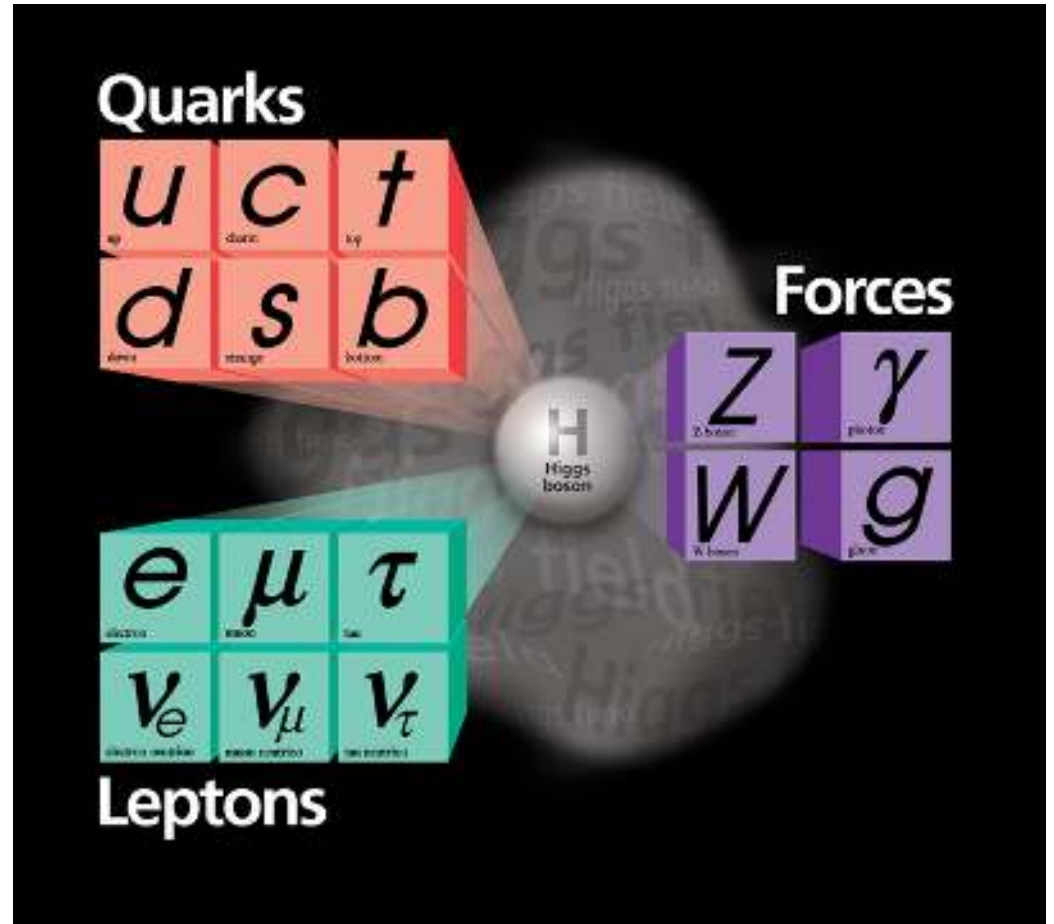
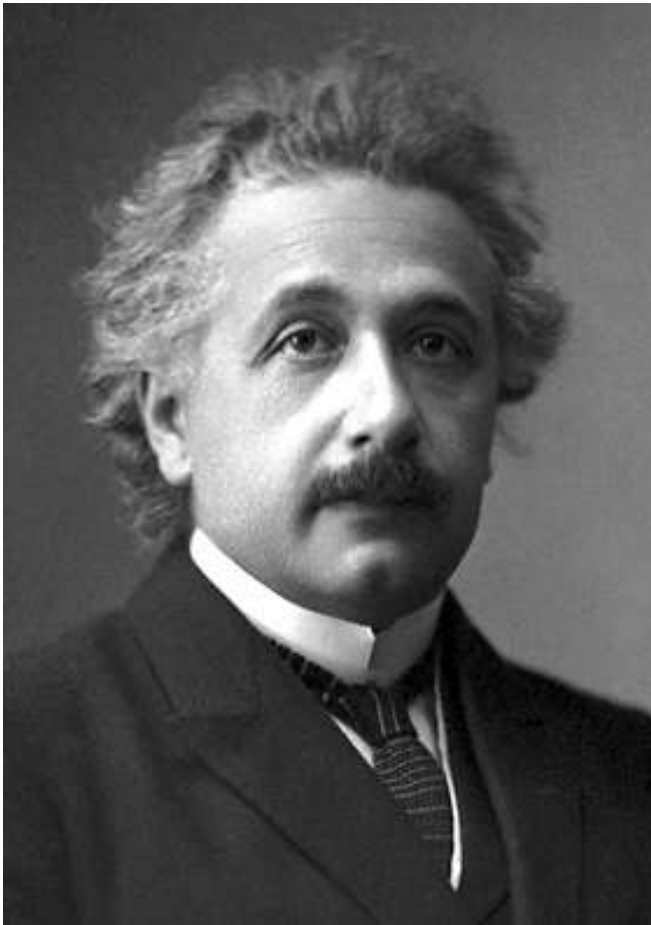


# Fundamentale Physik

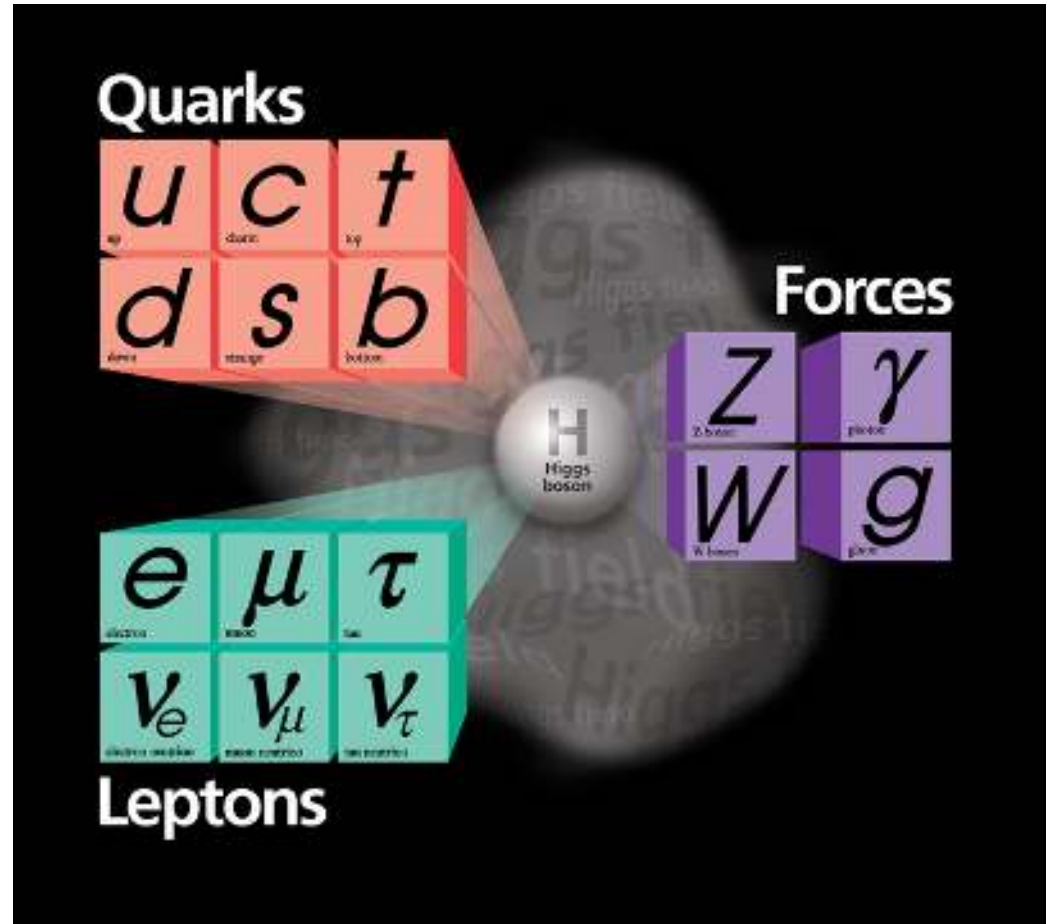
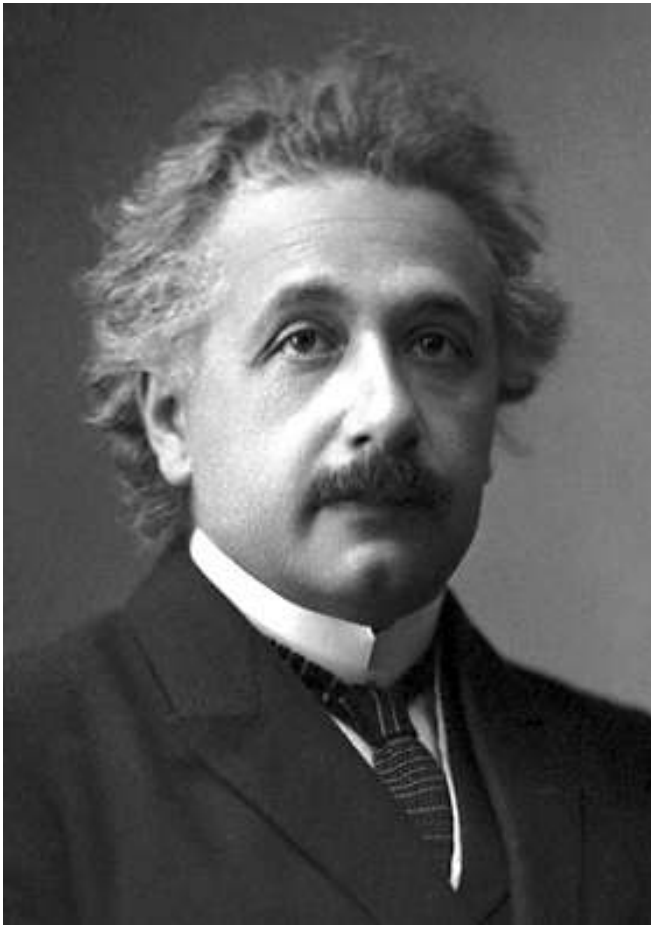


Grundfrage der Menschheit: **letztgültige, grundlegende Naturgesetze**

# „Unser Weltbild“

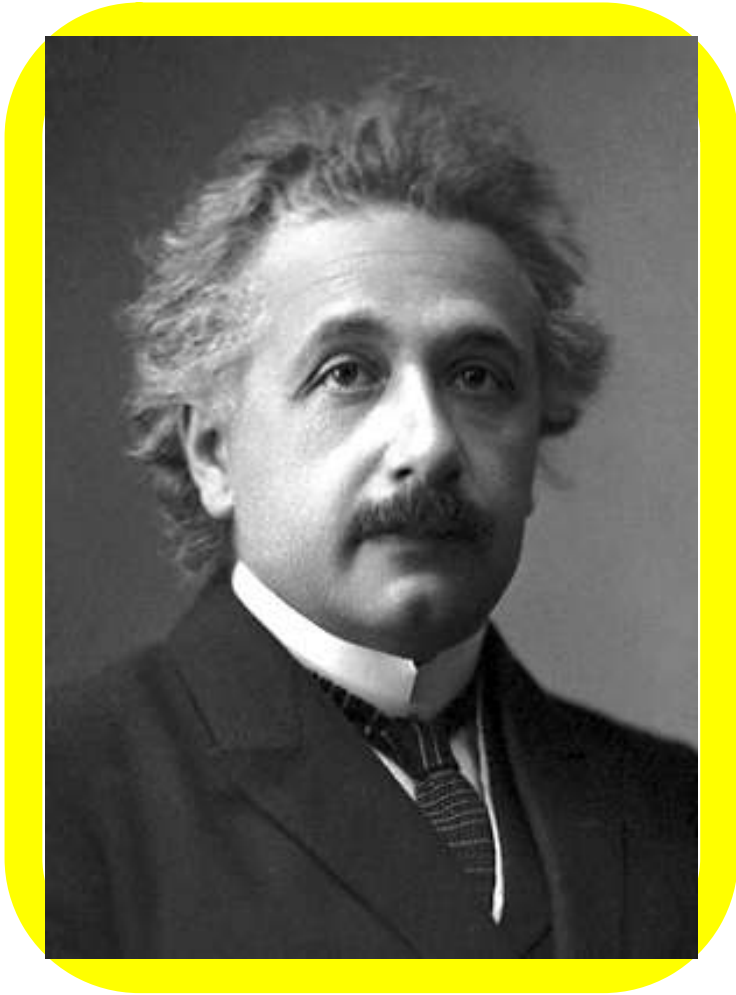


# „Unser Weltbild“

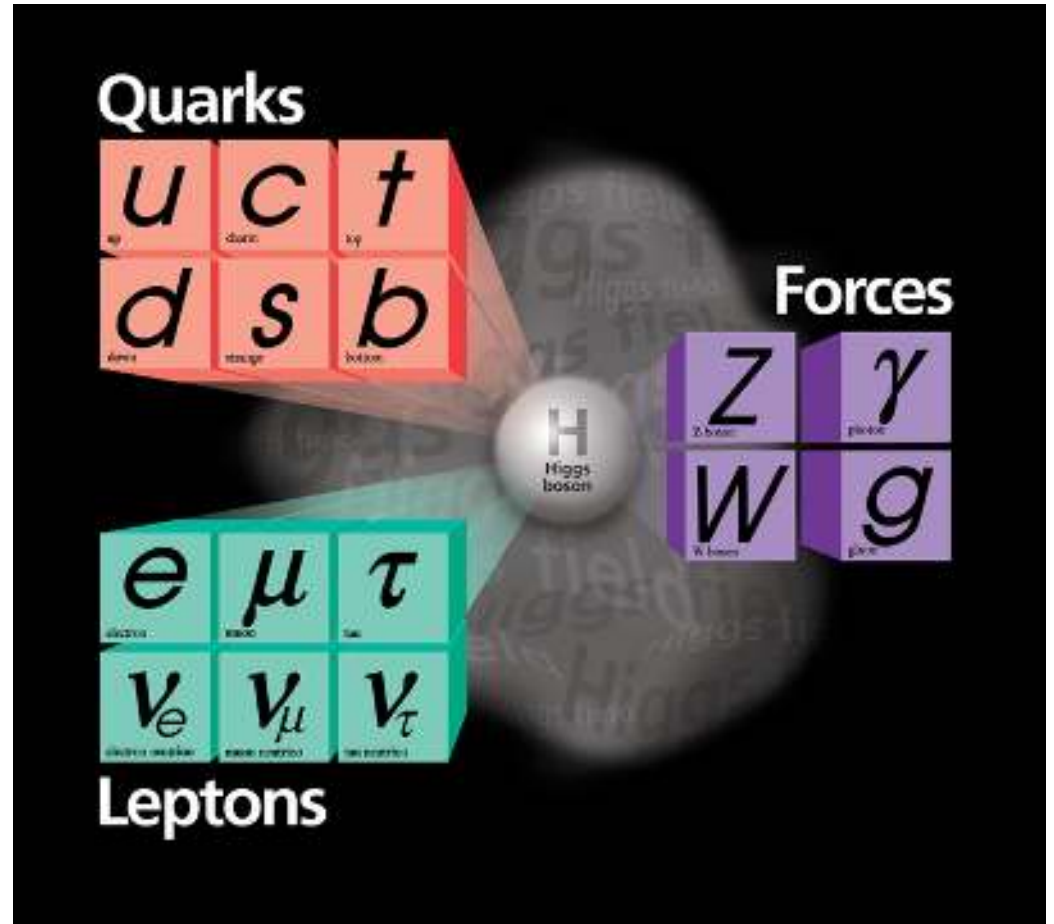


„Alle“ Naturphänomene lassen sich auf 4 Kräfte zurückführen und durch zwei Theorien beschreiben: Relativitätstheorie (100 Jahre alt) und Standardmodell (50 Jahre alt)

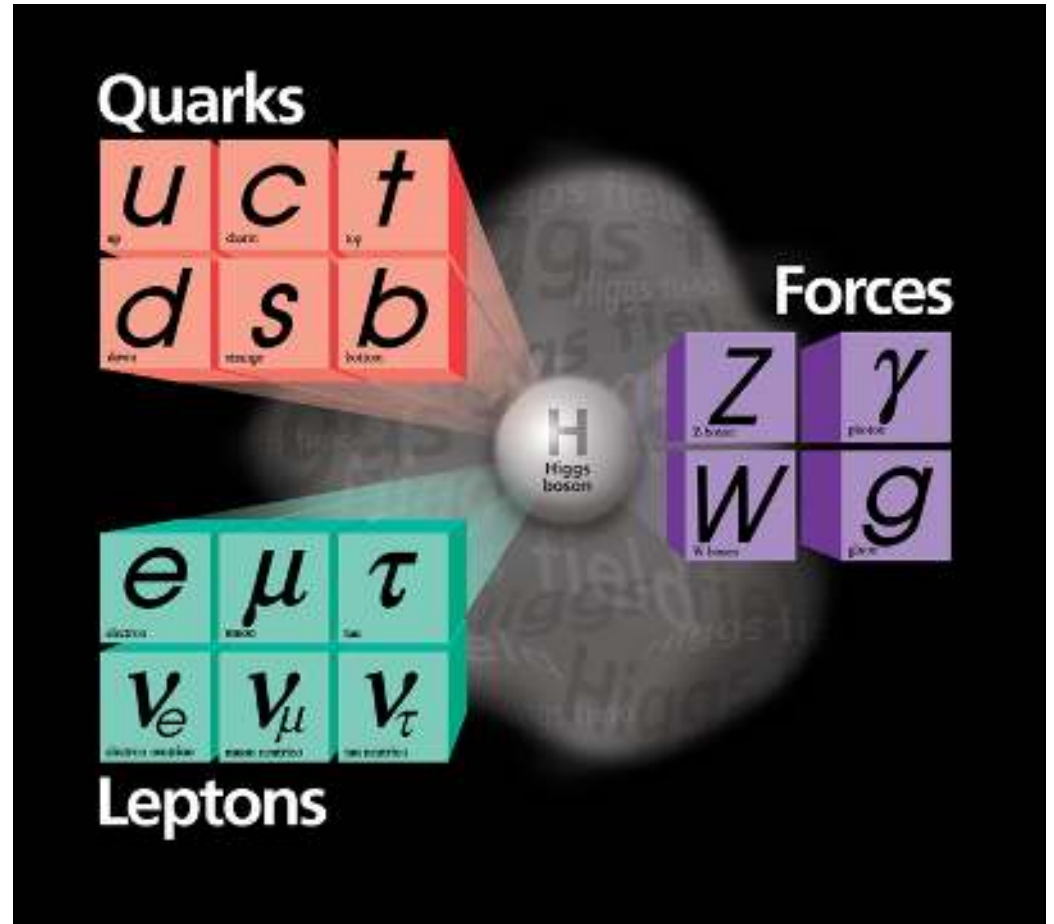
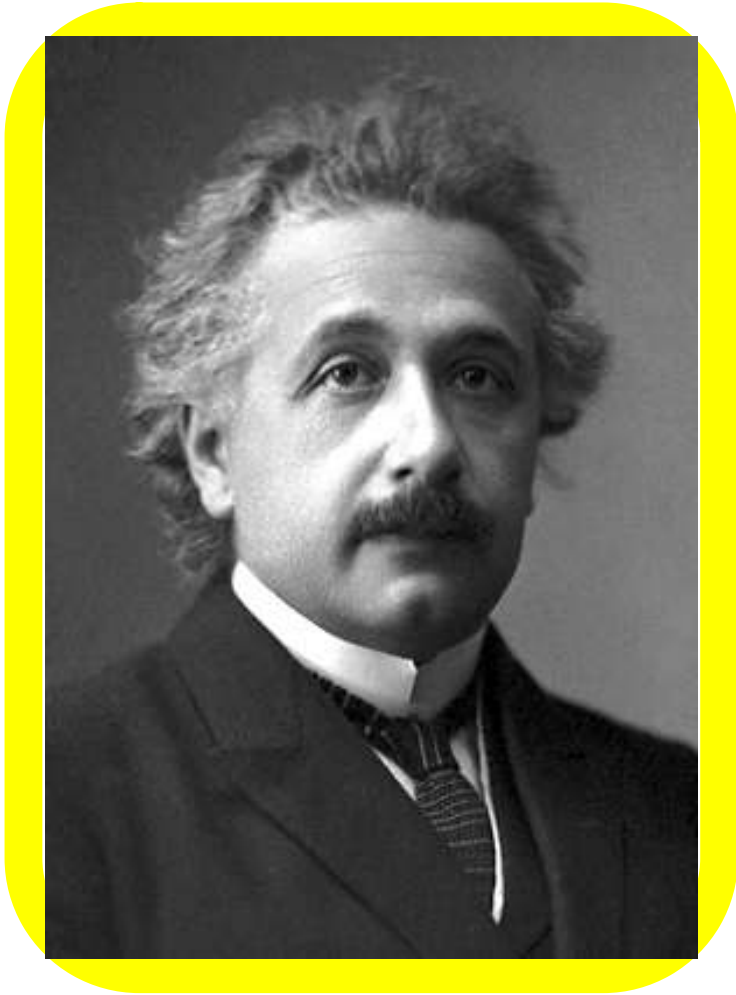
# „Unser Weltbild“



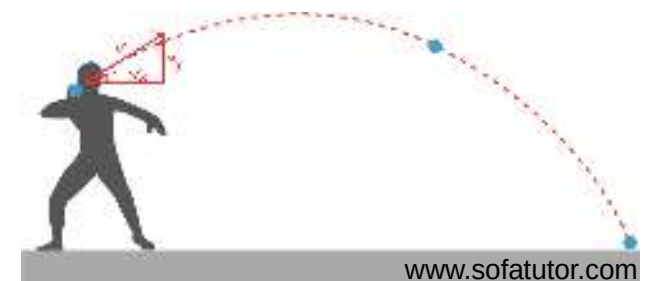
1. Schwerkraft



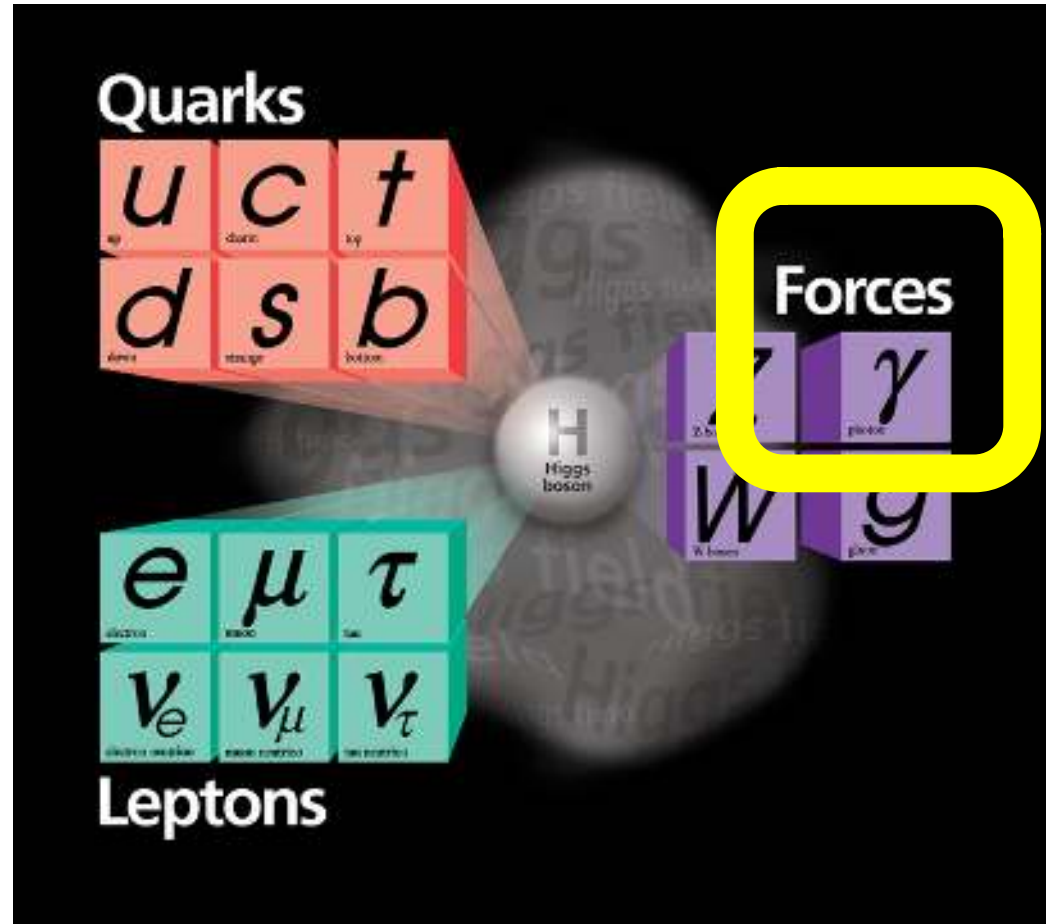
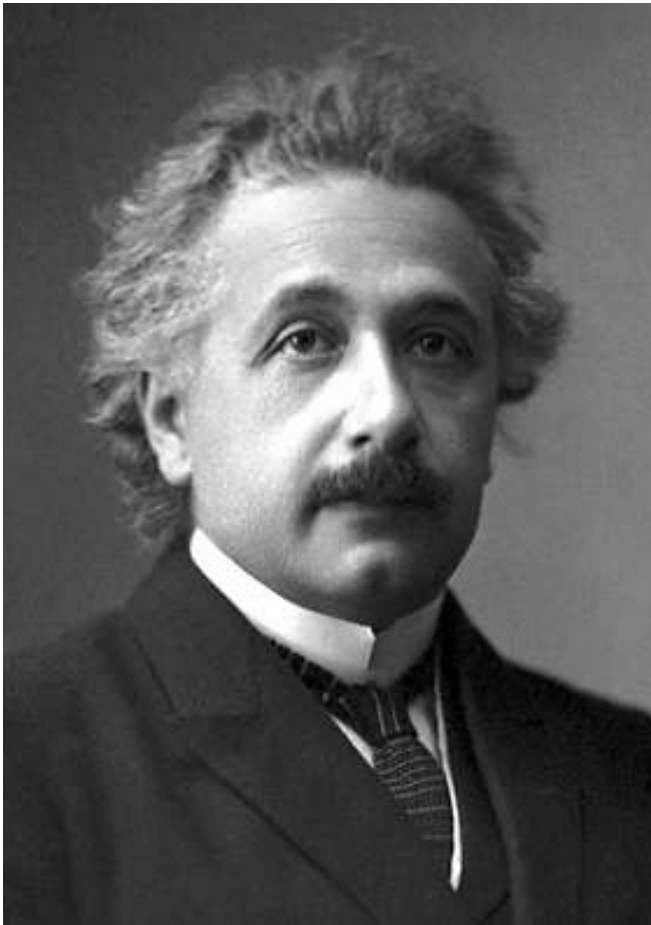
# „Unser Weltbild“



## 1. Schwerkraft

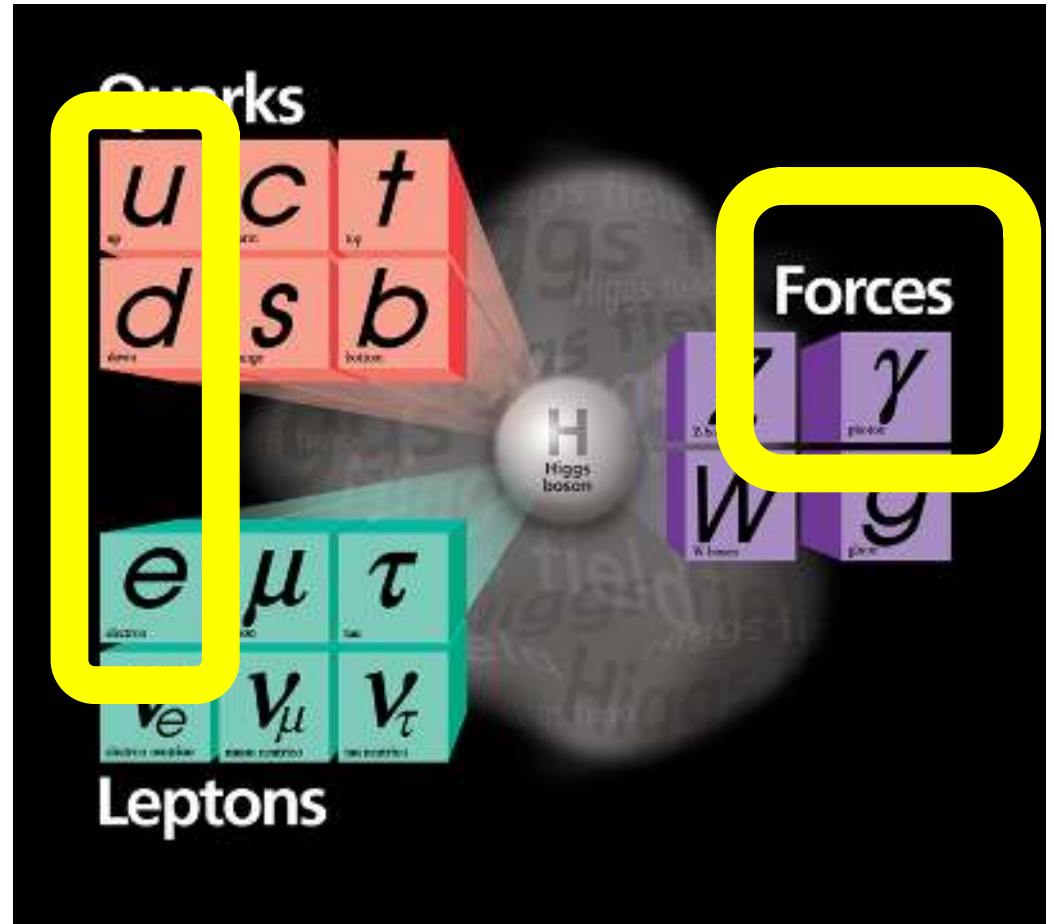
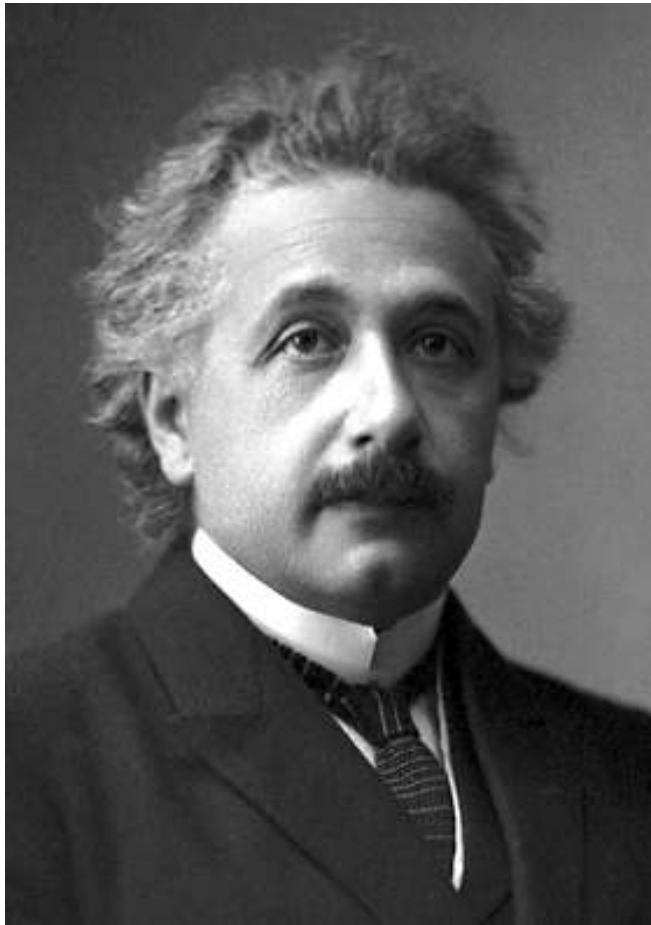


# „Unser Weltbild“



2. Elektromagnetismus

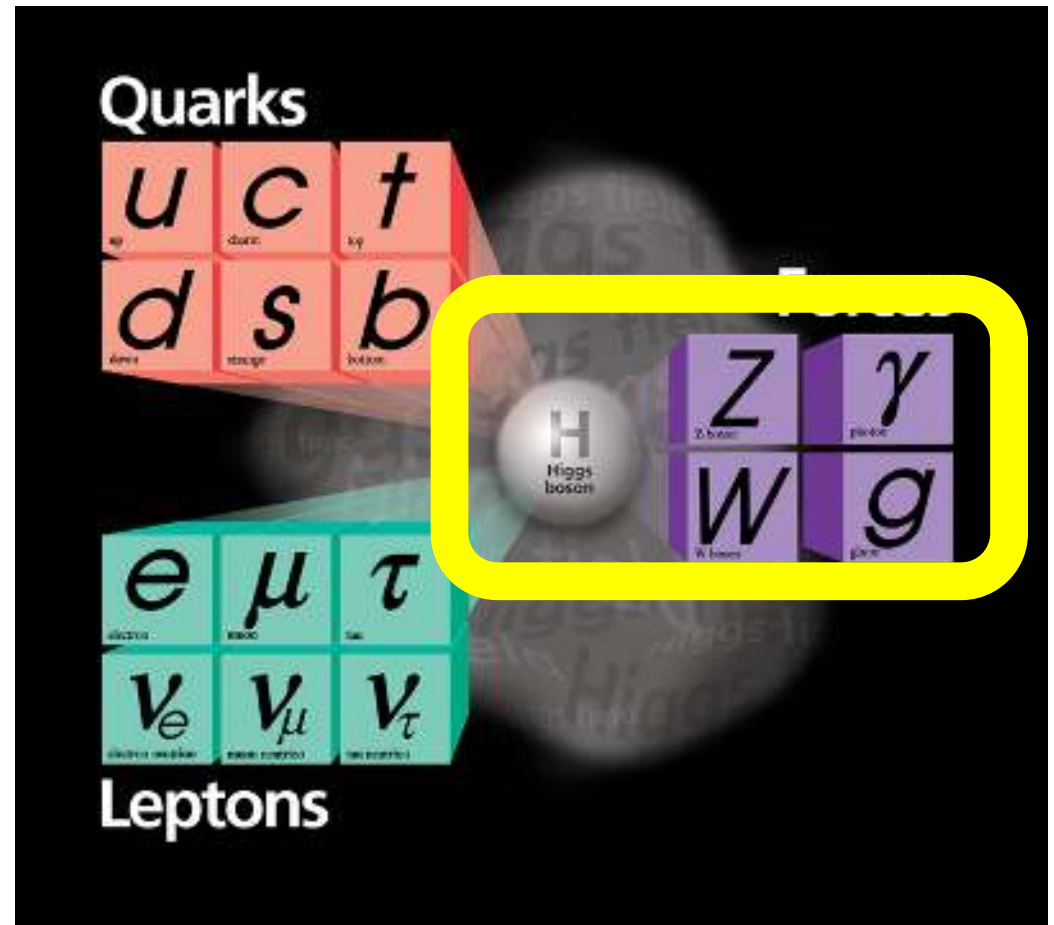
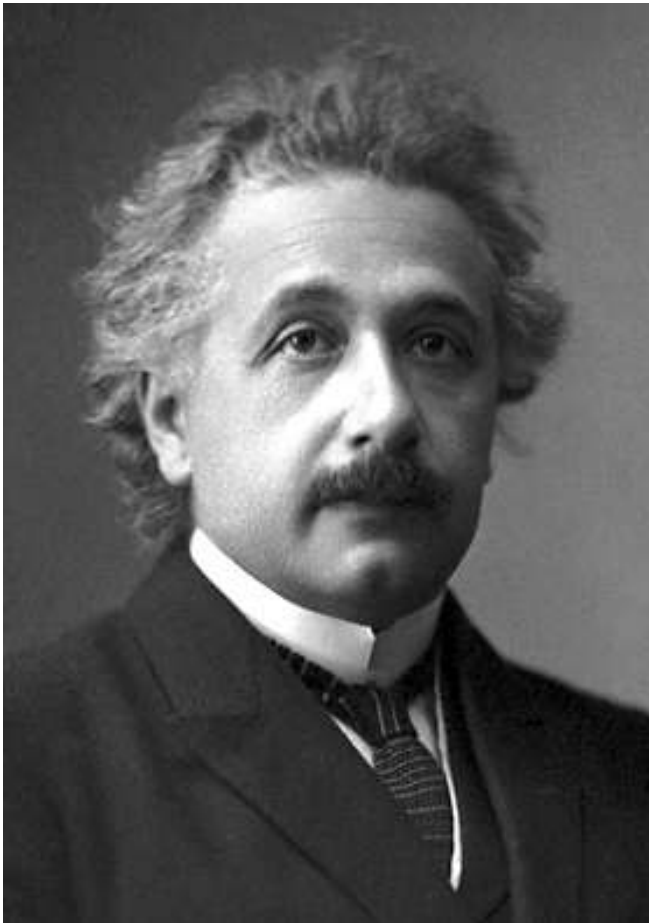
# „Unser Weltbild“



## 2. Elektromagnetismus

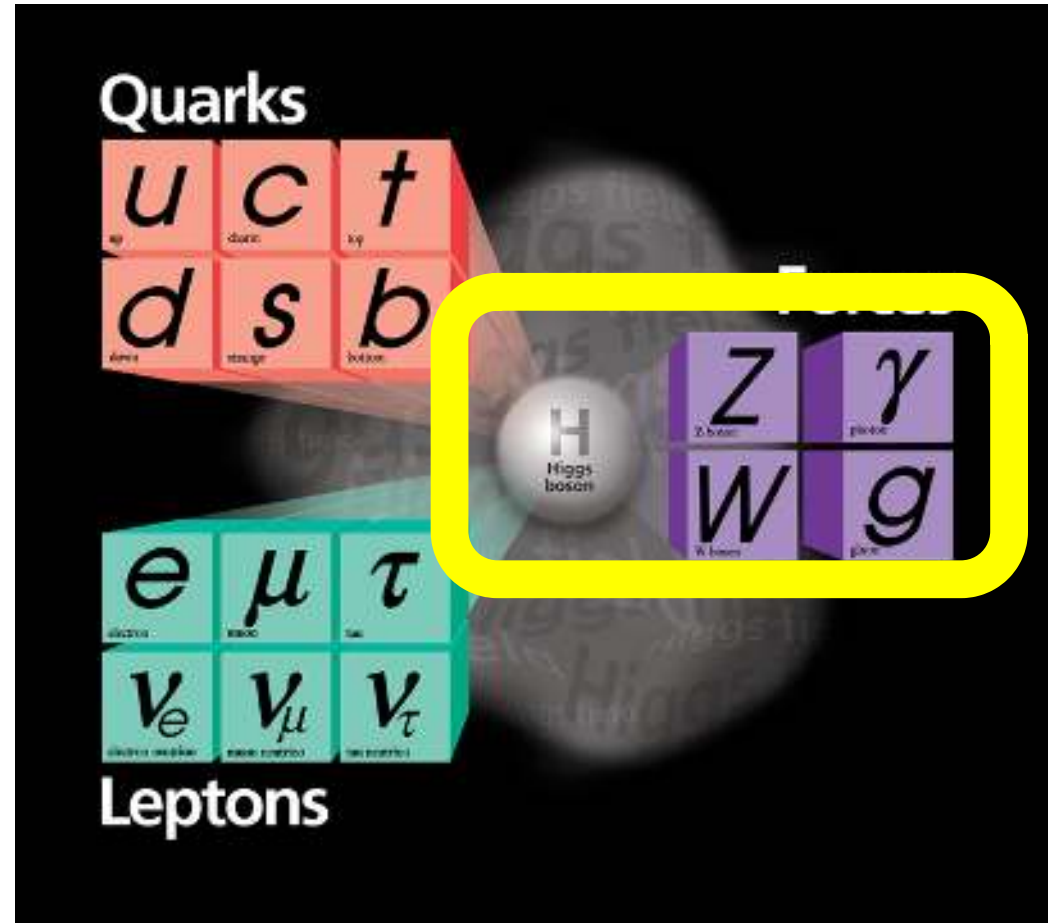
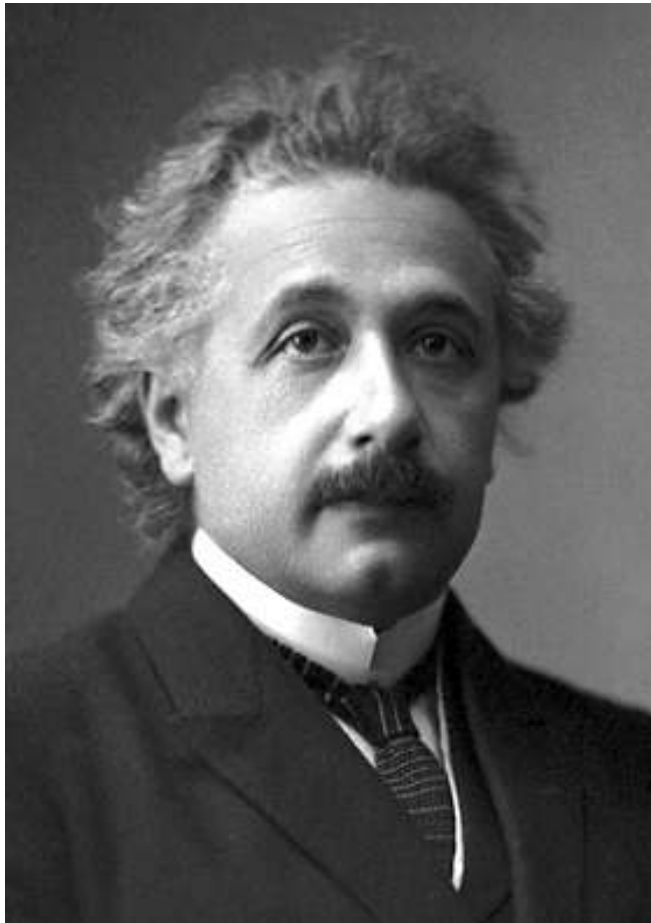


# „Unser Weltbild“

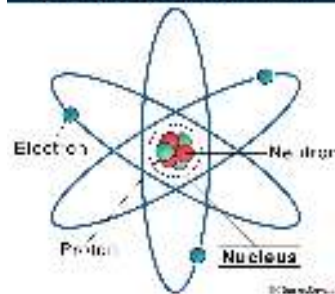


3. schwache Wechselwirkung
4. starke Wechselwirkung

# „Unser Weltbild“

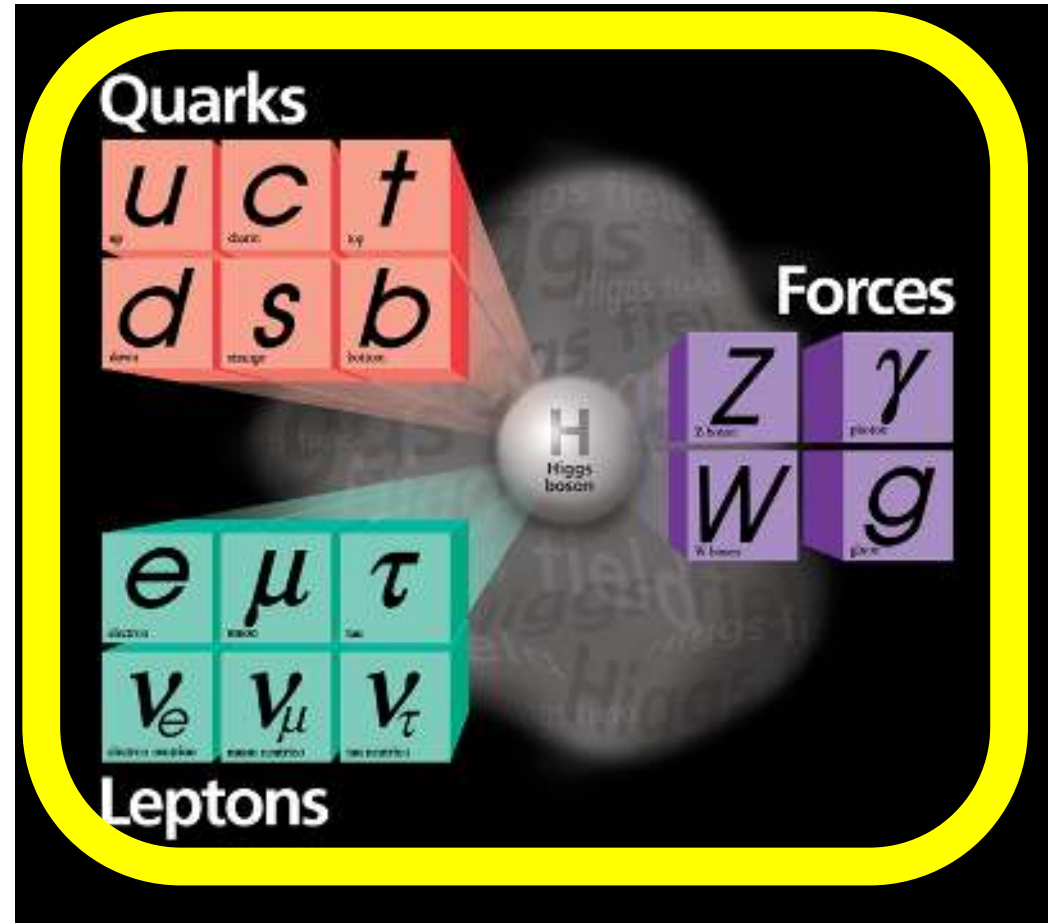
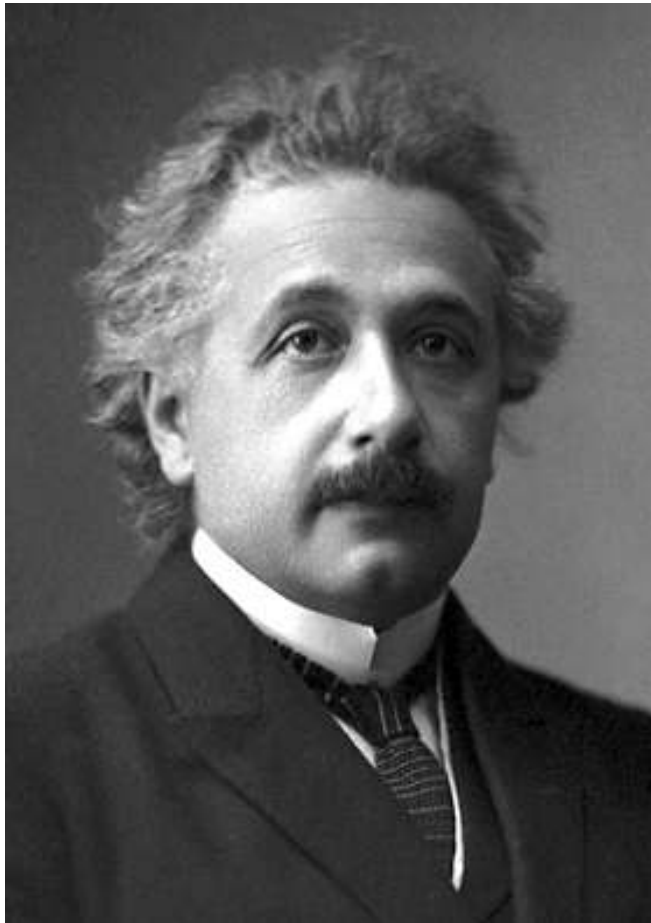


Atomic Nucleus

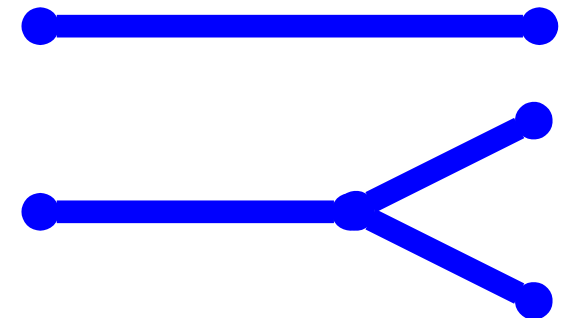


3. schwache Wechselwirkung
4. starke Wechselwirkung

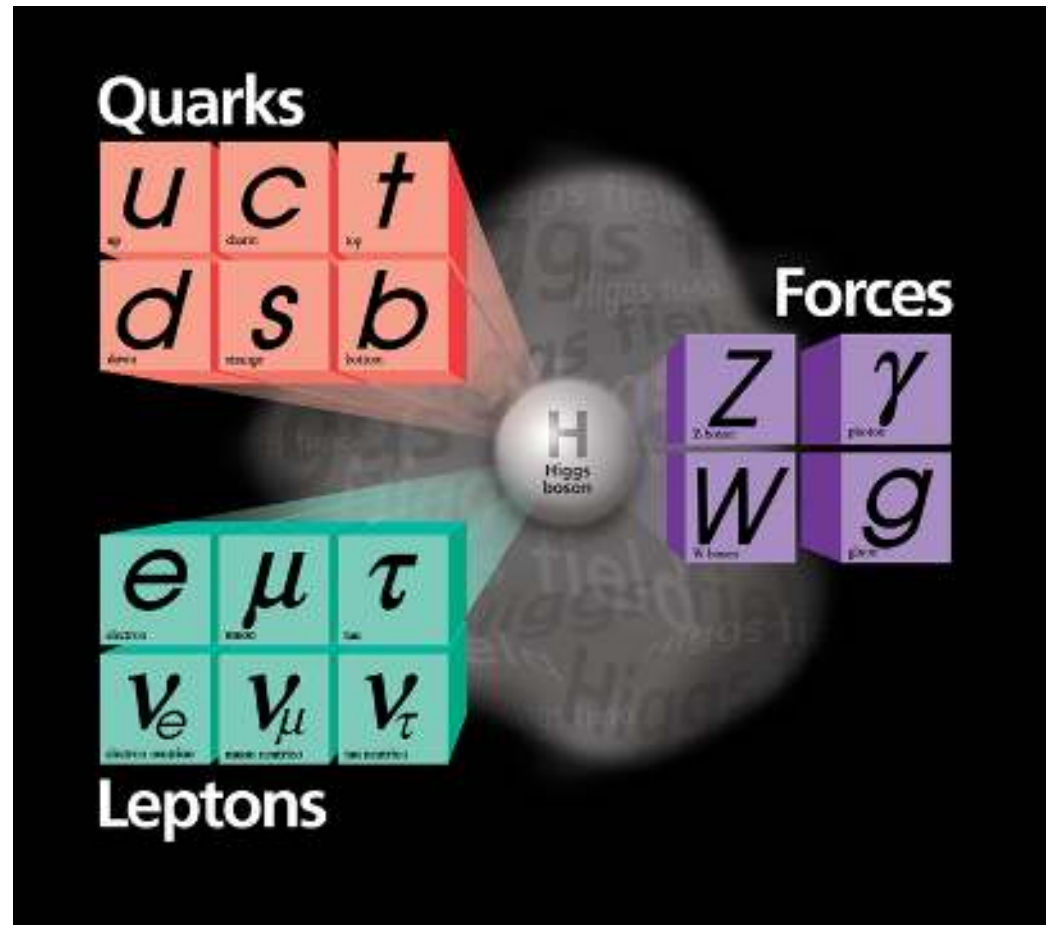
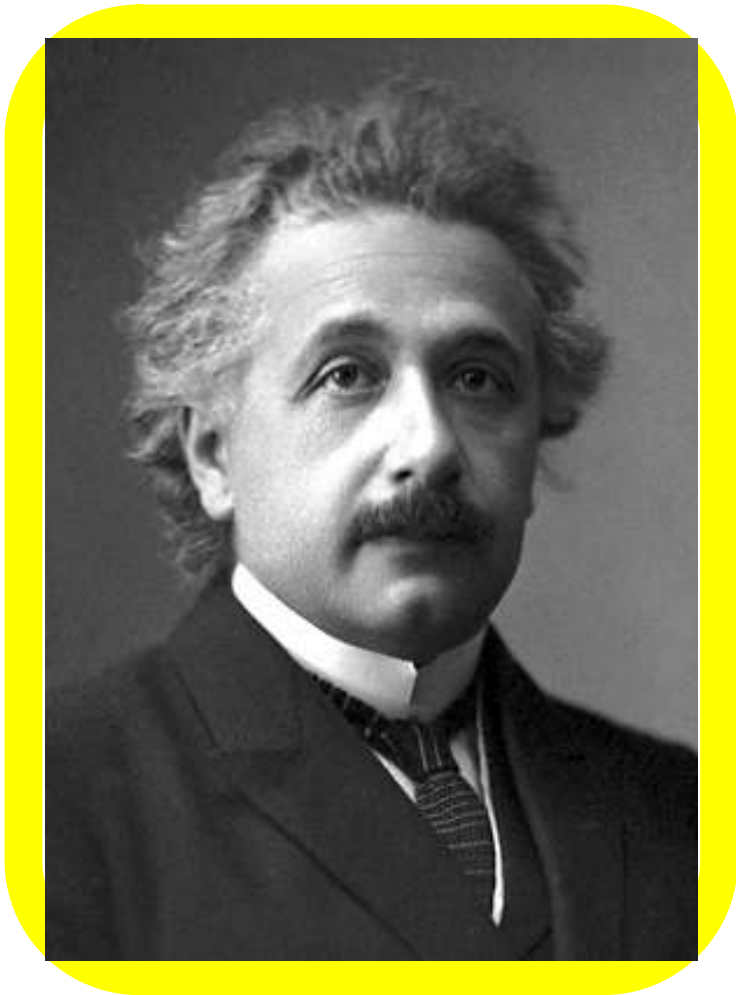
# „Unser Weltbild“



Erklärung Standardmodell:  
Teilchen=Wechselwirkungen!  
Nur zwei „Elementarprozesse“:  
beschreibt „alle“ Phänomene!



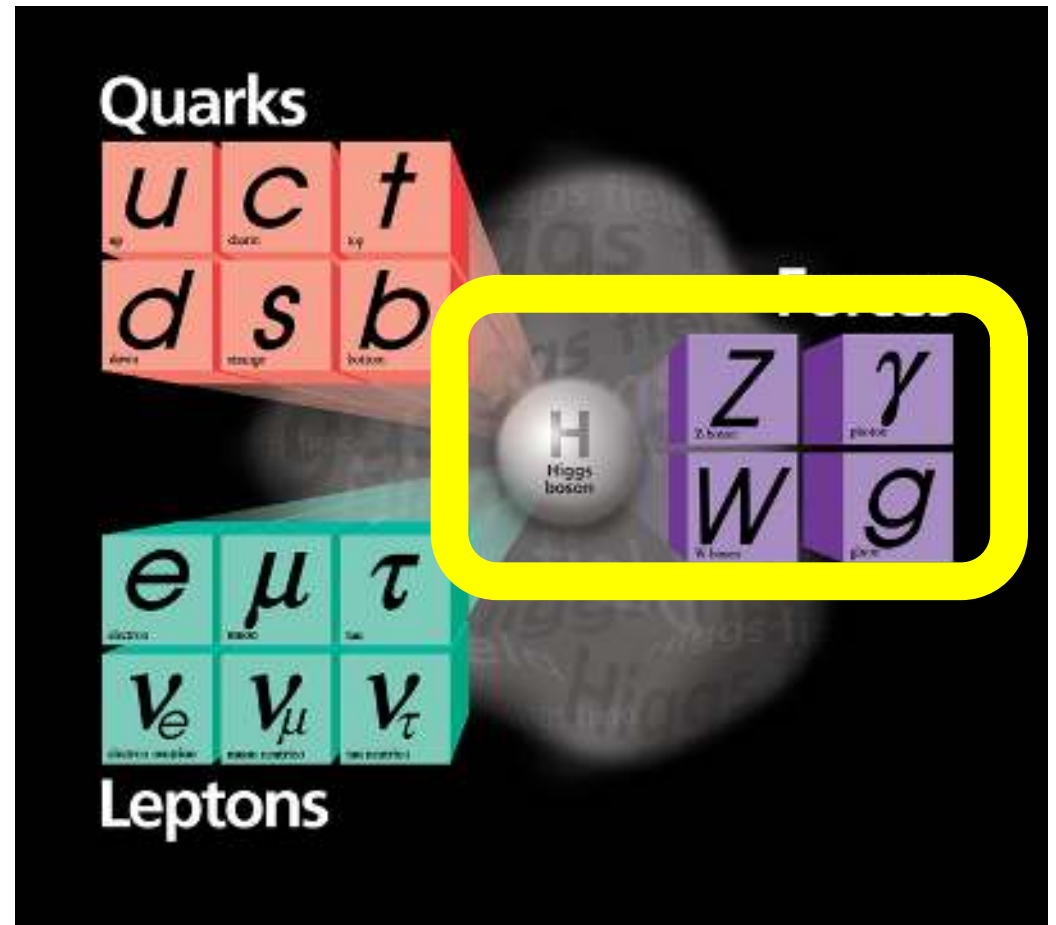
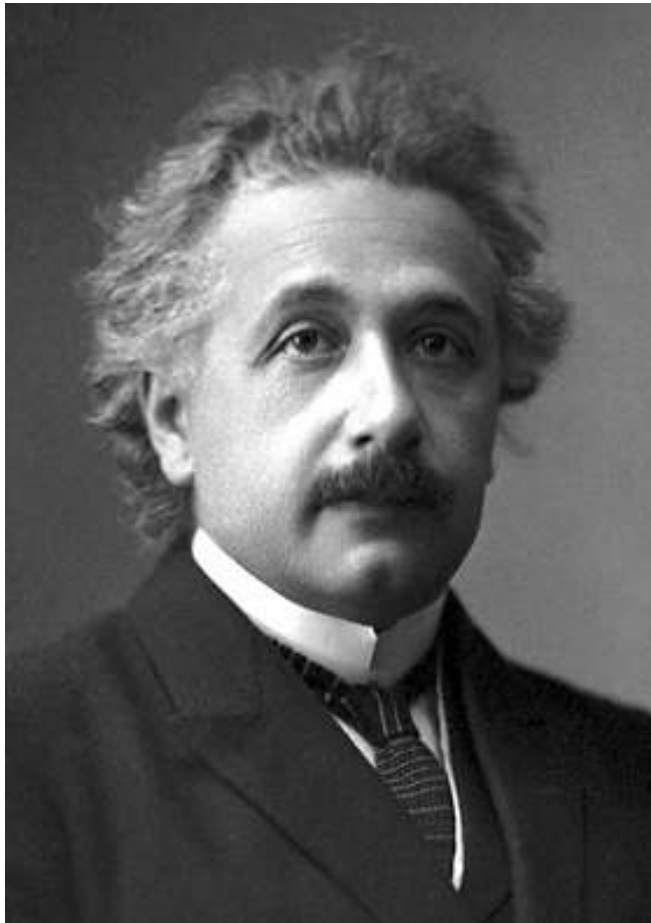
# „Unser Weltbild“ - woher?



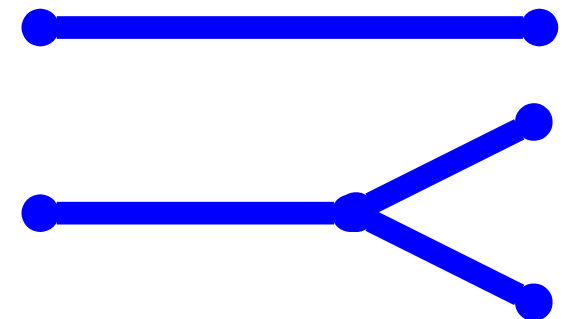
## 1. Schwerkraft

Planet Merkur - Einsteins Relativitätstheorie 1915 -  
Vorhersage schwarze Löcher, Gravitationswellen - Bestätigung nach 2015 (NP! NP!)

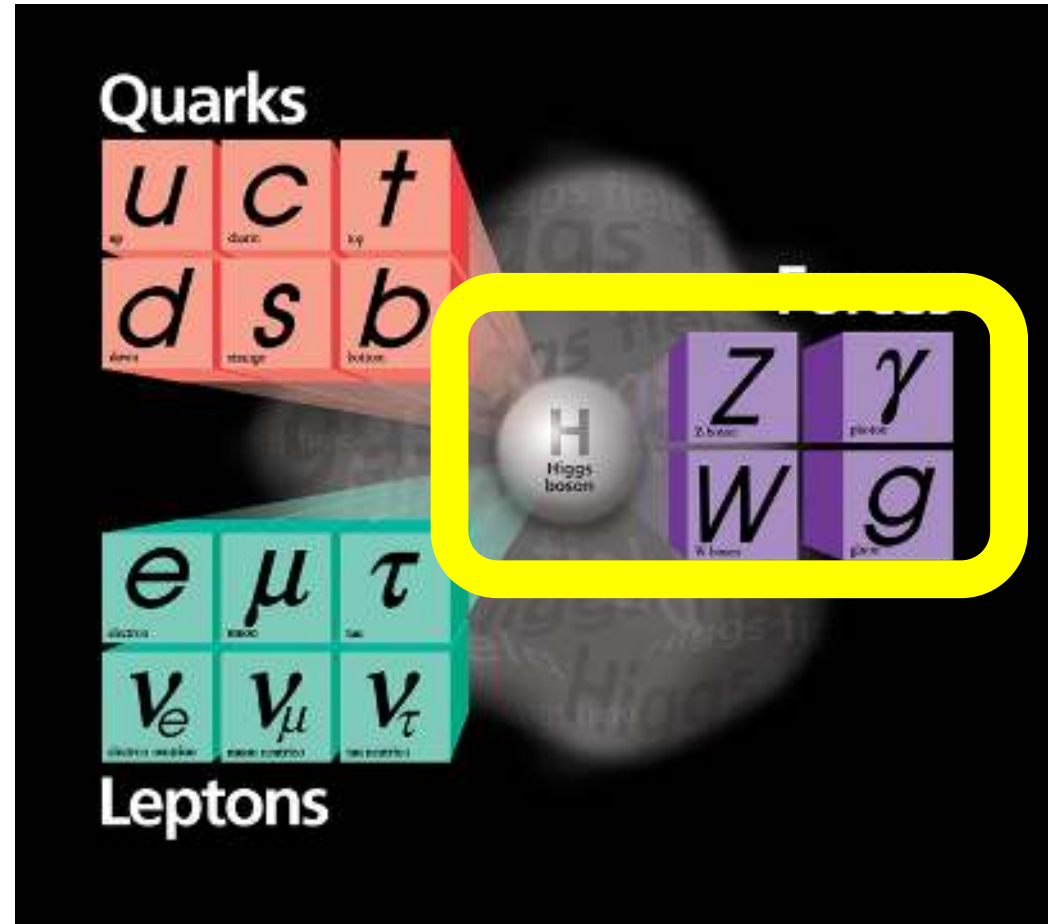
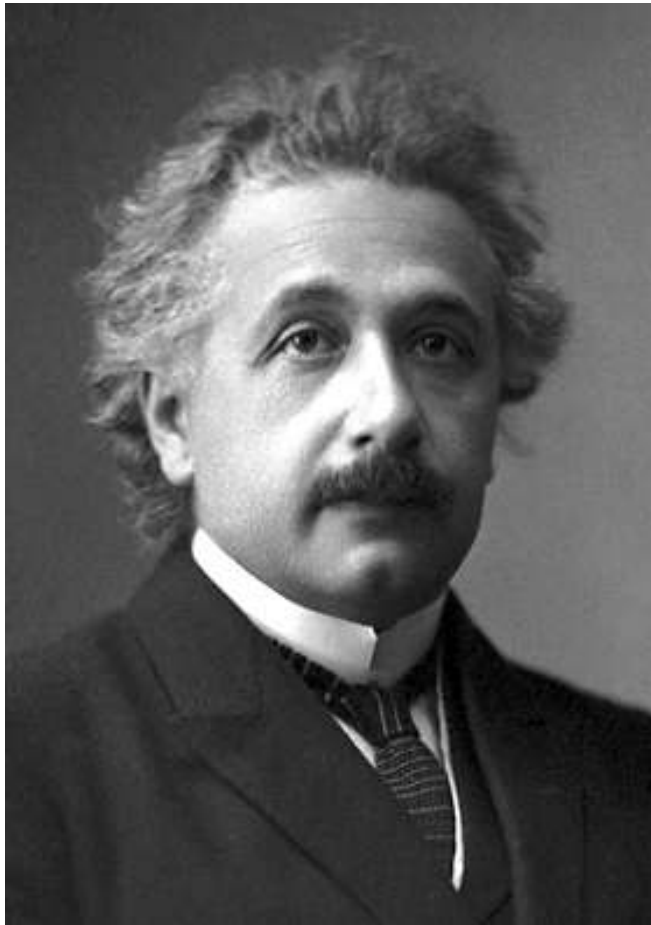
# „Unser Weltbild“ - woher?



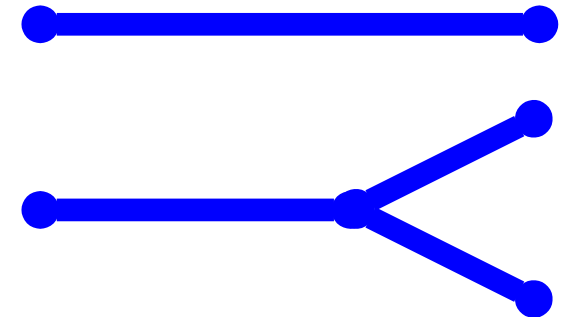
Teilchen=Wechselwirkungen!  
Nur zwei „Elementarprozesse“:



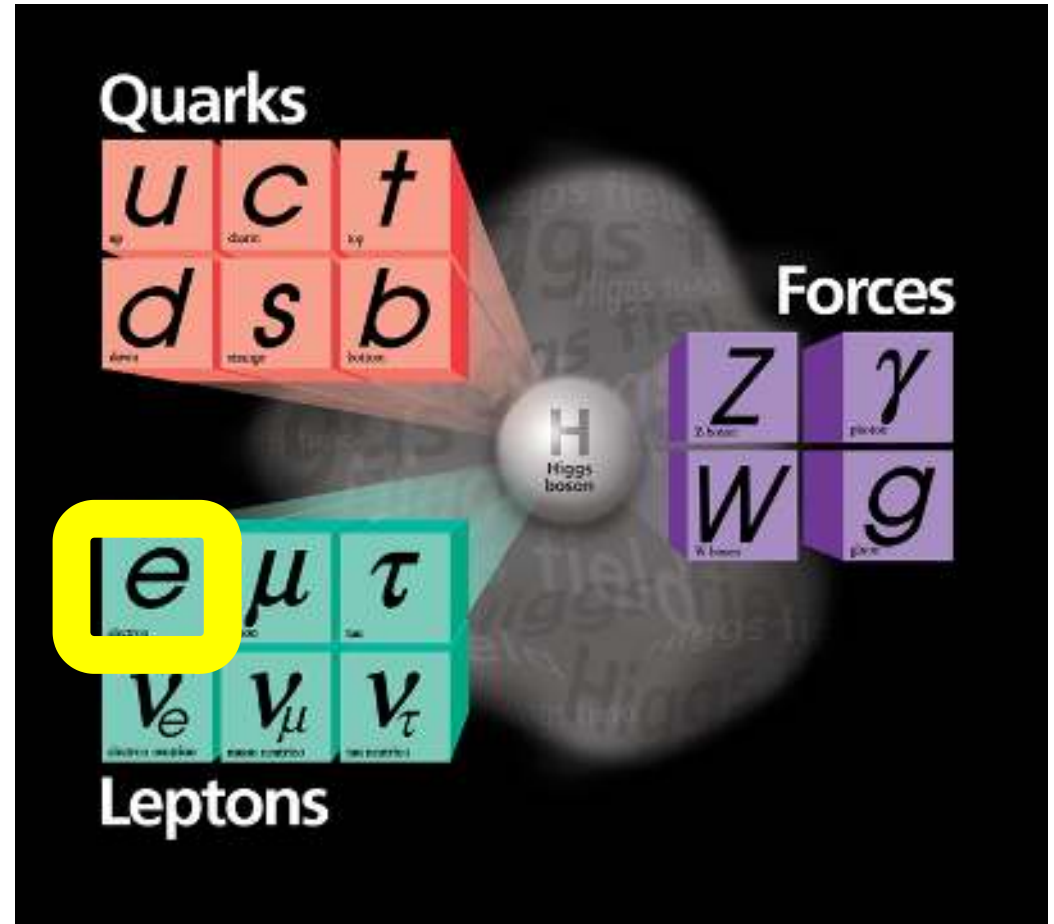
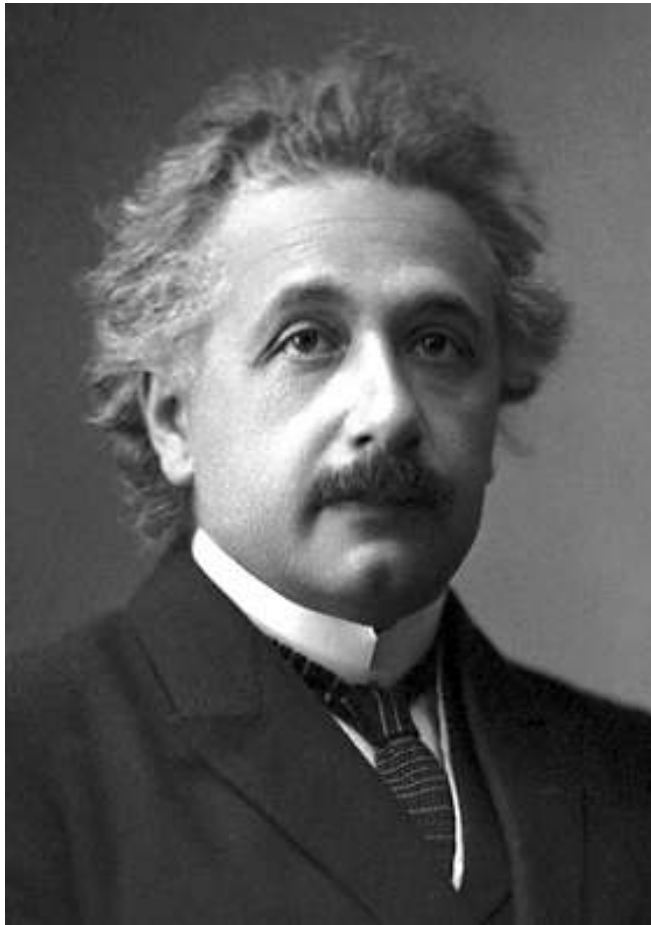
# „Unser Weltbild“ - woher?



Standardmodell von 1970.  
Vorhersage W,Z (1983 NP),  
top (1995 NP), Higgs (2012 NP)



# „Unser Weltbild“ - woher?



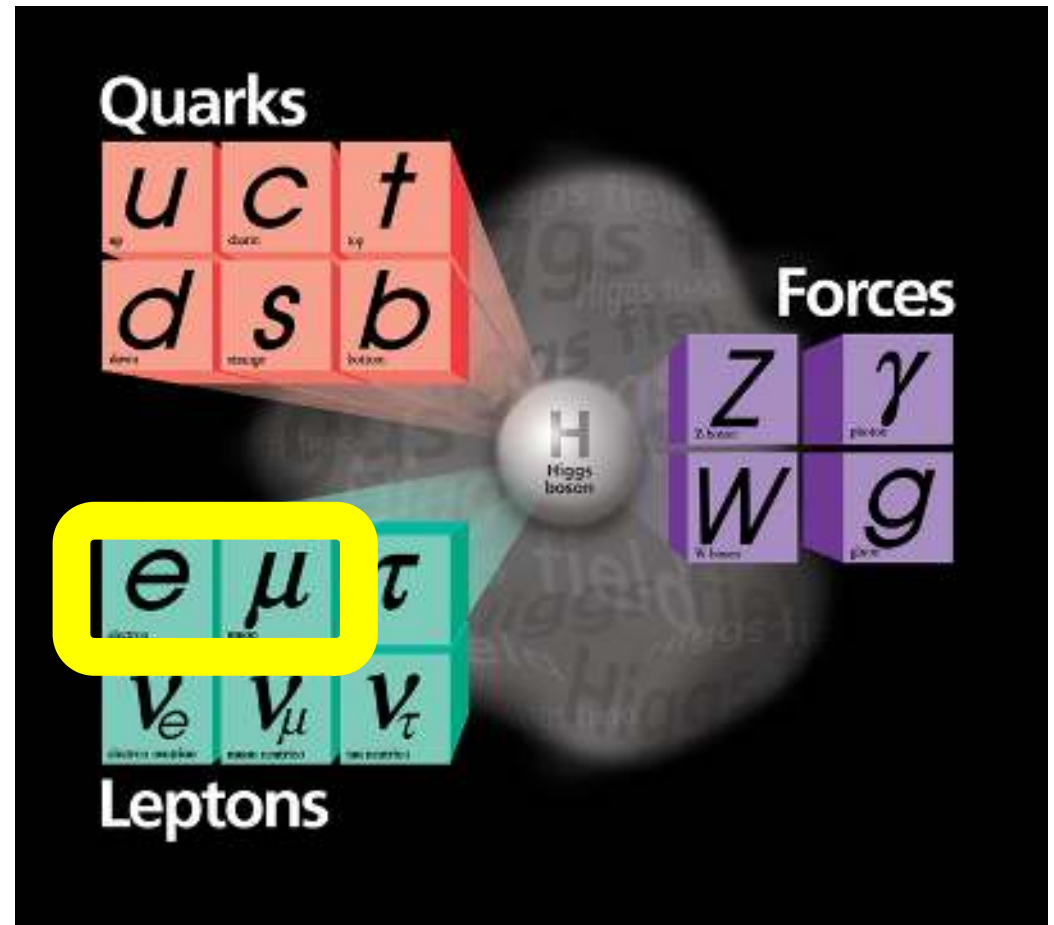
Auch quantitative Vorhersagen stimmen auf 12 Stellen!!!

**Elektron** g-Wert: Experiment:  $g=2.002\ 319\ 304\ 361\ 5(5)$   
Standardmodell Rechnung:  $g=2.002\ 319\ 304\ 362\ (2)$

# Wissenschaftliche Frage:

Was ist der  
g-Wert des Myons?

Simmt ebenfalls  
Experiment und  
Rechnung überein?

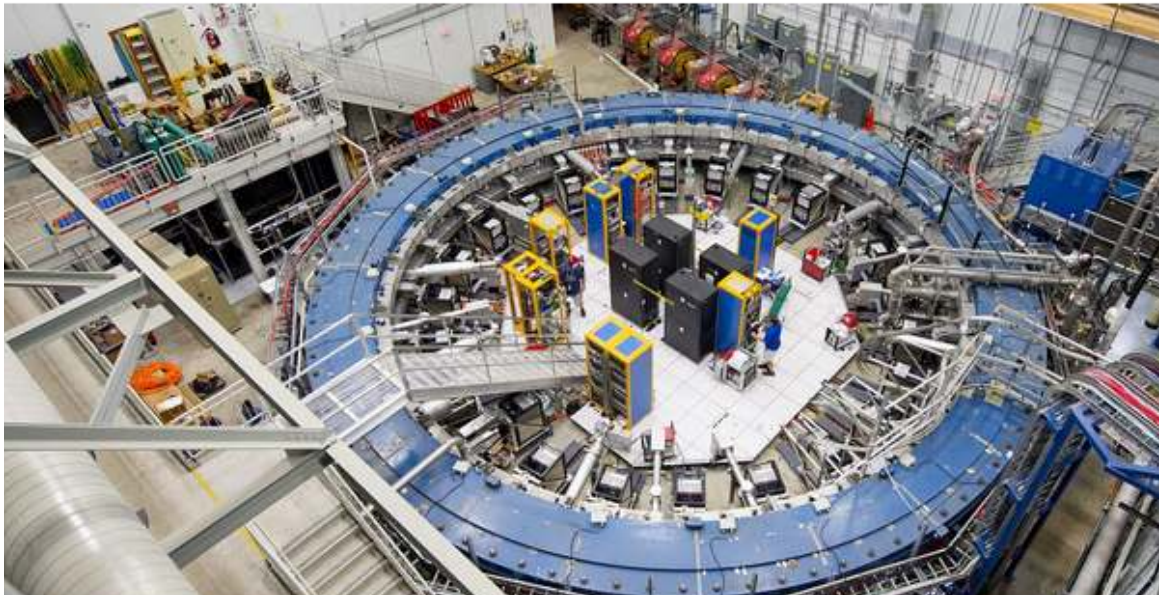


# Das Myon g-2 Experiment am Fermilab

## Der Riss im Weltmodell

Eine mit Spannung erwartete Messung widerspricht dem Standardmodell der Teilchenphysik. Eine Spur zu neuen Naturgesetzen? Forscher sind begeistert, mahnen aber noch zur Vorsicht.

von [Robert Gast](#)

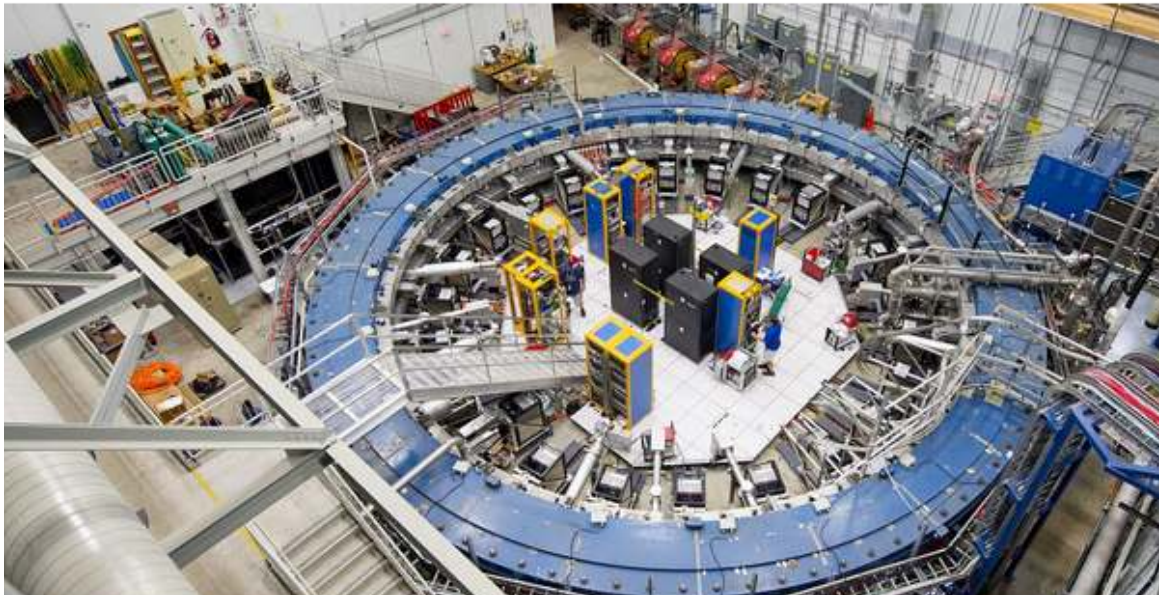


# Das Myon g-2 Experiment am Fermilab

## Der Riss im Weltmodell

Eine mit Spannung erwartete Messung widerspricht dem Standardmodell der Teilchenphysik. Eine Spur zu neuen Naturgesetzen? Forscher sind begeistert, mahnen aber noch zur Vorsicht.

von [Robert Gast](#)



- 2010 Idee
- 2013 Transport
- 2017 erste Messung
- 2021 erstes Ergebnis

# Transport des Magneten



# So etwas gab es auch in Deutschland: KATRIN (Karlsruhe) - Neutrinomassen



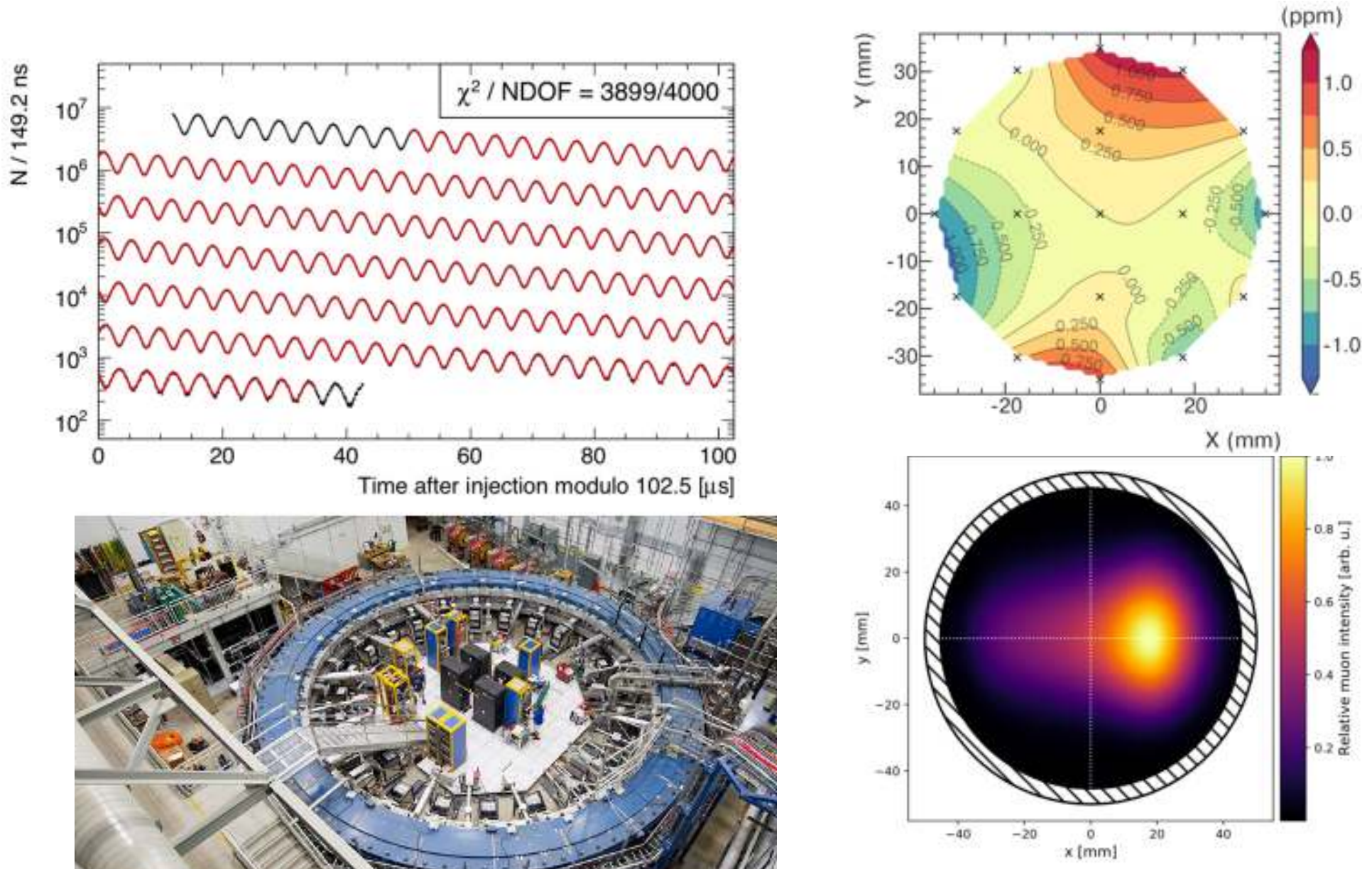
So etwas gab es auch in Deutschland:  
KATRIN (Karlsruhe) - Neutrinomassen



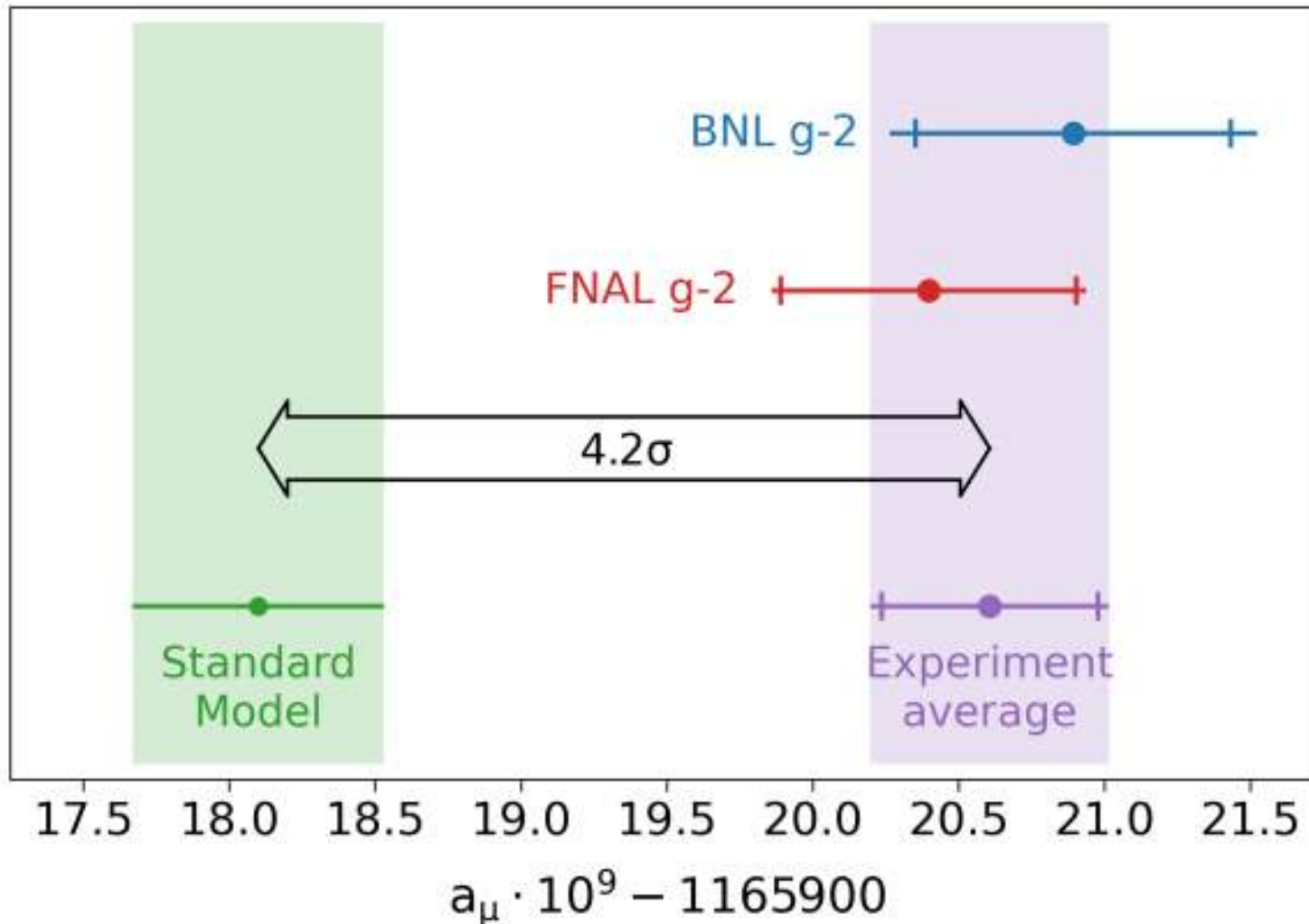




# Messung: Kreiselfrequenz, Magnetfeld und Myonposition



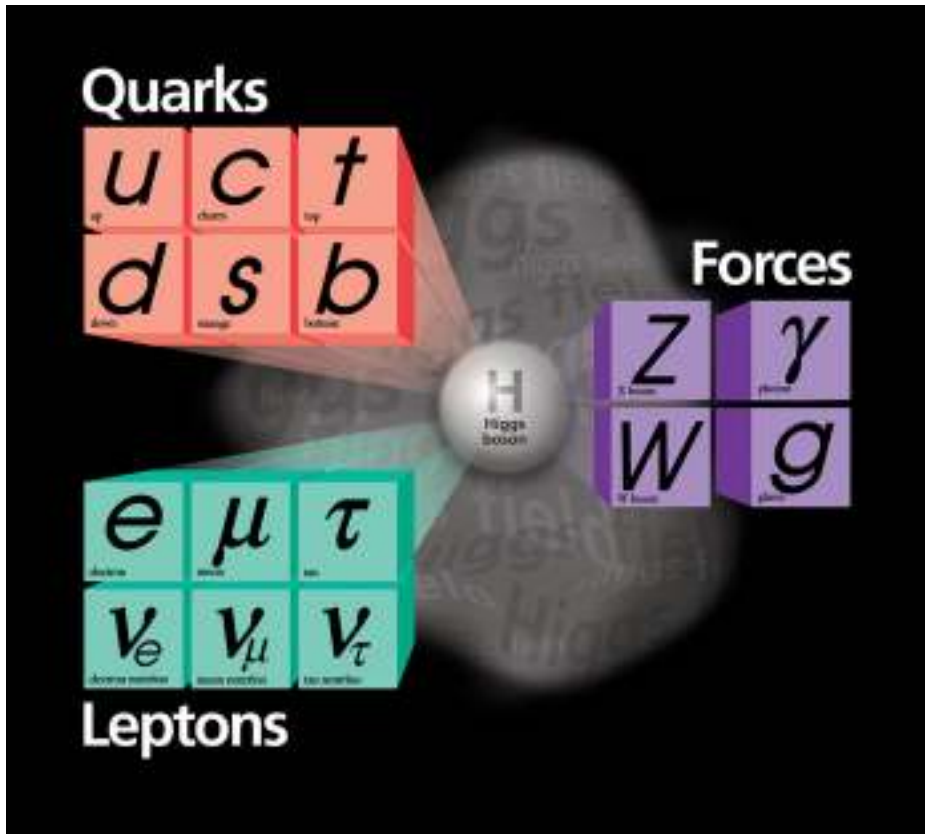
# Ergebnis, verglichen mit Theorie



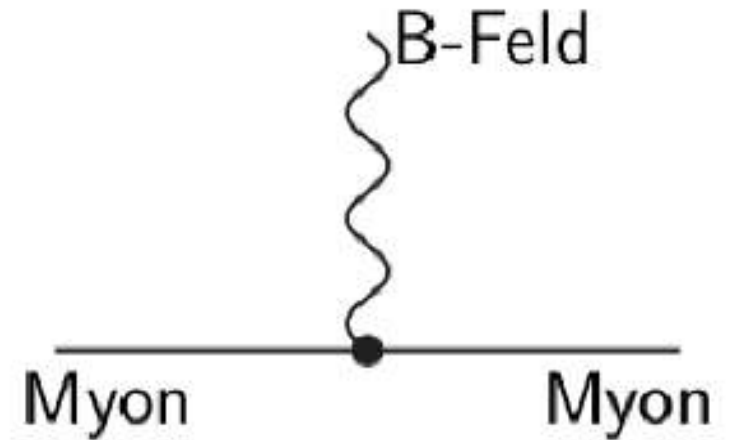
Achtung: dies ist die erste Messung des Experiments; weitere, genauere kommen noch!

Dominik Stöckinger – Institut für Kern- und Teilchenphysik, TU Dresden

# Theorie: $g=2$ durch Quantenfluktuationen

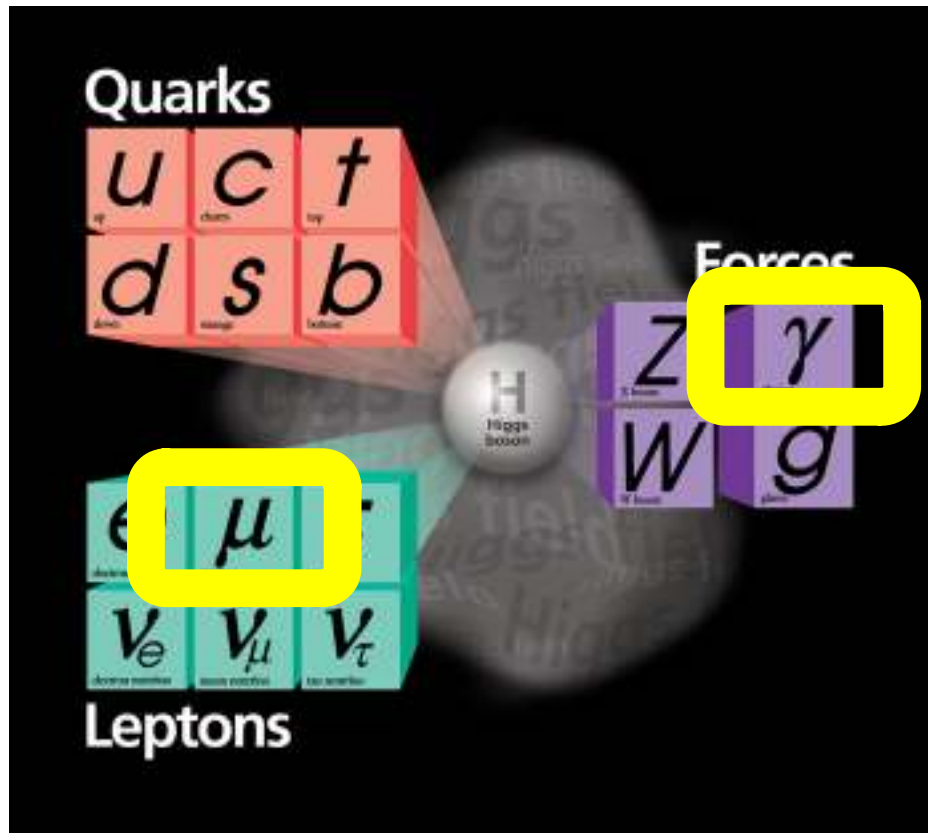


- $g=2$ : Teilchen allein

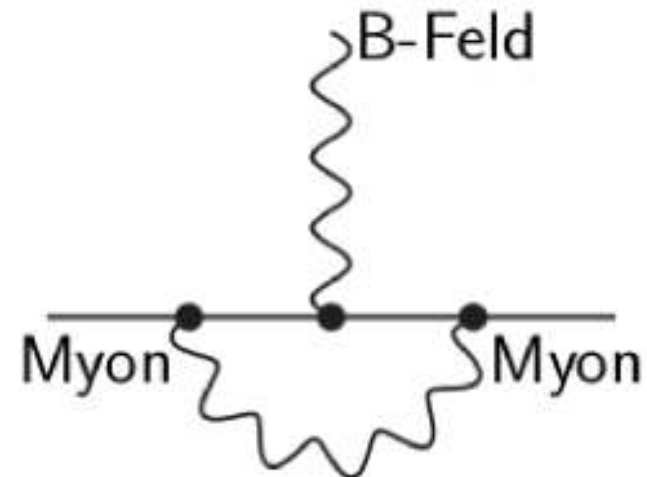


-> Nobelpreis für Dirac

# Theorie: $g=2$ durch Quantenfluktuationen



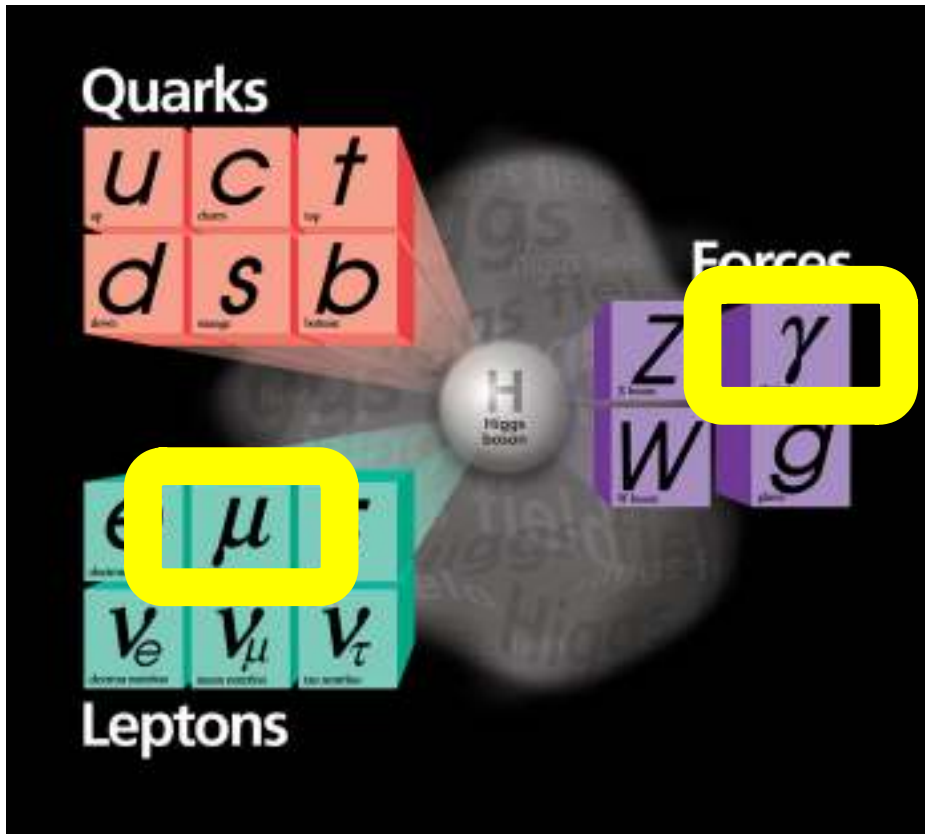
- $g=2$ : Teilchen allein



→ Nobelpreis Schwinger

- $g>2$ : weitere Teilchen durch Fluktuationen des Vakuums kurz erzeugt und zerfallen

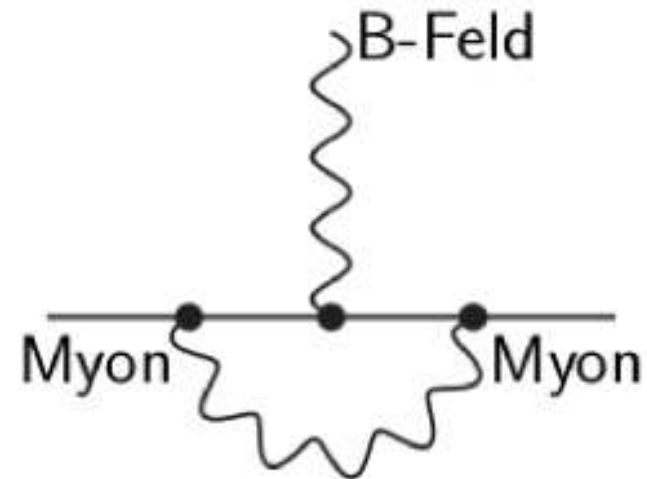
# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen



Gibt es noch weitere Quantenfluktuationen?

Ja, alle Teilchen können beitragen!!

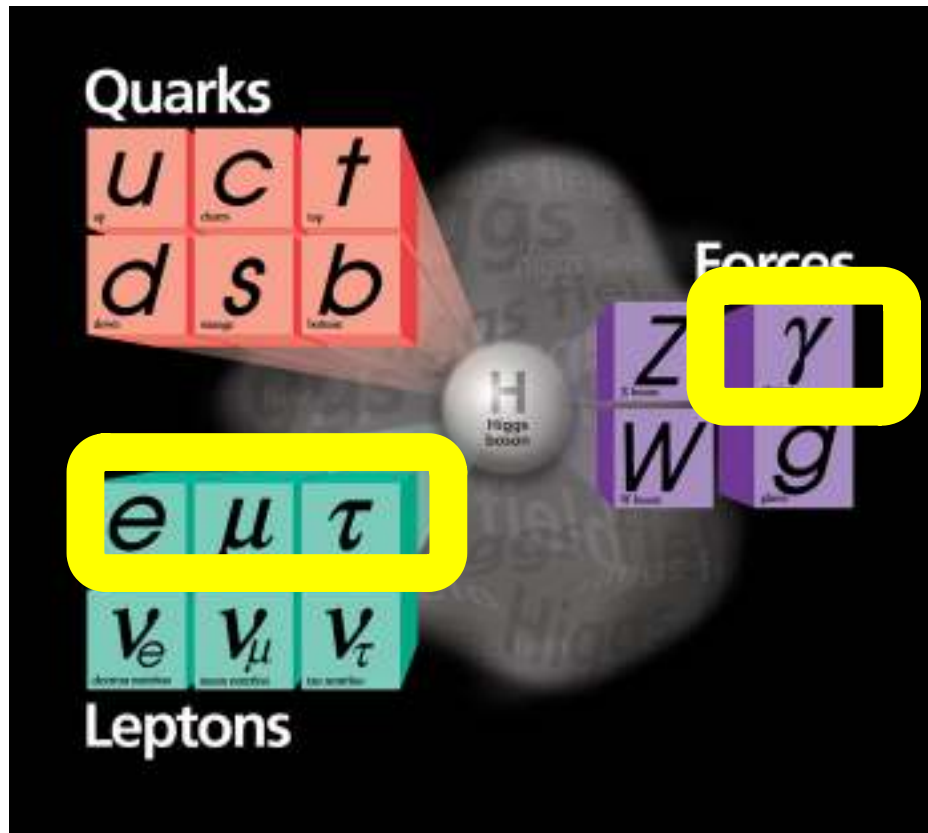
- $g=2$ : Teilchen allein



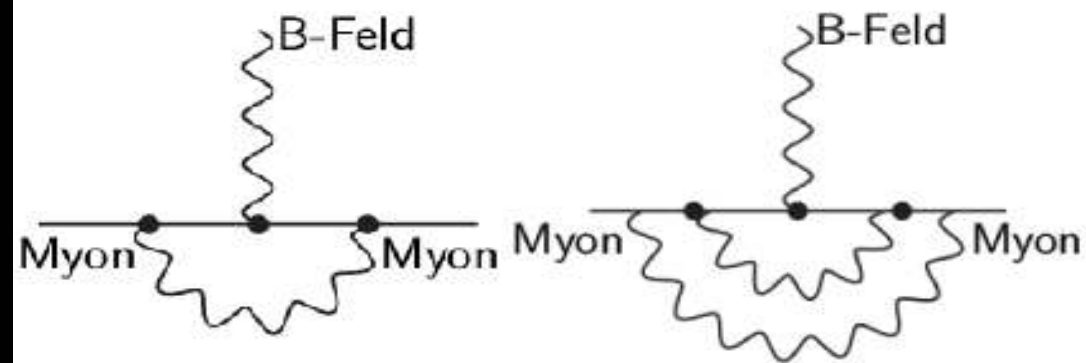
→ Nobelpreis Schwinger

- $g>2$ : weitere Teilchen durch Fluktuationen des Vakuums kurz erzeugt und zerfallen

# Theorie: g-2 durch Quantenfluktuationen



- $g > 2$ :  
Fluktuationen des Vakuums



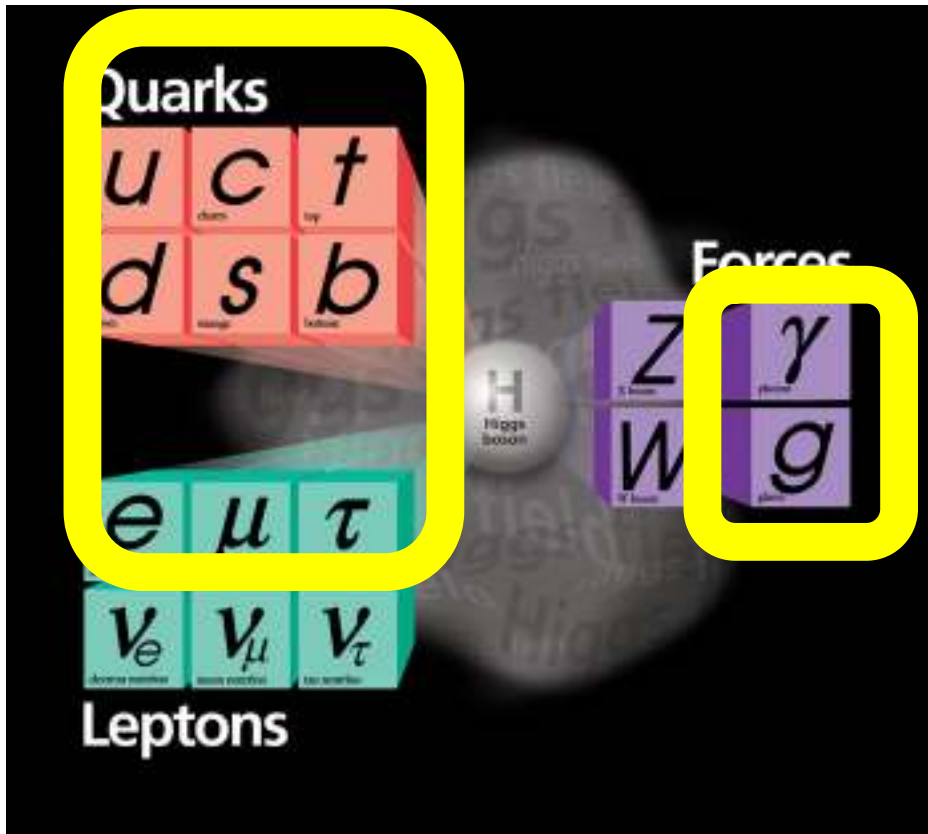
nur QED:

$$g = 2.002\ 331\ 694\ 3786$$

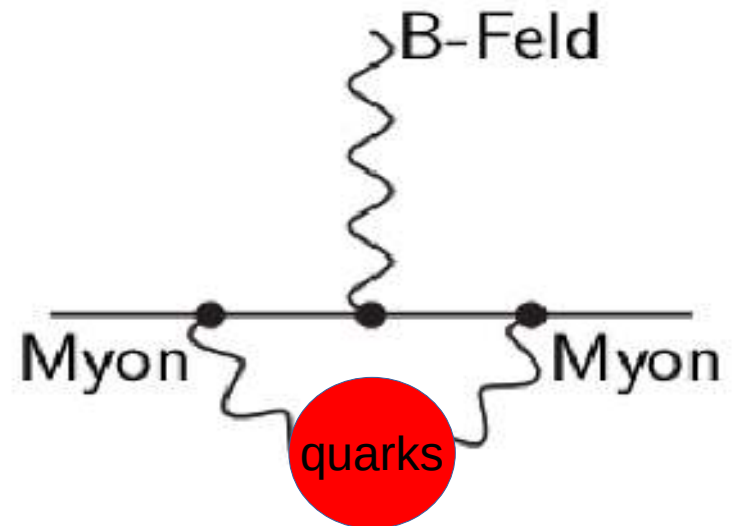
Standardmodell Rechnung:

$$g = 2.002\ 331\ 836\ 20(86)$$

# Theorie: $g-2$ durch Quantenfluktuationen



- $g > 2$ :  
Fluktuationen des Vakuums



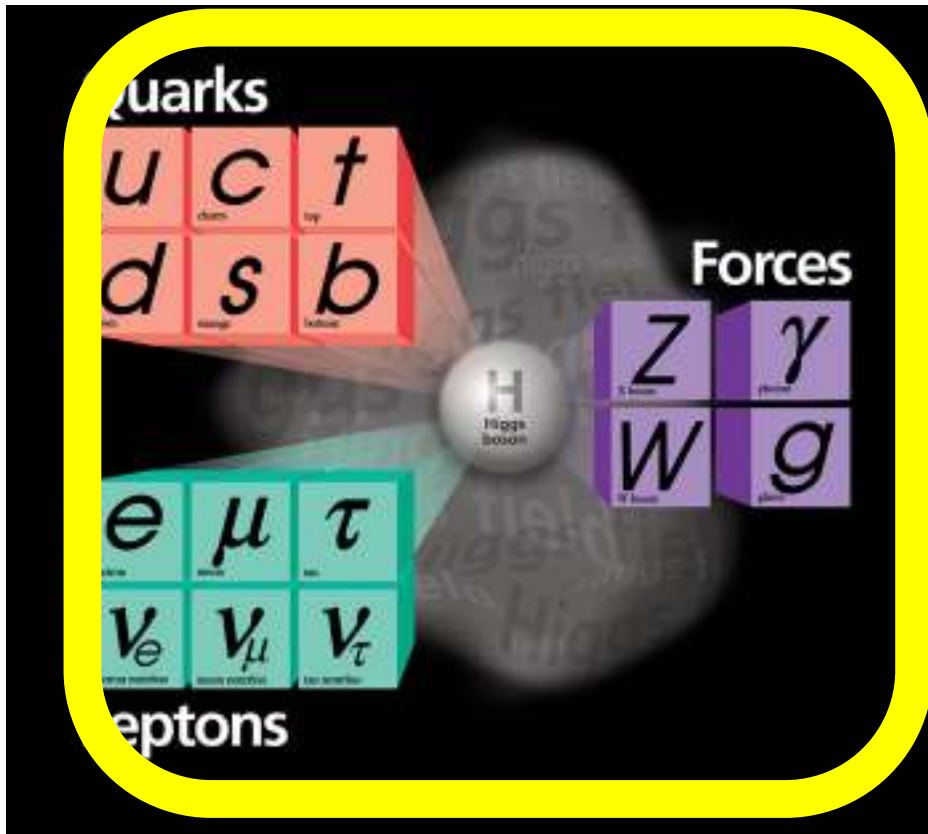
QED, Quarks, starke WW:

$g=2.002\ 331\ 833\ 128$

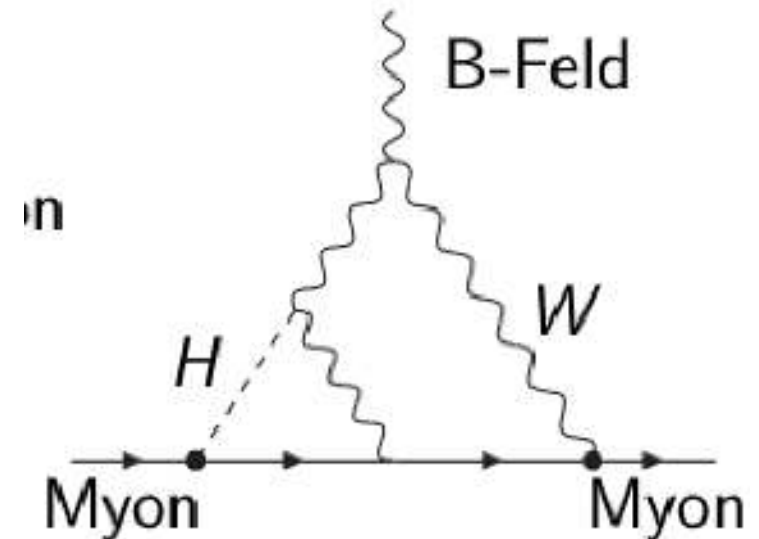
Standardmodell Rechnung:

$g=2.002\ 331\ 836\ 20(86)$

# Theorie: $g-2$ durch Quantenfluktuationen



- $g > 2$ :  
Alle Teilchen treten auf!!



QED, Quarks, starke WW:  
Gesamter Rest (→ Dresden):  
Standardmodell Rechnung:

$$g = 2.002\ 331\ 833\ 128$$

$$+ 3\ 072$$

$$g = 2.002\ 331\ 836\ 20(86)$$

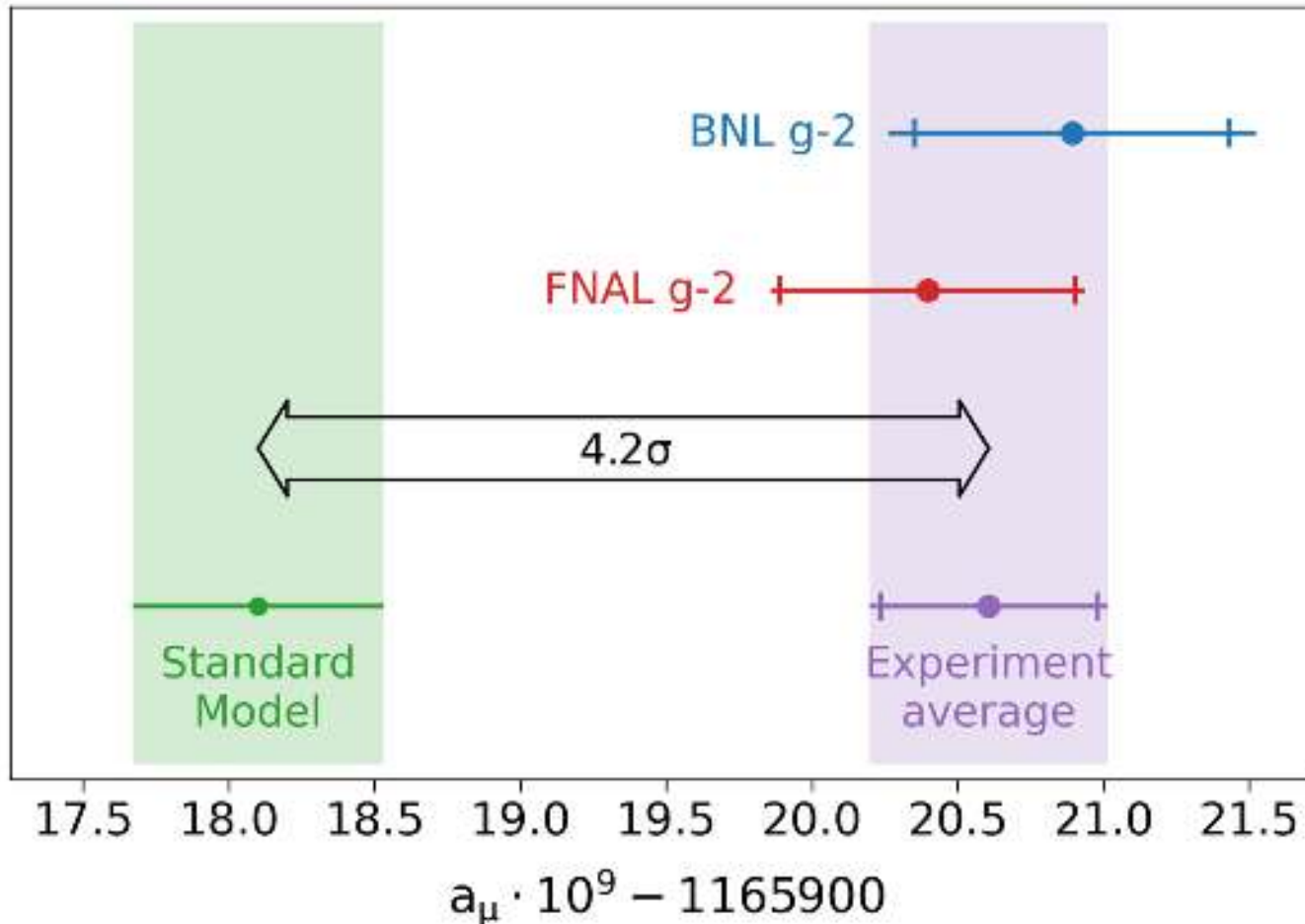
# Ergebnisse

Fermilab Messung:  $g=2.002\ 331\ 841\ 22(82)$

Standardmodell Rechnung:  $g=2.002\ 331\ 836\ 20(86)$

Das geht nicht ganz auf?!?!?! Haben wir eventuell ein paar Quantenfluktuationen in der Rechnung vergessen?

# Ergebnisse



Bedeutung 4.2sigma: Wahrscheinlichkeit für Zufall: 1 : 40000

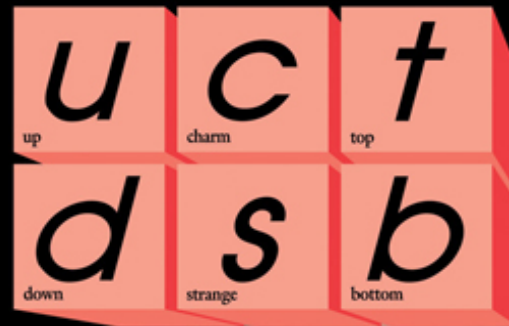
„Entdeckung“: 5.0sigma: Wahrscheinlichkeit für Zufall: 1 : 3 Mio.

**Achtung: Auch in der Theorie wird es weitere, bessere Berechnungen geben!**

Dominik Stöckinger – Institut für Kern- und Teilchenphysik, TU Dresden

# Bedeutung? Offene Fragen

## Quarks



## Forces

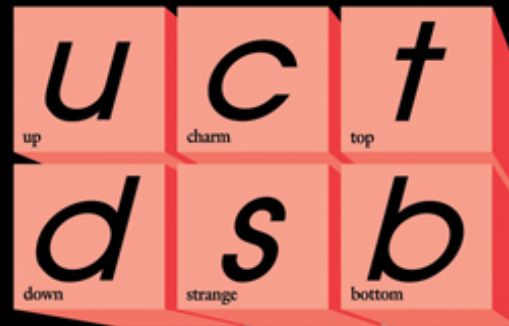


## Leptons

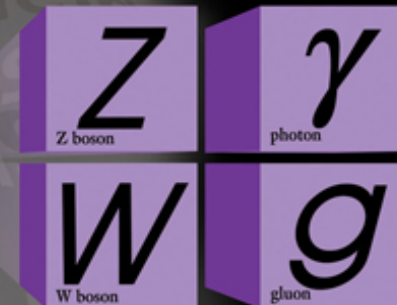
# Offene Fragen

Dunkle Materie?  
Zusätzliche Teilchen?

## Quarks



## Forces

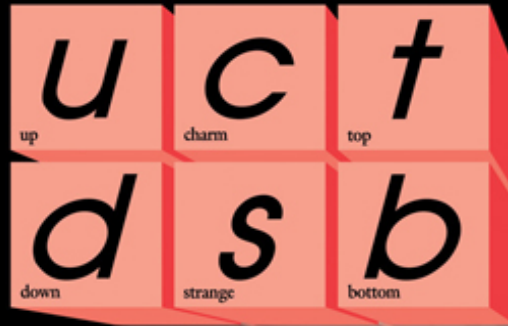


## Leptons

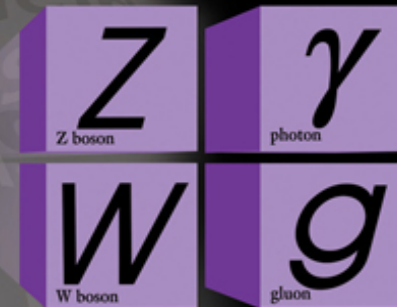
# Offene Fragen

Warum 3 Familien?

## Quarks



## Forces



## Leptons



Warum 4er Struktur?

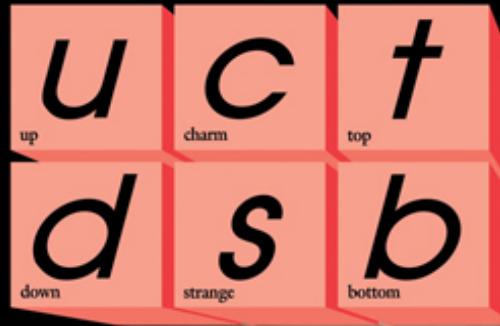
Warum Quarks und Leptonen?

Warum 3 Kräfte? Woher Higgs?

# Offene Fragen

Warum 3 Familien?

## Quarks



## Forces



Es könnte zusätzliche  
Teilchen geben!  
Eventuell „sehen“ wir  
die Effekte in g-2



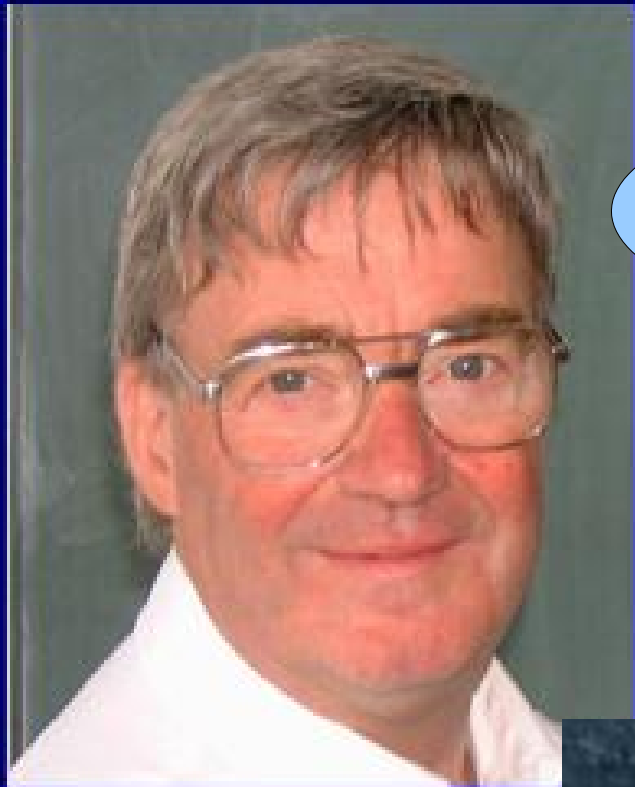
## Leptons

Warum 4er Struktur?

Warum Quarks *und* Leptonen?

Warum 3 Kräfte? Woher Higgs?

# Es gibt viele Möglichkeiten

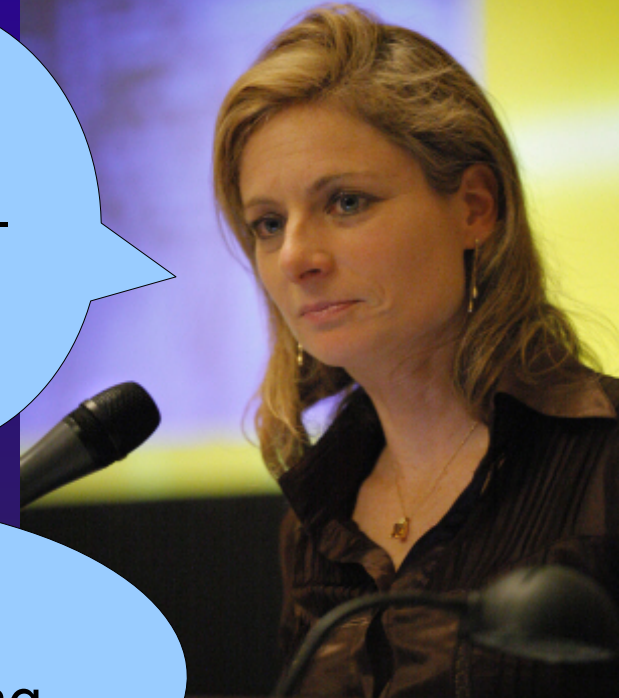
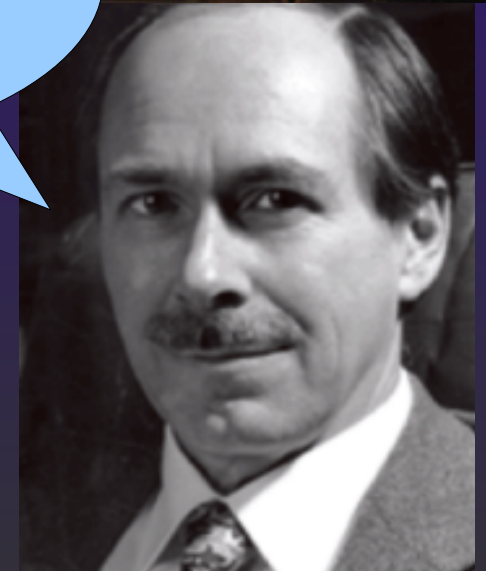
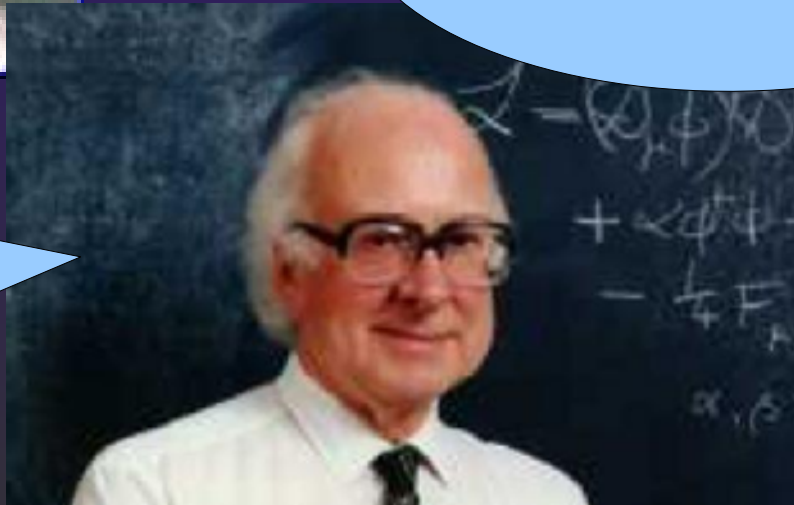


Super-  
symmetrie

5te  
Dimen-  
sion

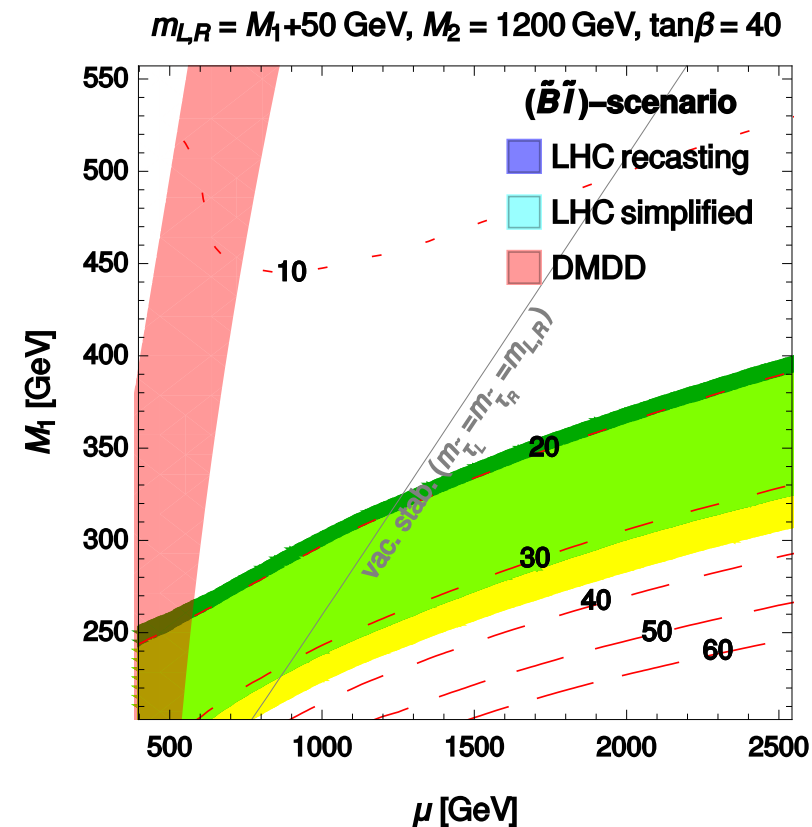
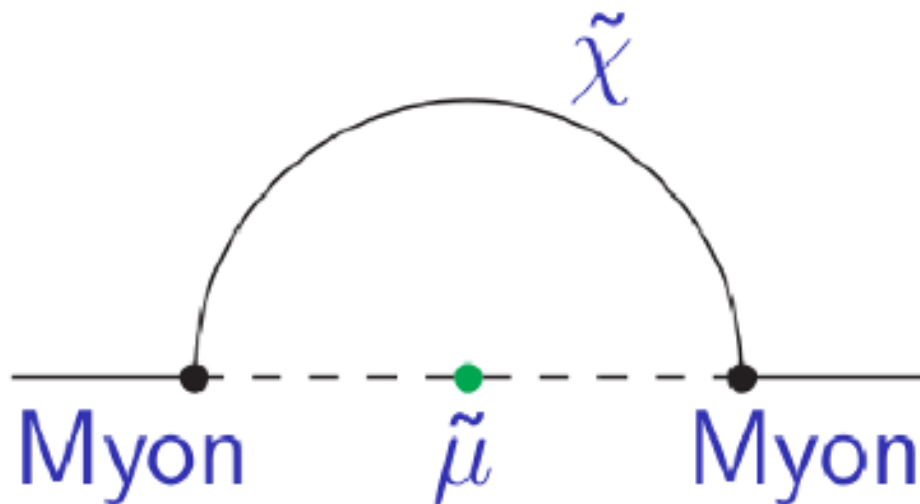
Neuartige  
Wechselwirkung

Ein  
Higgs-  
boson



# Beispiel

Falls es supersymmetrische Teilchen gibt:



Dann könnte sowohl die dunkle Materie als auch g-2 erklärt werden

# Offene Fragen → es müßte „neue Physik“ geben

- Was ist  $g$ ? Was sind Myonen?
  - Was ist unser „Weltbild“?
  - Was bedeutet das Ergebnis? Warum die Begeisterung?
- **$g-2$  ist das magnetische Moment der Myonen**
  - **Kann gemessen und berechnet werden**
  - **$g-2$  ist sensitiv auf Quantenfluktuationen ALLER Teilchen**
  - **Fermilab  $g-2$  Ergebnis: exzellente Bestätigung des alten Wertes, weicht vom Standardmodell ab!**
  - **Neue Physik = neuartige Teilchen, neuartige Gesetze, die die bekannten ergänzen/ihnen zugrunde liegen**
  - Warum 4 elementare Kräfte, Quarks und Leptonen, ... ?
  - Was ist Dunkle Materie?
  - **Myon  $g-2$  könnte damit neue Physik „sichtbar“ machen; ermöglichen, neue Physik zu studieren**
  - **Momentan: Indizien, noch kein Beweis – es bleibt spannend!**

