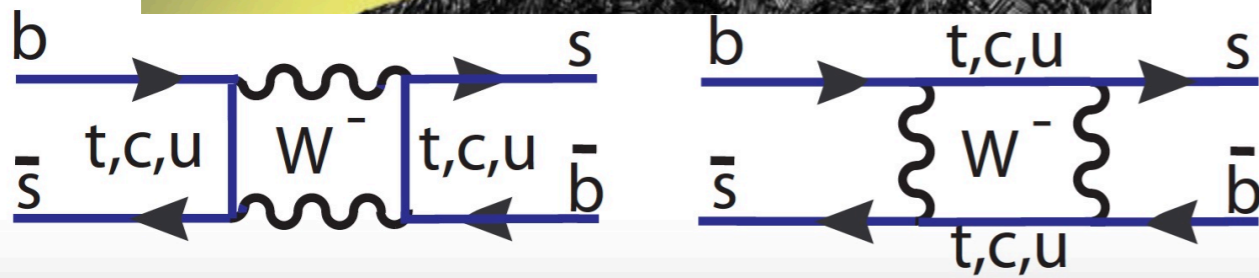
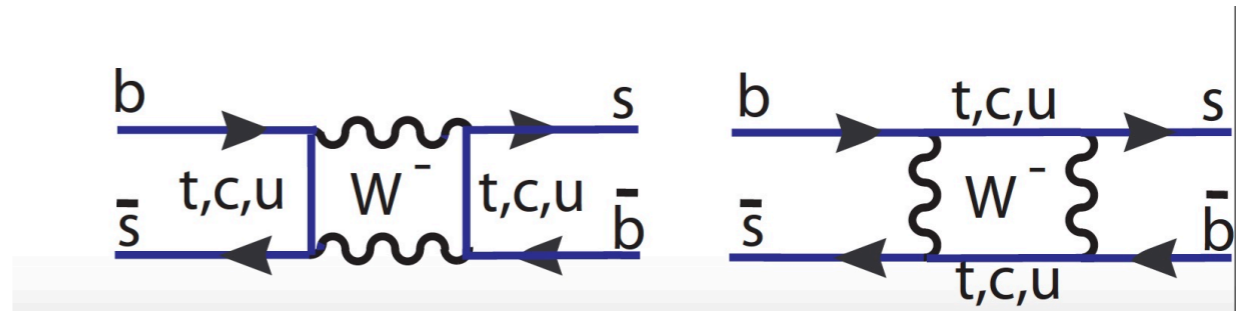


Per Aspera ad Astra:

Präzisionsrechnungen in der Teilchenphysik

Per Aspera ad Astra:

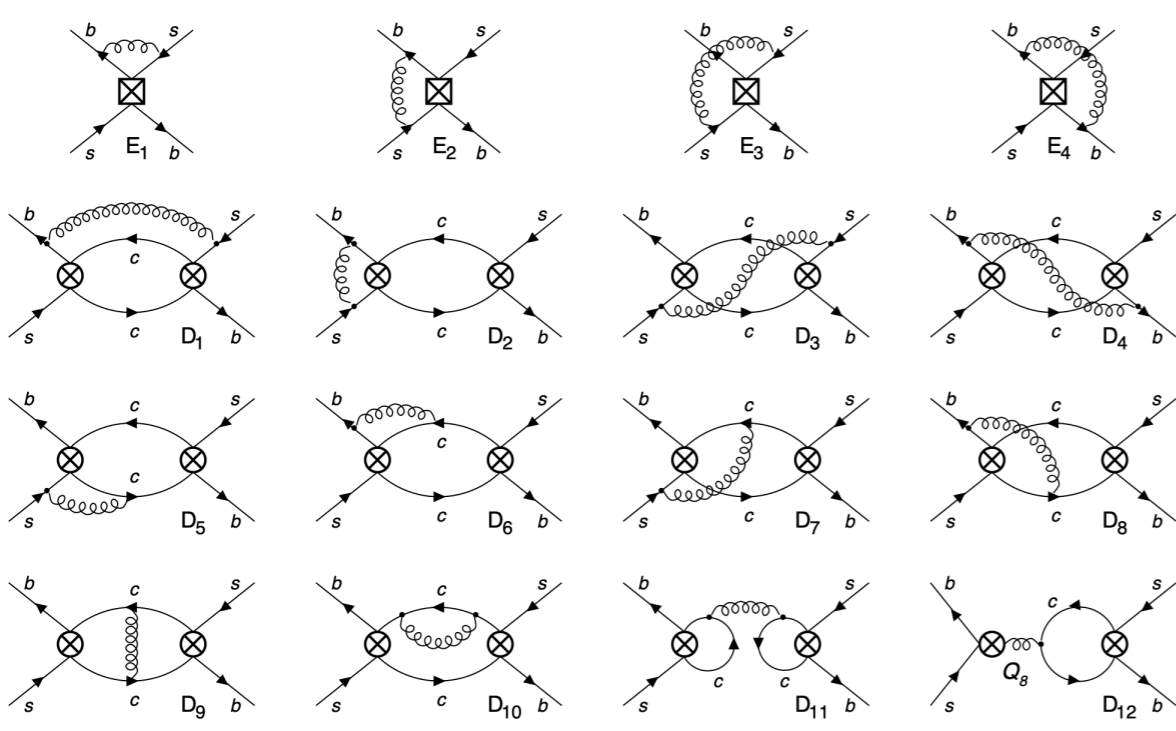
Präzisionsrechnungen in der Teilchenphysik



Alexander Lenz

Antrittsvorlesung, Universität Siegen

2.12.2021



$$F_{11}^{(0)}(z) = 3\sqrt{1-4z}(1-z) \quad F_{S,11}^{(0)}(z) = 3\sqrt{1-4z}(1+2z), \quad (18)$$

$$F_{12}^{(0)}(z) = 2\sqrt{1-4z}(1-z) \quad F_{S,12}^{(0)}(z) = 2\sqrt{1-4z}(1+2z), \quad (19)$$

$$F_{22}^{(0)}(z) = \frac{1}{2}(1-4z)^{3/2} \quad F_{S,22}^{(0)}(z) = -\sqrt{1-4z}(1+2z). \quad (20)$$

The next-to-leading order expressions $F_{ij}^{(1)}$, $F_{S,ij}^{(1)}$ are

$$\begin{aligned} F_{11}^{(1)}(z) = & 32(1-z)(1-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + 64(1-z)(1-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & - 4(13-26z-4z^2+14z^3) \ln \sigma \\ & + \sqrt{1-4z} \left[4(13-10z) \ln z - 12(3-2z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. + \frac{1}{6}(109-226z+168z^2) \right] + 2\sqrt{1-4z}(5-8z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} F_{S,11}^{(1)}(z) = & 32(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + 64(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & - 16(4-2z-7z^2+14z^3) \ln \sigma \\ & + \sqrt{1-4z} \left[64(1+2z) \ln z - 48(1+2z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. - \frac{8}{3}(1-6z)(5+7z) \right] - 32\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} F_{12}^{(1)}(z) = & \frac{64}{3}(1-z)(1-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + \frac{128}{3}(1-z)(1-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + (2-259z+662z^2-76z^3-200z^4) \frac{\ln \sigma}{6z} \\ & - \sqrt{1-4z} \left[(2-255z+316z^2) \frac{\ln z}{6z} + 8(3-2z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. + \frac{2}{9}(127-199z-75z^2) \right] \\ & - 2\sqrt{1-4z}(17-26z) \ln \frac{\mu_1}{m_b} + \frac{4}{3}\sqrt{1-4z}(5-8z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (23)$$

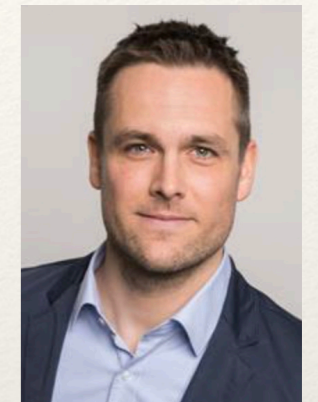
$$\begin{aligned} F_{S,12}^{(1)}(z) = & \frac{64}{3}(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + \frac{128}{3}(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & + (1-35z+4z^2+76z^3-100z^4) \frac{4 \ln \sigma}{3z} \\ & - \sqrt{1-4z} \left[(1-33z-76z^2) \frac{4 \ln z}{3z} + 32(1+2z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. + \frac{4}{9}(68+49z-150z^2) \right] \\ & - 16\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_1}{m_b} - \frac{64}{3}\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} F_{22}^{(1)}(z) = & \frac{4}{3}(4-21z+2z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + \frac{4}{3}(1-2z)(5-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & - (7+13z-194z^2+304z^3-64z^4) \frac{\ln \sigma}{6z} - \frac{\pi^2}{3}(1-10z) \\ & + \sqrt{1-4z} \left[(7+27z-250z^2) \frac{\ln z}{6z} - 4(1-6z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. - \frac{1}{18}(115+632z+96z^2) \right] \\ & - 2\sqrt{1-4z}(5-2z) \ln \frac{\mu_1}{m_b} + \frac{4}{3}\sqrt{1-4z}(2-5z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} F_{S,22}^{(1)}(z) = & -\frac{32}{3}(1+z)(1+2z) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + \frac{32}{3}(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & + (1+7z+10z^2-68z^3+32z^4) \frac{4 \ln \sigma}{3z} + \frac{8\pi^2}{3}(1+2z) \\ & - \sqrt{1-4z} \left[(1+9z+26z^2) \frac{4 \ln z}{3z} - 16(1+2z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. + \frac{8}{9}(19+53z+24z^2) \right] \\ & - 16\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_1}{m_b} + \frac{32}{3}\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}. \end{aligned} \quad (26)$$

Mein Publikum

I Der/die gemeine Siegener(in) und die Unileitung



II Kollegen und Studenten aus dem Department



III Teilchenphysikexperten



Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIc Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

IV Schlussbemerkungen

Motivation

Covid-konformer Glühwein-
empfang im Anschluss im Freien



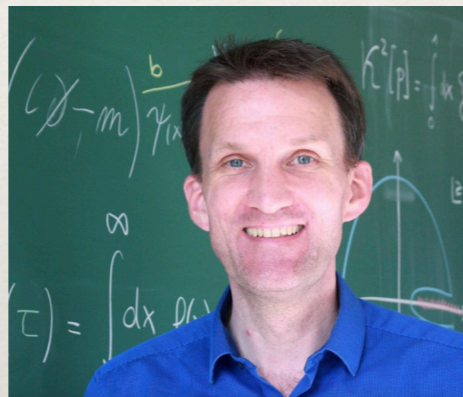
Qualifikationsfragen vom internationalen Ausschankteam

Frei: kaltes, chloriertes Leitungswasser

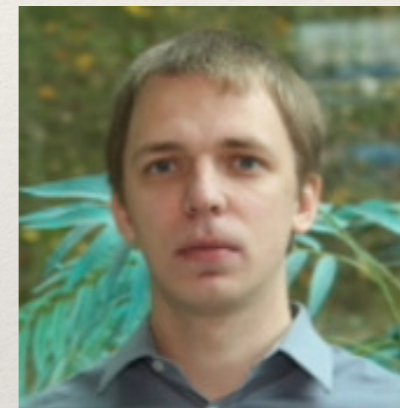
A. Qualifiziert für Kinderpunsch

B. Qualifiziert für Glühwein

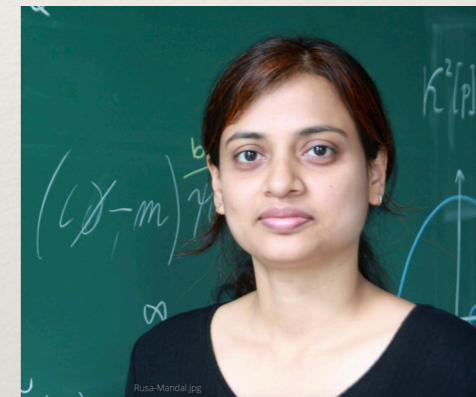
C. Qualifiziert für Glühwein mit Schuss



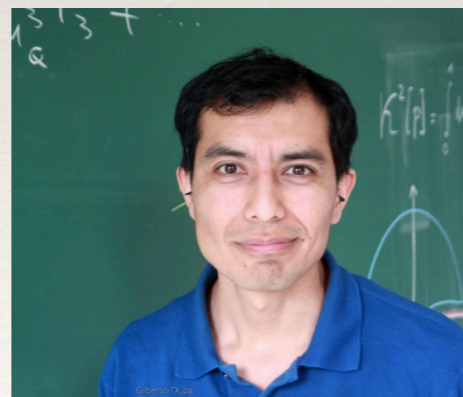
Oliver Witzel
Deutschland



Aleksey Rusov
Russland



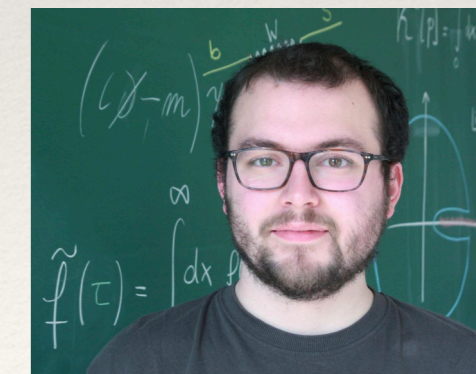
Rusa Mandal
Indien



Gilberto Tetlalmatzi-Xolocotzi
Mexiko



Maria Laura Piscopo
Italien



Matthew Black
Schottland

Arzu Ergüzel
D/Türkei



Motivation

Covid-konformer Glühwein-
empfang im Anschluss im Freien



Qualifikationsfragen vom Ausschankteam

Frei: kaltes, chloriertes Leitungswasser

A. Qualifiziert für Kinderpunsch

B. Qualifiziert für Glühwein

C. Qualifiziert für Glühwein mit Schuss

I **Allgemeinheit und Unileitung**

II **Physikstudenten und Physiker**

III **Teilchenphysiker**

Motivation

Covid-konformer Glühwein-
empfang im Anschluss im Freien



Qualifikationsfragen vom Ausschankteam

Frei: kaltes, chloriertes Leitungswasser

- A. Qualifiziert für Kinderpunsch
- B. Qualifiziert für Glühwein
- C. Qualifiziert für Glühwein mit Schuss

I Allgemeinheit und Unileitung

- A. Aus wie vielen Quarks besteht ein Proton?
- B. Wer kann im Forschungszentrum Geisweid die schwächste Wechselwirkung mit der höchsten Probemasse bei *Squats* überwinden?
- C. In welche Art von Forschung muss dringend mehr Geld investiert werden?

II Physikstudenten und Physiker

- A. Aus welchen Quarks besteht ein B^+ meson?
- B. Wo steckt CP Verletzung im Standardmodell?
- C. Ist Quantum Computing oder Teilchenphysik spannender?

III Teilchenphysiker

- A. Wie lautet die Definition des Darwin-Operators?
- B. Wie kann neue Physik in nicht-leptonischen Zerfällen dingfest gemacht werden?
- C. Zeichnen Sie das interessanteste Feynmandiagramm der Teilchenphysik in Ihre Handfläche.

Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIc Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

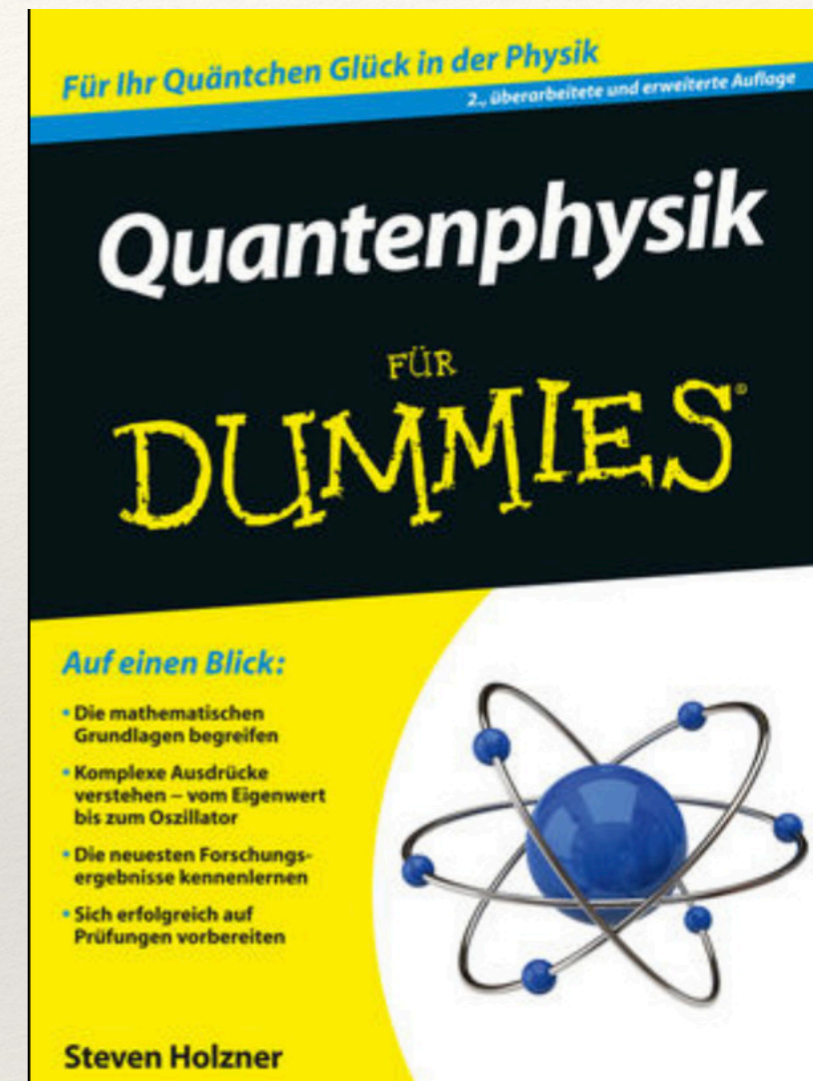
III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

IV Schlussbemerkungen



Einführung in Teilchenphysik



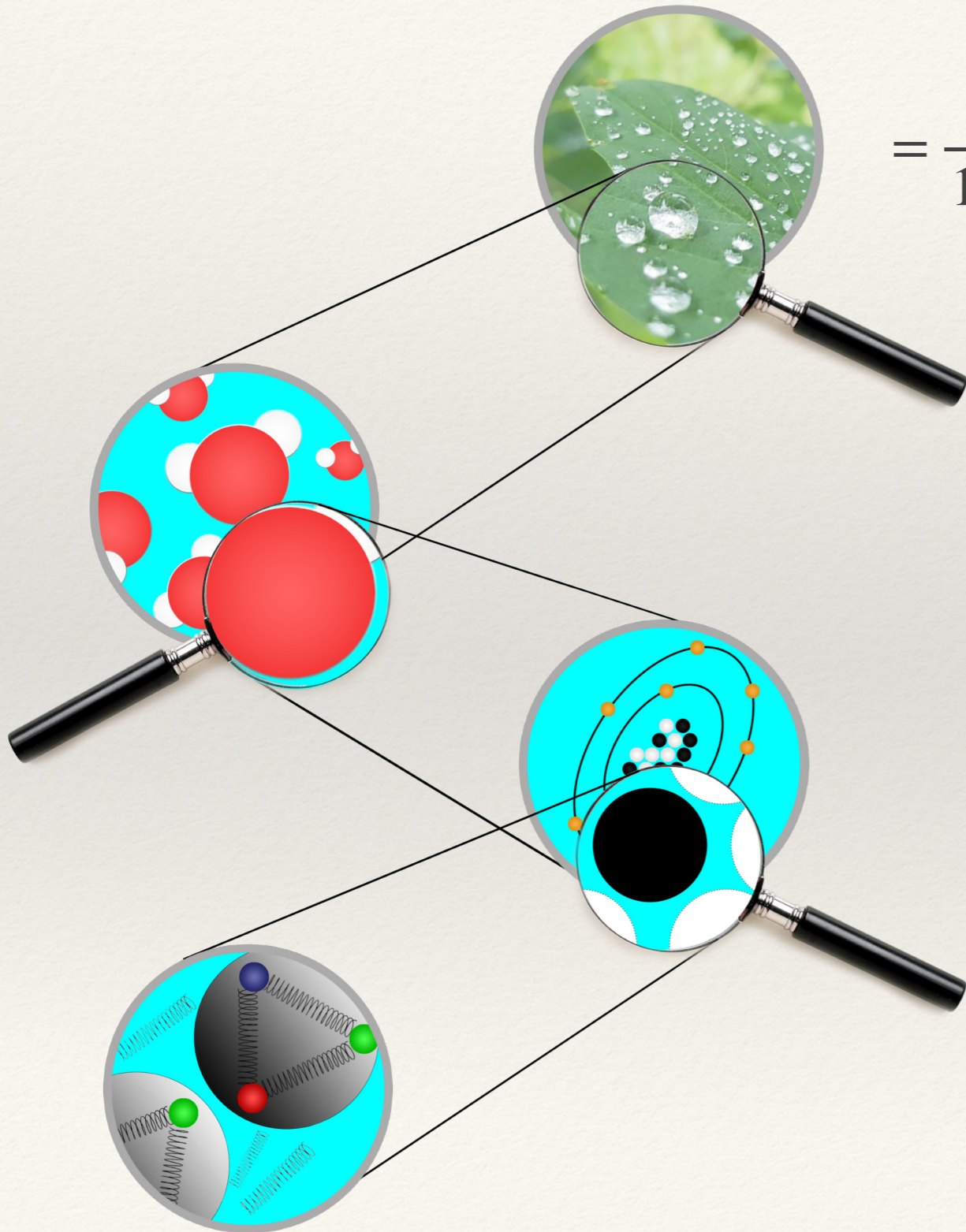
Dass ich erkenne, was die Welt Im Innersten zusammenhält.

(Johann Wolfgang von Goethe)

Einführung in Teilchenphysik

Wassertropfen, Millimeter

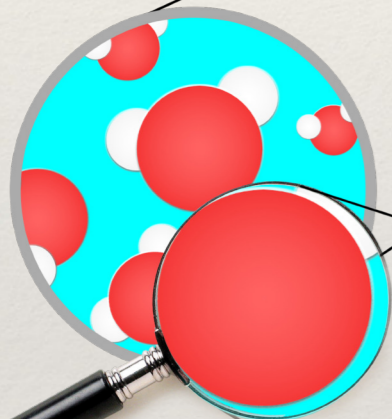
$$= \frac{1}{1000} m = \frac{1}{10 \cdot 10 \cdot 10} m = \frac{1}{10^3} m = 10^{-3} m$$



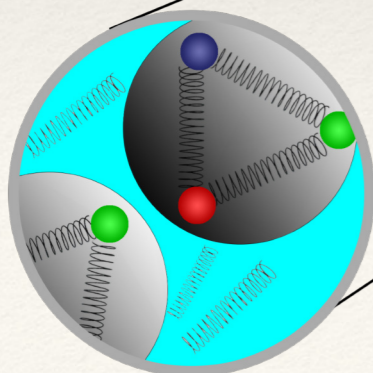
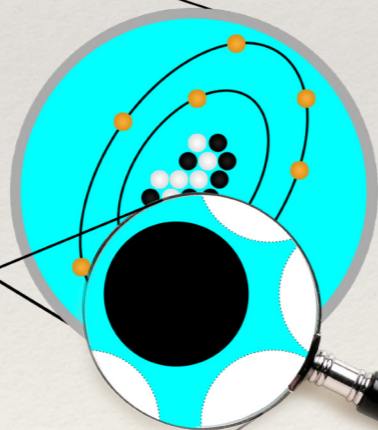
Einführung in Teilchenphysik




$$\begin{aligned} & \text{Wassertropfen, Millimeter} \\ & = \frac{1}{1000} m = \frac{1}{10 \cdot 10 \cdot 10} m = \frac{1}{10^3} m = 10^{-3} m \end{aligned}$$



Wassermolekül, H_2O ,
H=Hydrogen (Wasserstoff), O= Oxygen (Sauerstoff)
 $\approx 3 \cdot 10^{-10} m$

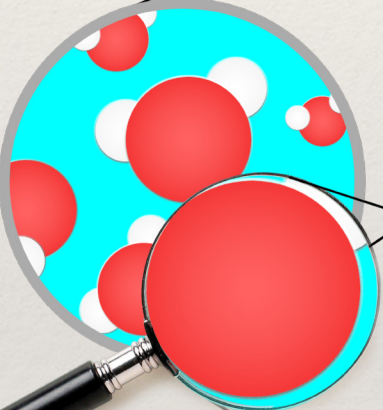


Einführung in Teilchenphysik




Wassertropfen, Millimeter

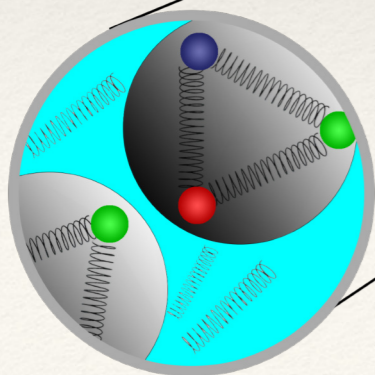
$$= \frac{1}{1000} m = \frac{1}{10 \cdot 10 \cdot 10} m = \frac{1}{10^3} m = 10^{-3} m$$



Wassermolekül, H_2O ,
H=Hydrogen (Wasserstoff), O= Oxygen (Sauerstoff)
 $\approx 3 \cdot 10^{-10} m$



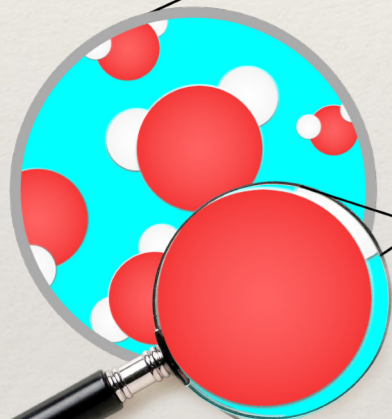
Wasserstoffatom : 1 Proton, 1 Elektron
H $\approx 5 \cdot 10^{-11} m$ (Bohr-Radius)
Proton $\approx 1.7 \cdot 10^{-15} m$
Electron $< 10^{-18} m$



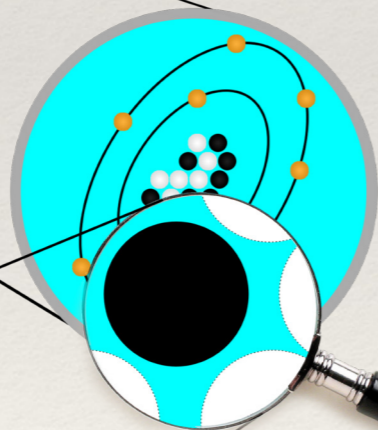
Einführung in Teilchenphysik



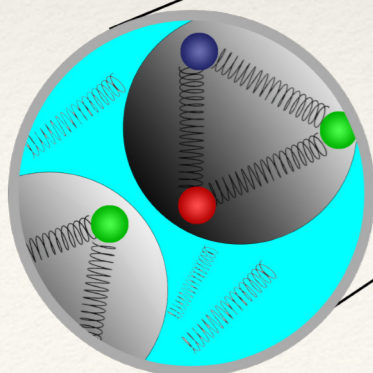
$$\begin{aligned} & \text{Wassertropfen, Millimeter} \\ & = \frac{1}{1000} m = \frac{1}{10 \cdot 10 \cdot 10} m = \frac{1}{10^3} m = 10^{-3} m \end{aligned}$$



Wassermolekül, H_2O ,
H=Hydrogen (Wasserstoff), O= Oxygen (Sauerstoff)
 $\approx 3 \cdot 10^{-10} m$



Wasserstoffatom : 1 Proton, 1 Elektron
H $\approx 5 \cdot 10^{-11} m$ (Bohr-Radius)
Proton $\approx 1.7 \cdot 10^{-15} m$
Electron $< 10^{-18} m$



Proton = 3 quarks (up, up, down) + quark-anti-quark + Gluonen
Quark $< 10^{-18} m$

Einführung in Teilchenphysik



Dass ich erkenne, was die Welt Im Innersten zusammenhält.

(Johann Wolfgang von Goethe)

Elektronen und Quarks sind Elementarteilchen (zumindest 2021)
Welche fundamentalen Kräfte wirken zwischen ihnen?

Einführung in Teilchenphysik

Gravitation:



- Lässt Äpfel von Bäumen fallen
- Lässt die Erde um die Sonne kreisen

Graviton

Einführung in Teilchenphysik

Gravitation:



- Lässt Äpfel von Bäumen fallen
- Lässt die Erde um die Sonne kreisen

Graviton

Elektromagnetische Wechselwirkung:



- Gewitter
- Elektrizität
- Bindet Elektronen an Atomkerne (Chemie)

Photon γ

**Quantenelektrodynamik
QED**

Einführung in Teilchenphysik

Gravitation:



- Lässt Äpfel von Bäumen fallen
- Lässt die Erde um die Sonne kreisen

Graviton

Elektromagnetische Wechselwirkung:



- Gewitter
- Elektrizität
- Bindet Elektronen an Atomkerne (Chemie)

Photon γ

**Quantenelektrodynamik
QED**

Starke Wechselwirkung:



- Bindet Protonen und Neutronen zu Atomkernen
- Bindet Quarks zu Protonen und Neutronen

Gluonen g

**Quantenchromodynamik
QCD**

Einführung in Teilchenphysik

Gravitation:



- Lässt Äpfel von Bäumen fallen
- Lässt die Erde um die Sonne kreisen

Graviton

Elektromagnetische Wechselwirkung:

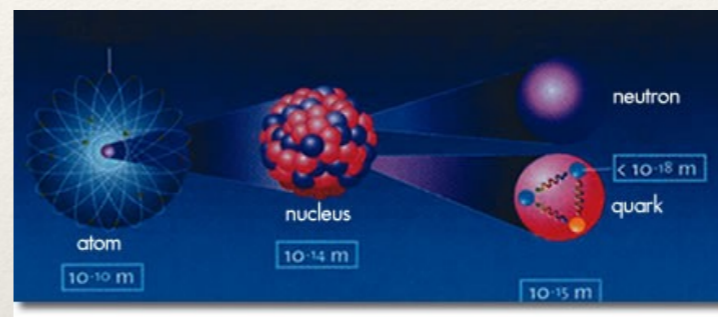


- Gewitter
- Elektrizität
- Bindet Elektronen an Atomkerne (Chemie)

Photon γ

**Quantenelektrodynamik
QED**

Starke Wechselwirkung:

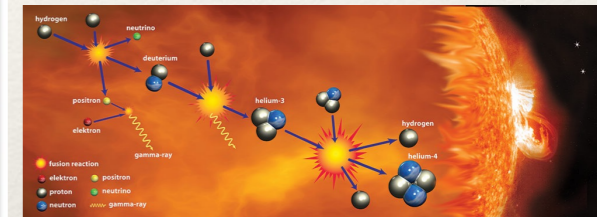


- Bindet Protonen und Neutronen zu Atomkernen
- Bindet Quarks zu Protonen und Neutronen

Gluonen g

**Quantenchromodynamik
QCD**

Schwache Wechselwirkung:



- Energieerzeugung in der Sonne
- Radioaktiver Zerfall

**Elektroschwache
Eichbosonen W^\pm, Z^0**

Einführung in Teilchenphysik

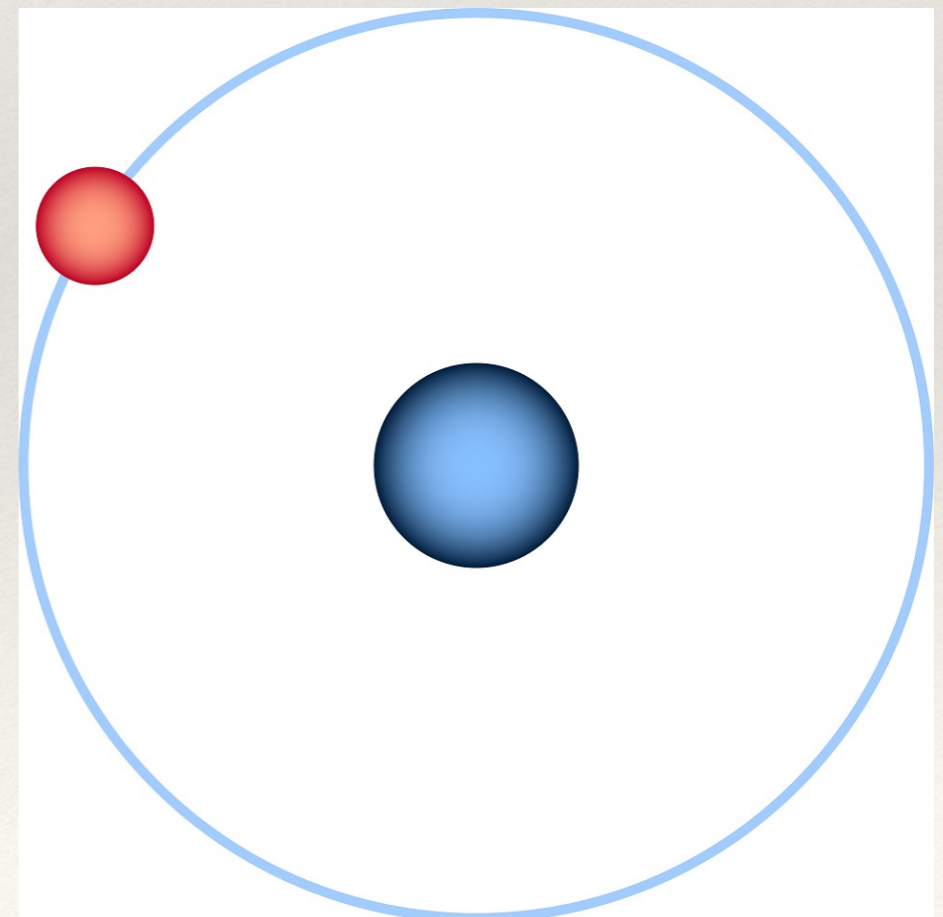
Im Mikrokosmos: Gravitation ist viel schwächer als andere Wechselwirkungen

Standardbeispiel: Elektrische Kraft zwischen Elektron und Proton vs. gravitative Kraft

$$\frac{F^{Elektr.}}{F^{Grav.}} = \frac{\frac{q_e q_p}{4\pi\epsilon_0 r^2}}{G \frac{m_e m_p}{r^2}} \approx 2 \cdot 10^{39}$$

Etwas alltagsfern und abstrakt
ABER

**In Siegen gibt es eine hohe Expertendichte auf dem
Gebiet der angewandten Gravitation**



Einführung in Teilchenphysik

Anschauliches und pädagogisch wertvolles Beispiel für Schwäche der Gravitation in Siegen



Forschungs-
gelände
Schloßpark



Forschungszentrum Geisweid

Gravitation ist viel schwächer als andere Wechselwirkungen

Einführung in Teilchenphysik

Zusammenfassung unserer Erkenntnisse über den Mikrokosmos:

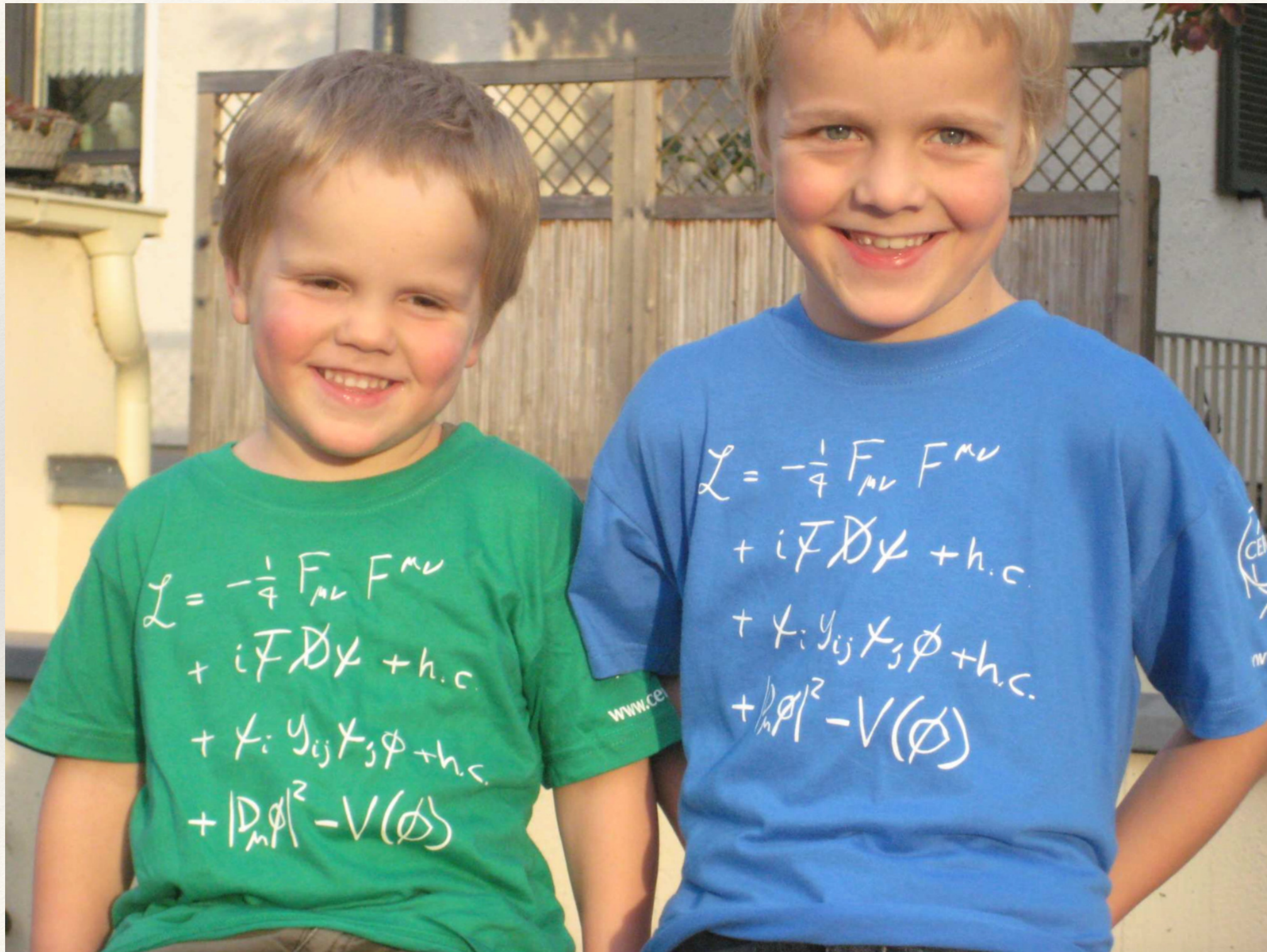
Standard Model of Elementary Particles

Es gibt folgende Elementarteilchen

| | | three generations of matter (fermions) | | | | | | |
|--------|----------------|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|
| | | I | II | III | | | | |
| mass | | $\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | | $\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$ | |
| charge | | $2/3$ | $2/3$ | $2/3$ | 0 | | 0 | |
| spin | | $1/2$ | $1/2$ | $1/2$ | 1 | | 0 | |
| | | u up | c charm | t top | g gluon | | H Higgs | |
| | QUARKS | $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ | 0 | | | |
| | | $-1/3$ | $-1/3$ | $-1/3$ | 0 | | | |
| | | $1/2$ | $1/2$ | $1/2$ | 1 | | | |
| | | d down | s strange | b bottom | γ photon | | | |
| | | $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ | $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ | | | |
| | | -1 | -1 | -1 | 0 | | | |
| | | $1/2$ | $1/2$ | $1/2$ | 1 | | | |
| | | e electron | μ muon | τ tau | Z Z boson | | | |
| | LEPTONS | $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ | $< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ | $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ | $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ | | | |
| | | 0 | 0 | 0 | ± 1 | | | |
| | | $1/2$ | $1/2$ | $1/2$ | 1 | | | |
| | | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | W W boson | | | |
| | | | | | | GAUGE BOSONS | | SCALAR BOSONS |

Mathematische Beschreibung dieses Wissens passt in eine 4 Zeilen lange Formel

Einführung in Teilchenphysik

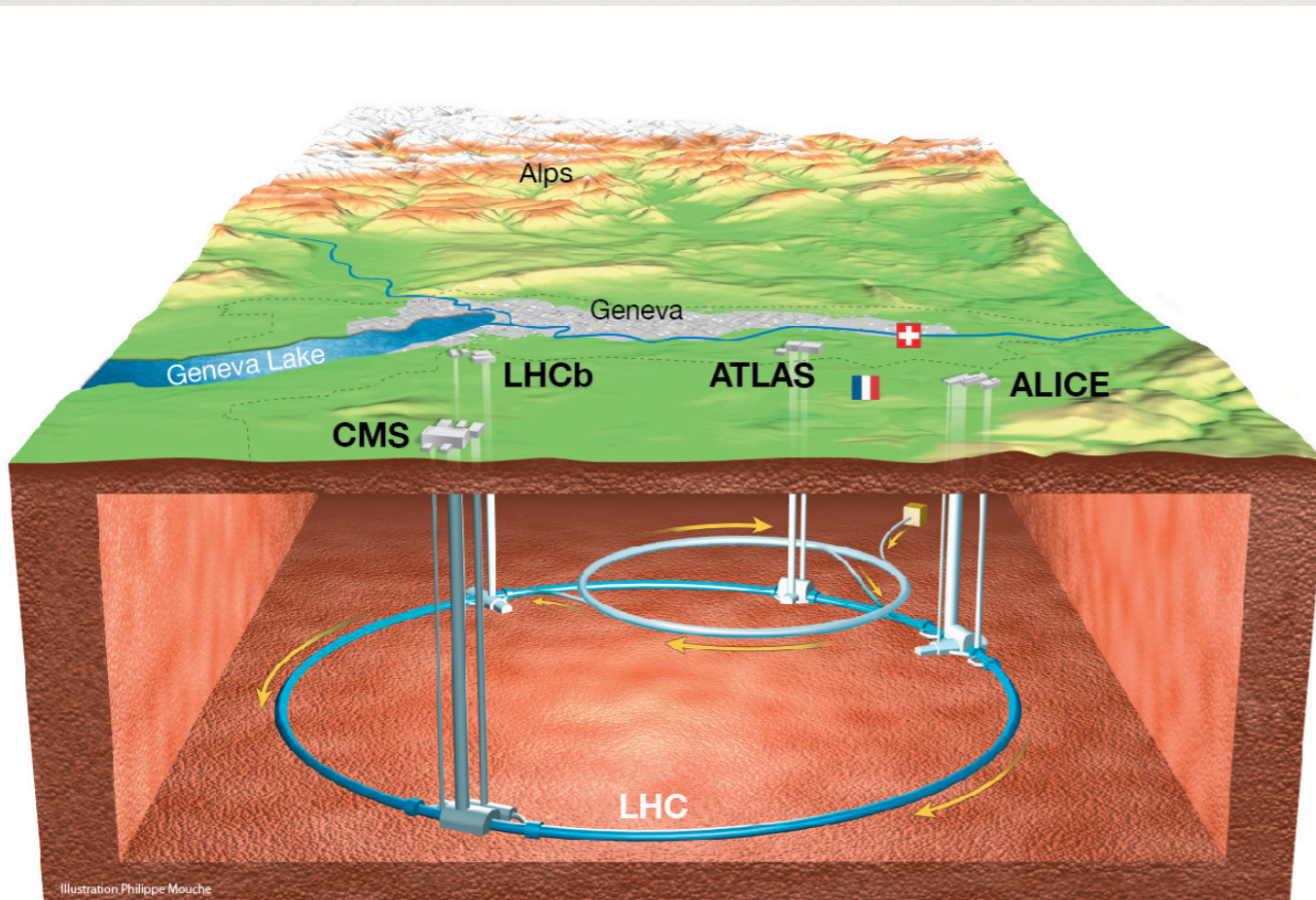


Einführung in Teilchenphysik

Woher wissen wir das alles?

Mikroskope der
Teilchenphysiker:

Large Hadron Collider (LHC),...



ANTRITTS- VORLESUNG

PROF. DR. MARKUS CRISTINZIANI

Top Quarks am CERN

*Neues zum schwersten Elementarteilchen
vom größten Teilchenbeschleuniger*



Bei den hochenergetischen Proton-Proton-Kollisionen hat der Large Hadron Collider am CERN in den vergangenen Jahren mehr als **100 Millionen Top Quarks** produziert.

Innerhalb von großen **internationalen Kollaborationen** untersuchen wir mit immer ausgefeilteren experimentellen Methoden die Eigenschaften dieses schwersten aller Quarks und vergleichen die Ergebnisse mit theoretischen Vorhersagen im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik.

In diesem Vortrag werde ich ausgewählte **Schlüsselmessungen** mit dem Top-Quark und die dafür benötigten experimentellen Werkzeuge besprechen.



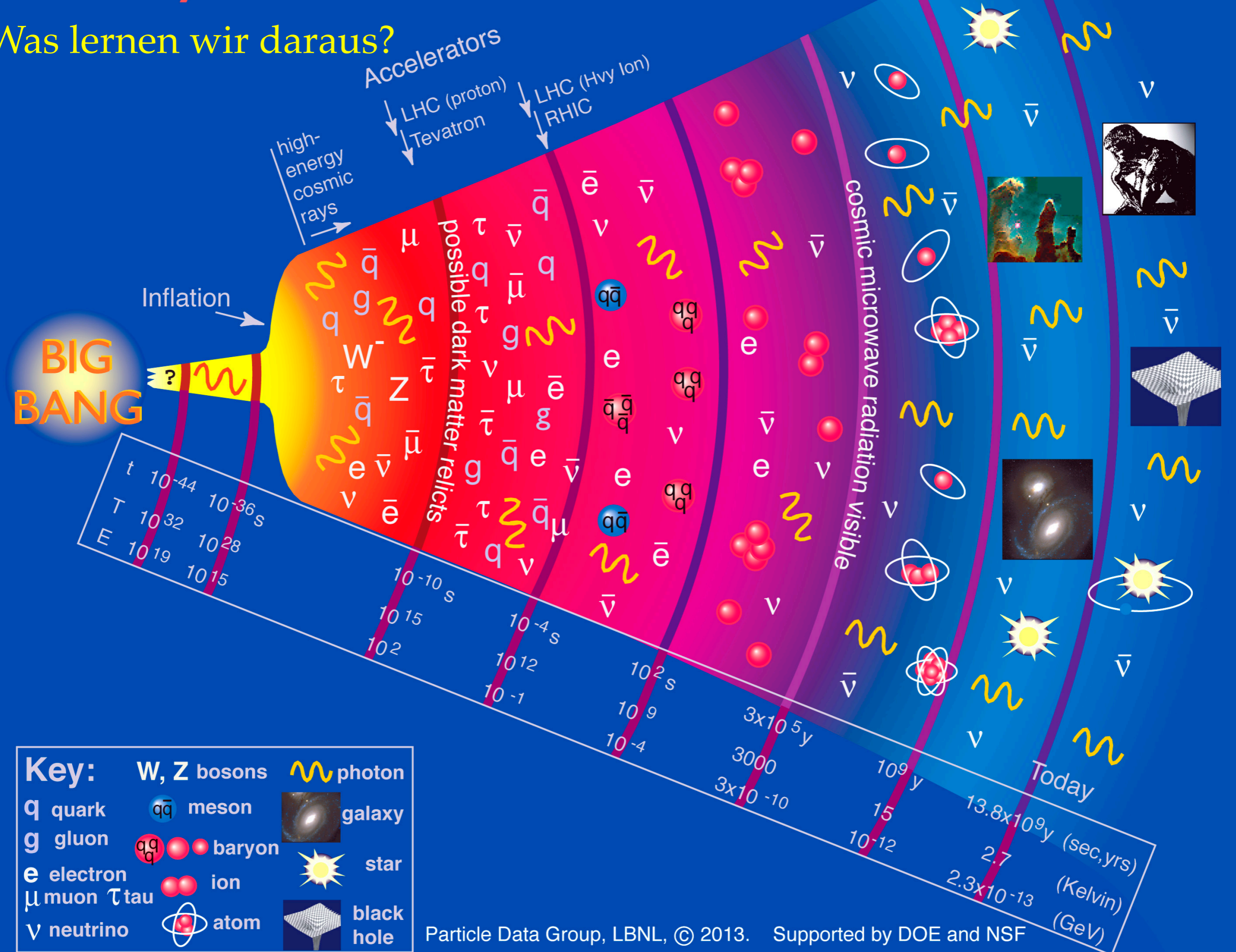
Donnerstag 21.10.2021

Der Vortrag findet um 17:15 Uhr
im Hörsaal EN D - 114 statt.

Prof. Dr. Markus Cristinziani
cristinziani@physik.uni-siegen.de

History of the Universe

Was lernen wir daraus?



Einführung in Teilchenphysik



(Wann) sind wir fertig?

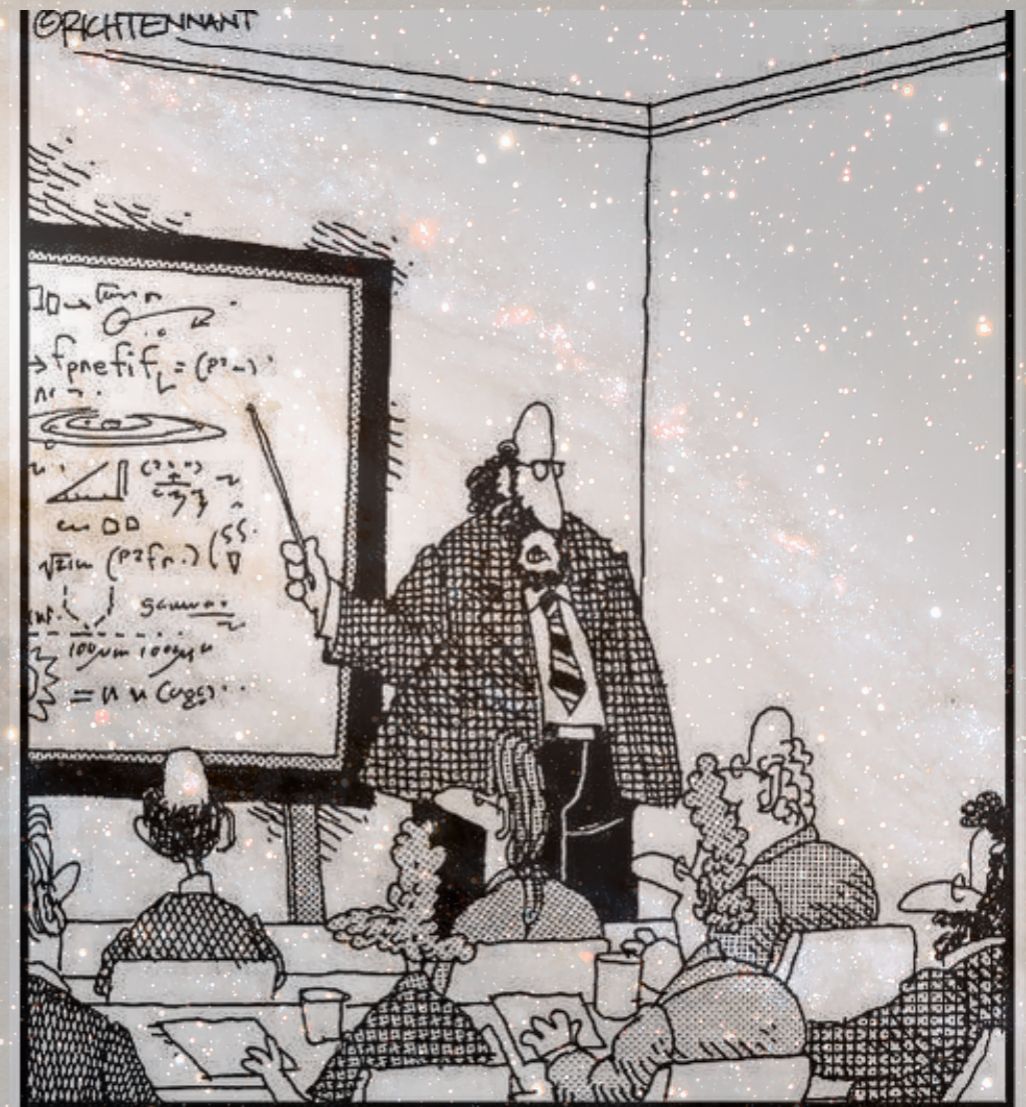
Einführung in Teilchenphysik

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist vielleicht die erfolgreichste (bzgl. Präzision) Theorie in den Naturwissenschaften, aber es lässt einige Fragen unbeantwortet.

- Wie wurde Materie im frühen Universum erzeugt? **Baryogenese**
- Was ist **dunkle Materie**?
- Warum gibt es drei Familien von Quarks und Leptonen?
-

Ausserdem gibt es nun einige Messungen am LHC, die nicht mit den Erwartungen des Standardmodells übereinstimmen

Suche nach neuer Physik



“Along with ‘Antimatter,’ and ‘Dark Matter,’ we’ve recently discovered the existence of ‘Doesn’t Matter,’ which appears to have no effect on the universe whatsoever.”

Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung



II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIc Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

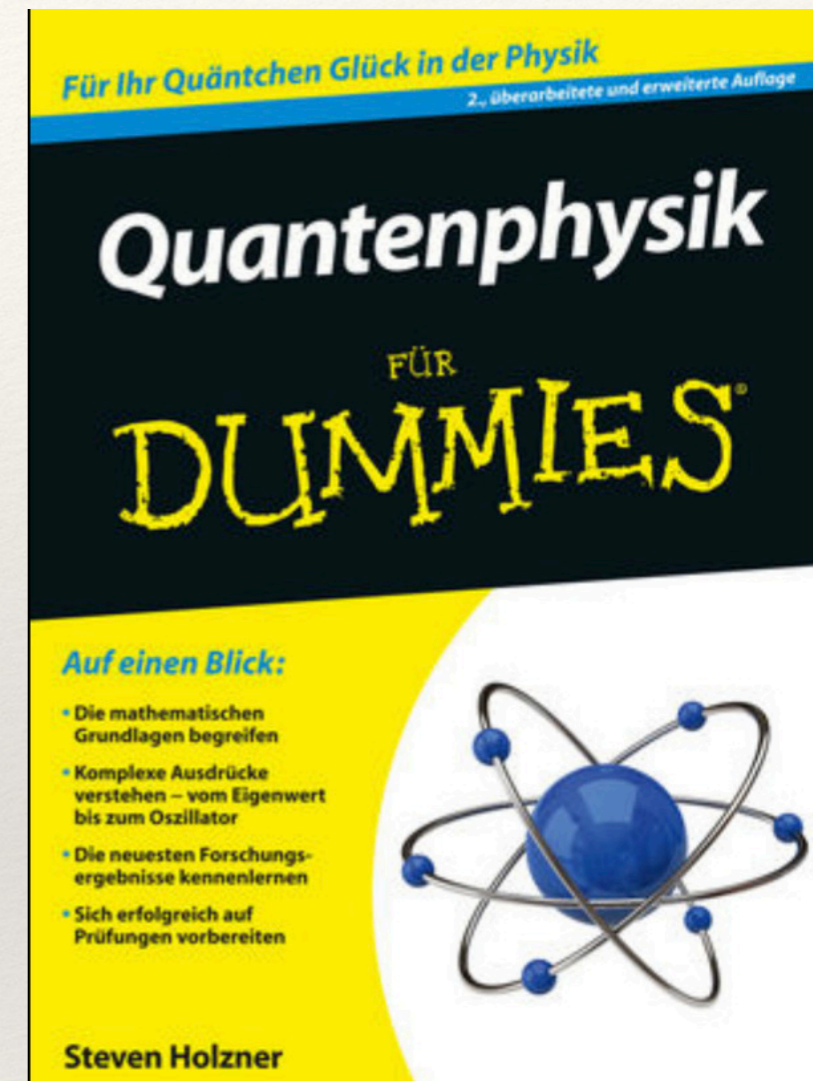
III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

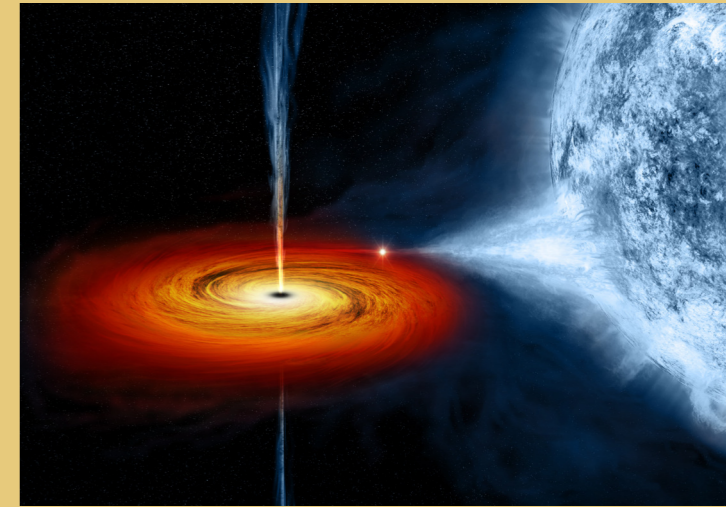
IV Schlussbemerkungen



Grundlagenforschung/angewandte Forschung

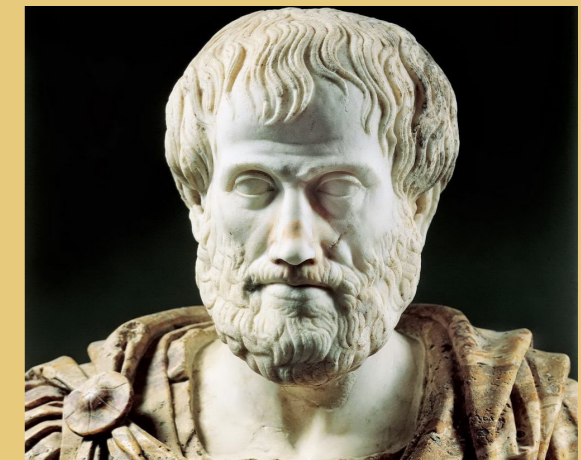
Grundlagenforschung:

- Erweiterung des menschlichen Wissens
 - unerwartete Entdeckungen
- Wirtschaftliche Verwertbarkeit ist **nicht** das Hauptziel



Angewandte Forschung:

- Verbesserung von Technologien - erwartete/erhoffte Entdeckungen
- Wirtschaftliche Verwertbarkeit ist ein **vorrangiges** Ziel



Gesundes Mittelmaß: hätten unsere Vorfahren ausschließlich in angewandte Forschung investiert, dann hätten wir heute die höchstentwickeltesten Fackeln, aber wir hätten nie die LED erfunden....

Grundlagenforschung: Spin-offs

- Quantenmechanik

- ★ Laser
- ★ Computer
- ★ Halbleiter
- ★ Quantum Computer



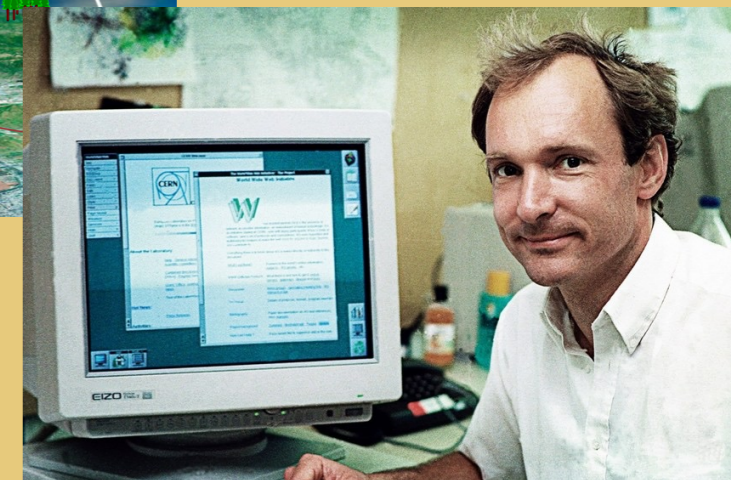
- Allgemeine Relativitätstheorie

- ★ GPS



- Teilchenphysik

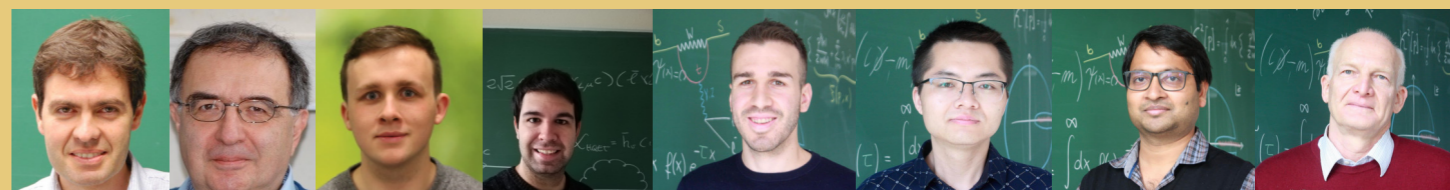
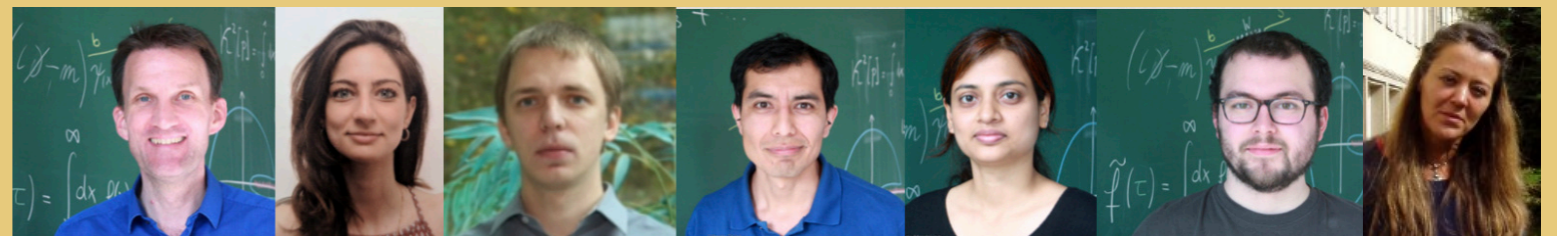
- ★ WWW
- ★ Strahlentherapie



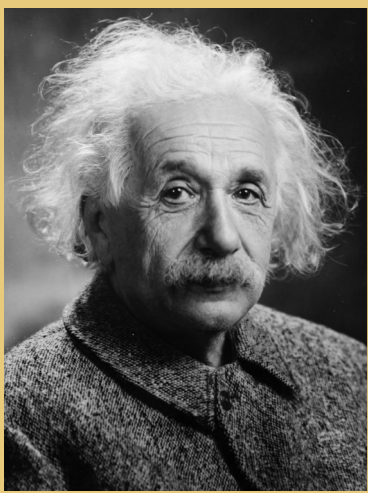
- Ausbildung junger Menschen

- ★ Mechaniker im Formel 1-Team
- ★ Die meisten unserer Doktoranden und post-docs gehen in die Wirtschaft

- Beitrag zur Kultur, Internationalisierung, ...



Auch Zahlen sind relativ



Britischer LHC Beitrag

2016: UK 14.64% von 1127.2 Mill. CHF
dies entspricht **2£ pro UK Einwohner**

1 Pint pro Jahr!

THE pint of science!



Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIb Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

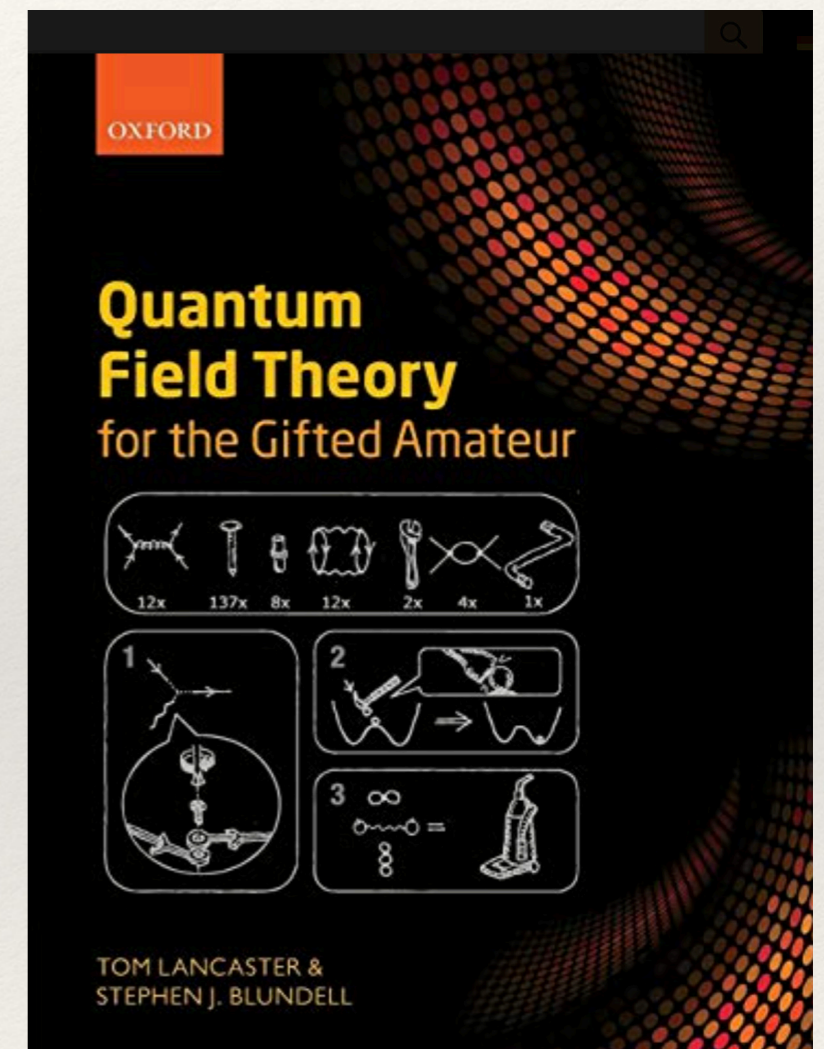
III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

IV Schlussbemerkungen



Einführung in Flavour Physik

Es gibt (mindestens) 6 Arten (= **Flavours**) von Quarks

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} q = +2/3 \\ q = -1/3 \end{pmatrix}$$

- Proton = $|uud\rangle + \dots$
- (Heavy) Flavour Physik = b,c quark

Einführung in Flavour Physik

Es gibt (mindestens) 6 Arten (= **Flavours**) von Quarks

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} q = +2/3 \\ q = -1/3 \end{pmatrix}$$

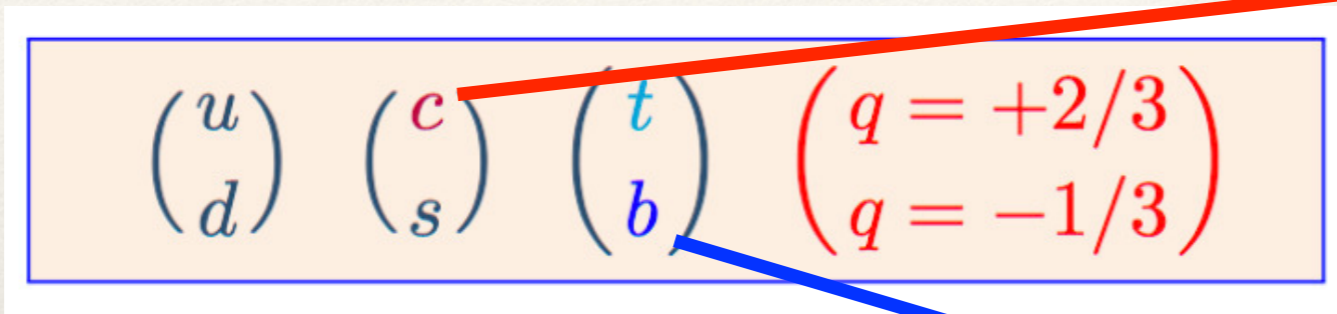
BES III, LHCb,..

ATLAS, BELLE II,
CMS, LHCb,..

- Proton = $|uud\rangle + \dots$
- (Heavy) Flavour Physik = b,c quark

Einführung in Flavour Physik

Es gibt (mindestens) 6 Arten (= **Flavours**) von Quarks



BES III, LHCb,..

ATLAS, BELLE II,
CMS, LHCb,..

- Proton = $|uud\rangle + \dots$
- (Heavy) Flavour Physik = b,c quark

| | $B_d = (\bar{b}d)$ | $B^+ = (\bar{b}u)$ | $B_s = (\bar{b}s)$ | $B_c^+ = (\bar{b}c)$ |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Mass (GeV) | 5.27965(12) | 5.27934(12) | 5.36688(14) | 6.27447(32) |
| Lifetime (ps) | 1.519(4) | 1.638(4) | 1.516(6) | 0.510(9) |
| $\tau(X)/\tau(B_d)$ | 1 | 1.076(4) | 0.998(5) | 0.336(6)* |

In etwa gleiche Lebensdauern

Größere Bandbreite an Lebensdauern

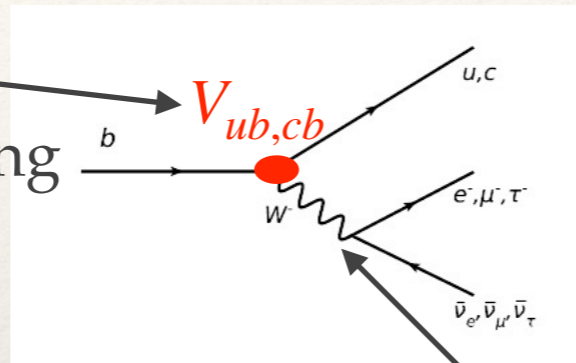
| | $D^0 = (\bar{u}c)$ | $D^+ = (\bar{d}c)$ | $D_s^+ = (\bar{s}c)$ |
|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Mass (GeV) | 1.86484(5) | 1.86966(5) | 1.96835(7) |
| Lifetime (ps) | 0.4101(15) | 1.040(7) | 0.504(4) |
| $\tau(X)/\tau(D^0)$ | 1 | 2.536(17) | 1.229(10) |

Einführung in Flavour Physik

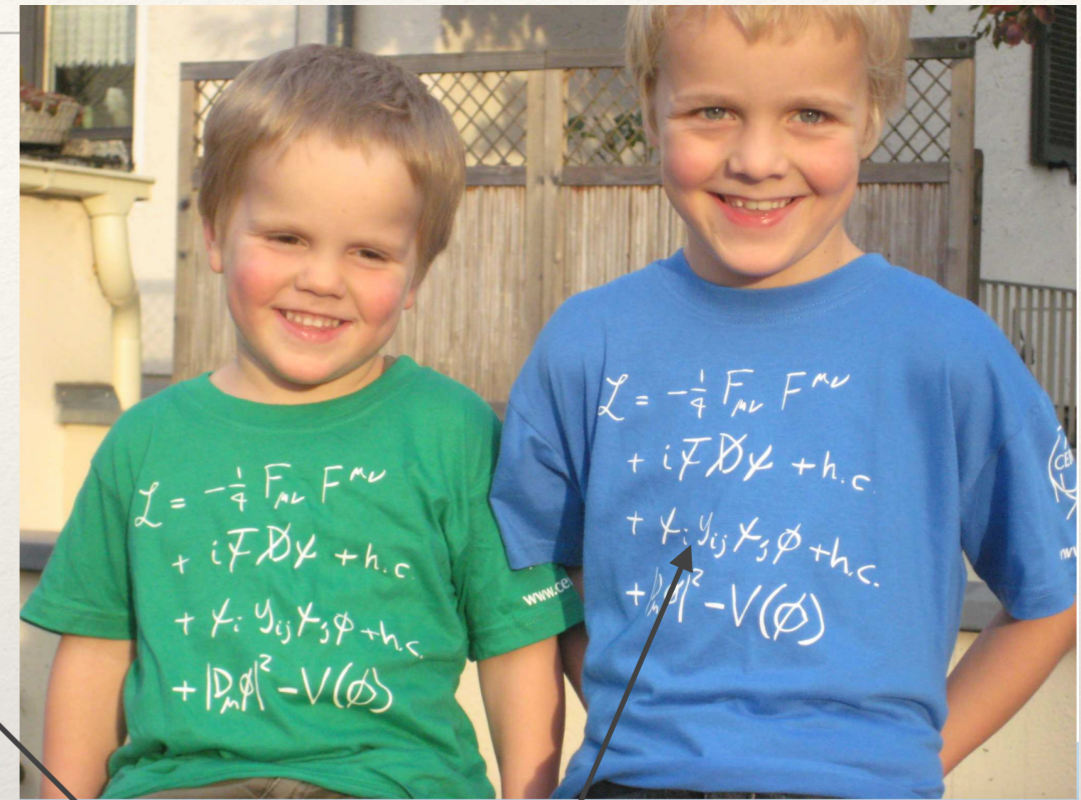
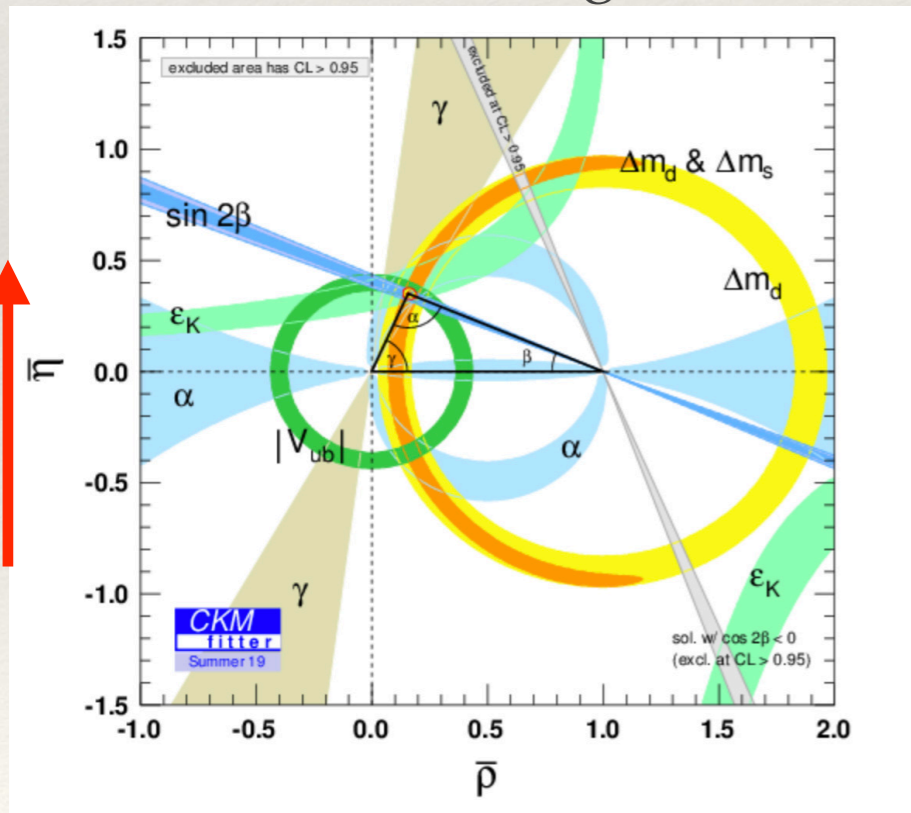
➤ Schwache Zerfälle von b-quarks

CKM Element $V_{ub,cb}$

V_{xz} complex \Rightarrow CP Verletzung



CPV \Rightarrow Materie ungleich Antimaterie



Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) Matrix

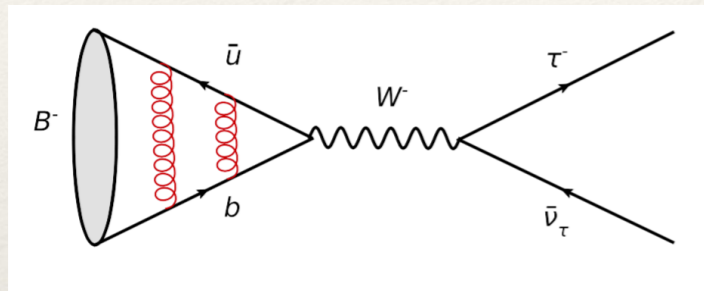
Experiment direkt vs. CKM fit

$$\gamma^{\text{HFLAV}} = 66.2^\circ \pm 3.5^\circ \text{ vs. } \gamma^{\text{CKMFitter}} = 65.80^{+0.94}_{-1.29}^\circ$$

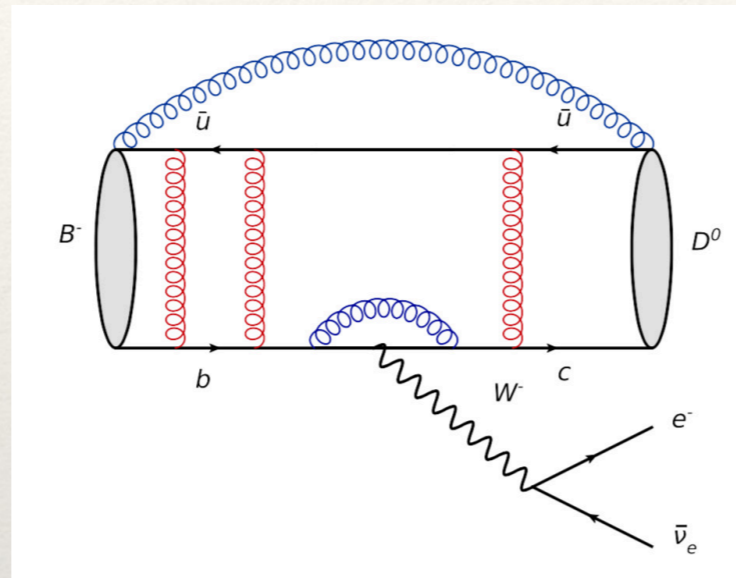
➤ **Fakt #1:** SM und CKM haben zahlreiche Tests bestanden
dominanter Beitrag zur Flavourstruktur der Natur

Einführung in Flavour Physik

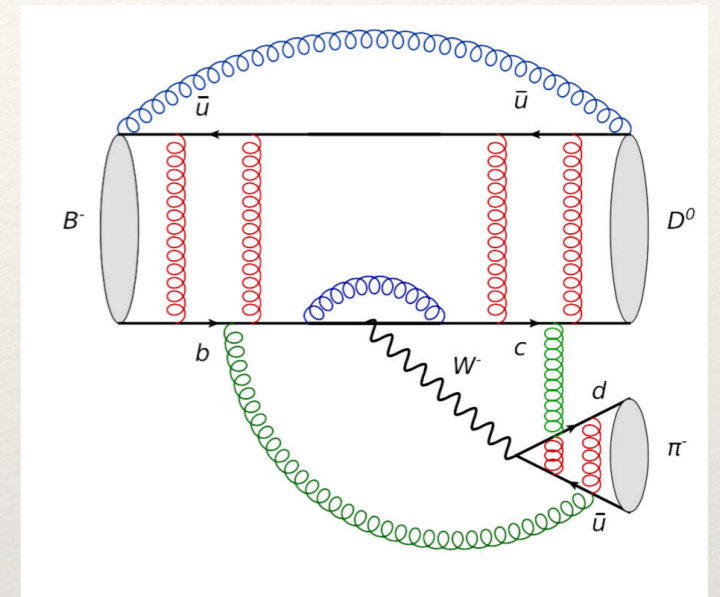
- Leptonische Zerfälle



- Semileptonische Zerfälle



- Nichtleptonische Zerfälle

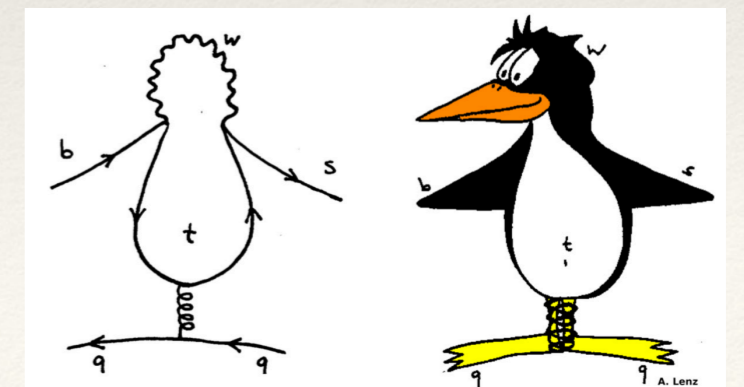
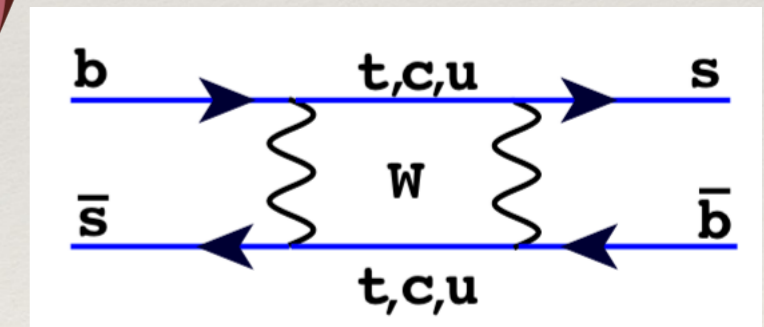
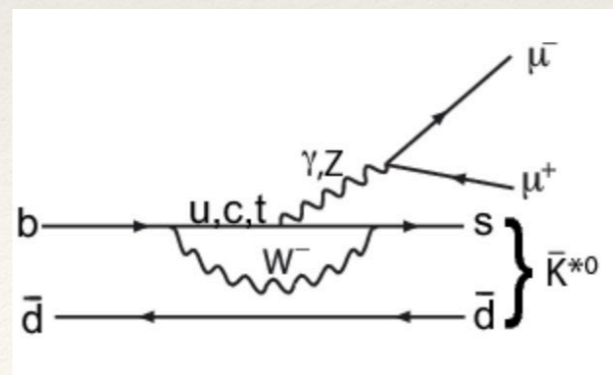
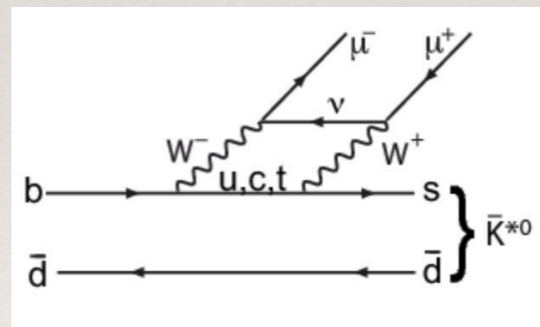
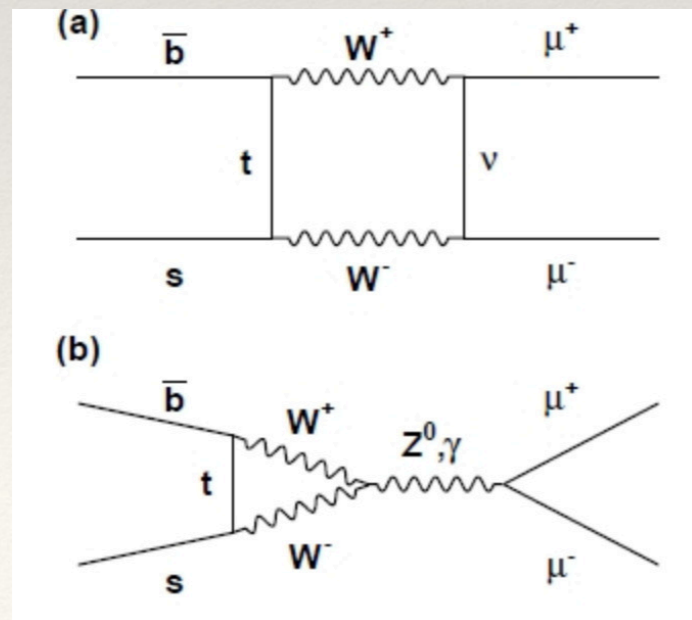
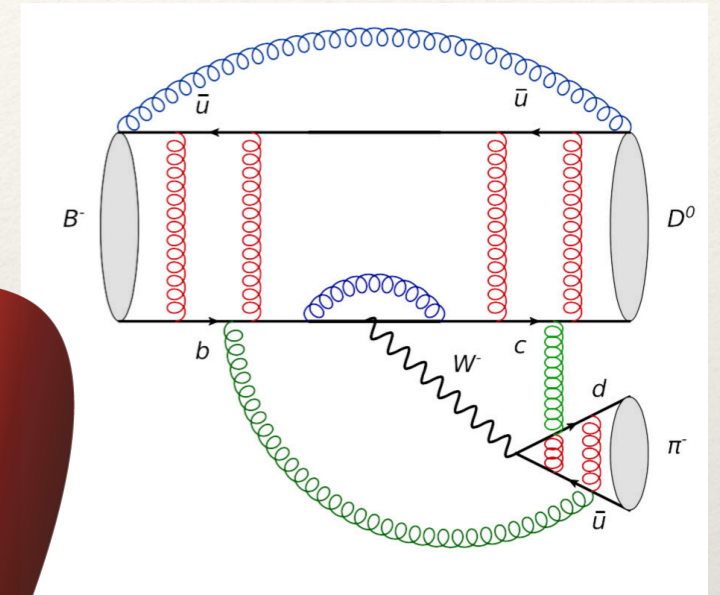
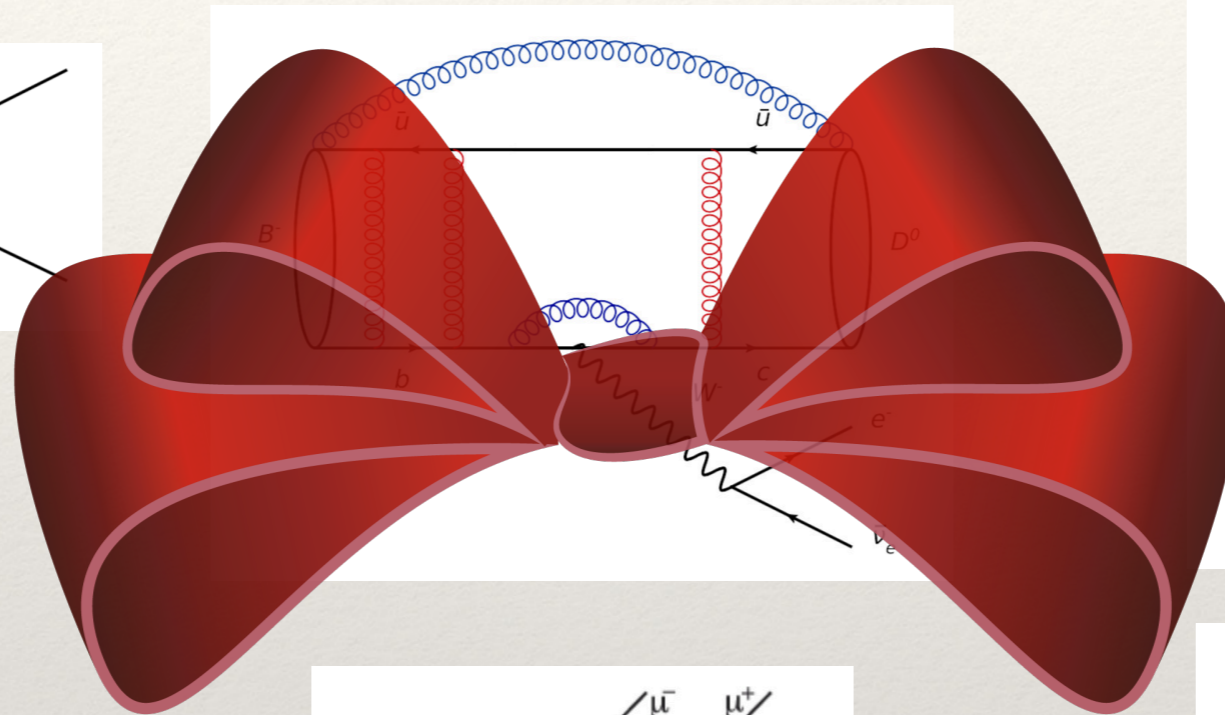
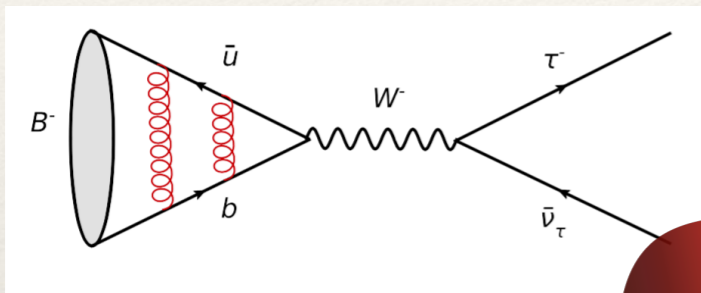


Einführung in Flavour Physik

• Leptonische Zerfälle

• Semileptonische Zerfälle

• Nichtleptonische Zerfälle



Warum Flavour Physik?

I) Baryonenasymmetrie im Universum:

Die Brechung der **CP Symmetrie** - Materie und Antimaterie verhalten sich dann unterschiedlich - ist notwendig um die Existenz von Materie im Universum zu erklären.

CP Verletzung wurde bisher nur im Zerfall von Hadronen gefunden.



II) Indirekte Suche nach Neuer Physik:

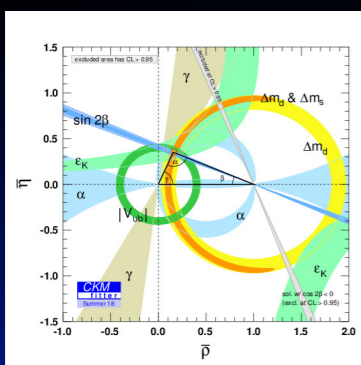
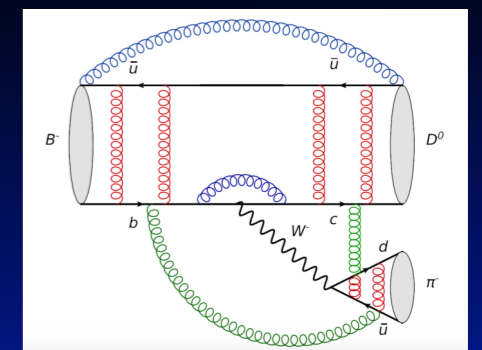
Erfolge bei der Suche nach **Physik jenseits des SM** können entweder mit brachialer Gewalt (= Colliderphysik) oder mit subtileren Methoden wie dem Vergleich von Präzisionsmessungen mit Präzisionsrechnungen erreicht werden.

$$f^{\text{SM}} + f^{\text{NP}} = f^{\text{Exp}}$$

III) Verständnis der starken Wechselwirkung (QCD):

Hadronenzerfälle werden massiv von **QCD** Effekten geprägt - die interessierende zugrundeliegende Zerfallsdynamik kann dadurch völlig verdeckt sein.

Theorieinstrumente wie **Effektive Theorien, Heavy Quark Expansion, HQET, SCET,...** ermöglichen eine Kontrolle der QCD-Effekte - diese Hilfsmittel werden nun auch in anderen Gebieten wie Collider Physik, Higgs Physik, DM Suchen... verwendet.

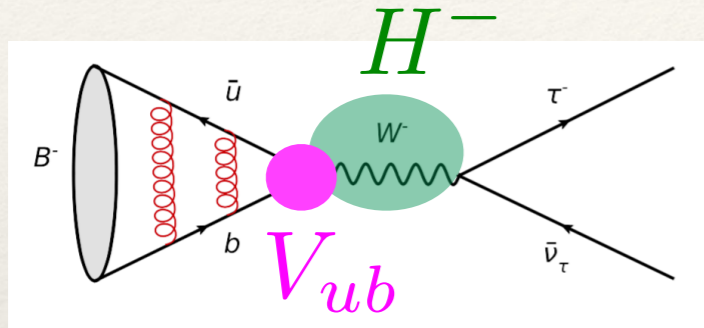


IV) Bestimmung der Standardmodellparameter:

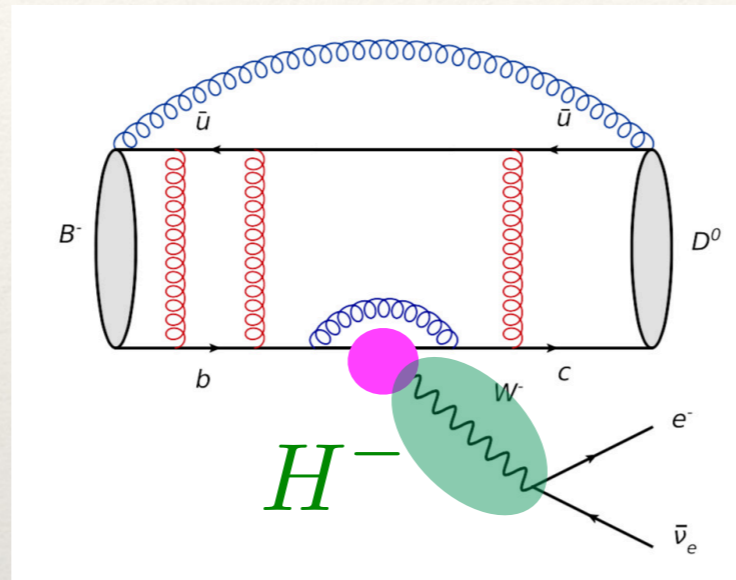
Hadronenzerfälle hängen von SM Parametern wie **Quarkmassen** und **CKM Kopplungen** (einzige bekannte Quelle von CP Verletzung im SM!). Eine präzise Kenntnis dieser Parameter ist in vielen Bereichen der Teilchenphysik notwendig.

Warum Flavour Physik?

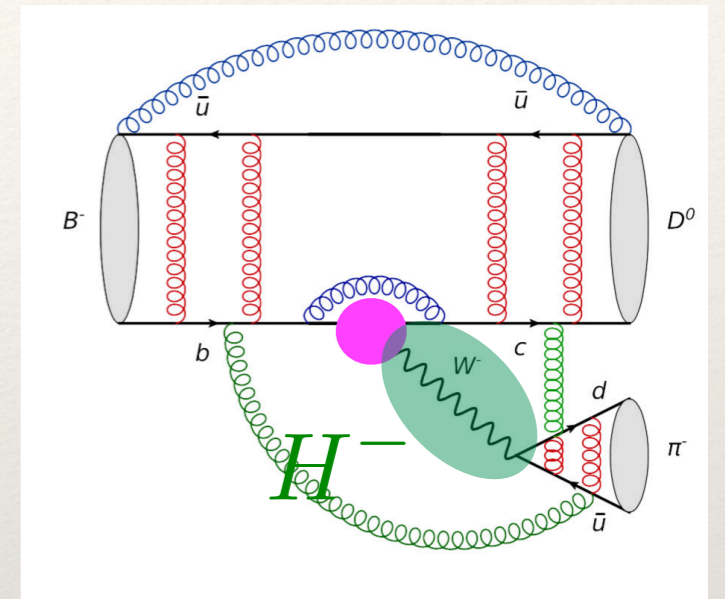
- Leptonische Zerfälle
- Semileptonische Zerfälle
- Nichtleptonische Zerfälle



$$\langle 0 | \bar{b} \gamma^\mu \gamma_5 u | B_q(p) \rangle = i f_{B_q} p^\mu$$



$$\langle D^0(p_D) | \bar{c} \gamma_\mu b | B^-(p_B) \rangle = f_+^{B^- \rightarrow D^0}(q^2) \left(p_B^\mu + p_D^\mu - \frac{m_B^2 - m_D^2}{q^2} q^\mu \right)$$

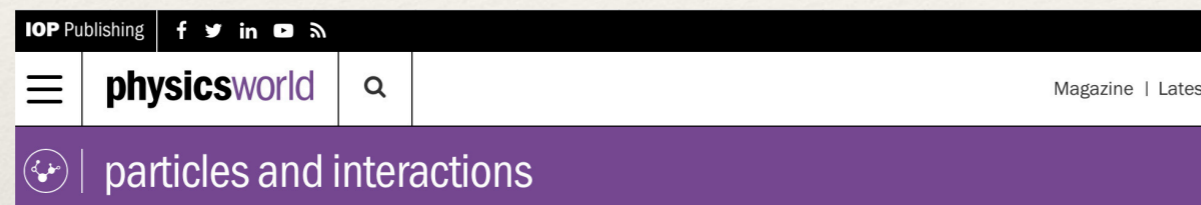


$$\langle D^0 \pi^- | \bar{c} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) b \cdot \bar{u} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) d | B^- \rangle \approx \langle D^0 | \bar{c} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) b | B^- \rangle \cdot \langle \pi^- | \bar{u} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) d | 0 \rangle$$

- I) Imaginärteil der CKM-Elemente = CP Verletzung
- II) Anstelle eines W-Bosons könnte ein geladenes Higgsteilchen ausgetauscht werden
- III) QCD Effekte sind essentiell: Zerfallskonstanten, Formfaktoren, Faktorisierung
- IV) Bestimmung der SM-Parameter

Warum Flavour Physik?

- Riesige Flavour-Datenmenge: **B-Fabriken, Tevatron, BES III** und **LHC (ATLAS, CMS, LHCb)**, **NA62** sowie **Belle II**



FLAVOUR PHYSICS | NEWS

LHCb observes CP violation in charm decays

7 May 2019



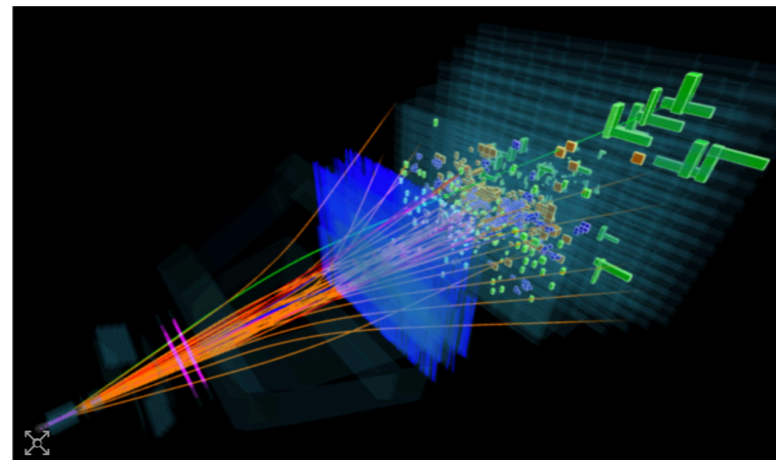
Experimental highlight The LHCb detector in December being prepared for upgrades. Credit: CERN-PHOTO-201812-329-16.

On the morning of 21 March, at the 2019 Rencontres de Moriond in La Thuile, Italy, the LHCb collaboration announced the discovery of charge-parity (CP) violation in the charm system. Met with an impromptu champagne celebration, the result represents a

PARTICLES AND INTERACTIONS | RESEARCH UPDATE

Charmed baryon puzzles particle physicists by living longer

14 Aug 2018



Colliding protons: a collision captured by LHCb. (Courtesy: LHCb/CERN)

The most precise measurement of the lifetime of the Ω_c^0 particle has been made by physicists working on the LHCb experiment at CERN. The charmed baryon decays within femtoseconds after being produced in proton-proton collisions at the Large Hadron Collider (LHC). Surprisingly, the newly measured lifetime is about four times longer than the average of



Marco Gersabeck (he/him)

@MarcoGersabeck

BREAKING: Announced at [#CHARM2020](#): @LHCb_experiment announces first observation of non-zero mass difference of neutral mesons containing charm quarks (D^0 mesons). @MarthaHilton11 of @UoMparticle @UoMPhysics was one of the analysts. Here's what this [#discovery](#) means 1/7

Outline

- Introduction
- D^0 oscillation and CP violation
- Impact of LHCb in the charm sector
 - CP violation in the decay
 - CP violation in D^0 mixing and in the interference between mixing and decay
 - New for today: Observation of the mass difference between neutral charm-meson eigenstates with the $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ decay
- Impact of the new D^0 mixing results on the world averages
- Conclusions

Angelo Carbone

CHARM 2020, 31 May - 4 June



Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIb Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

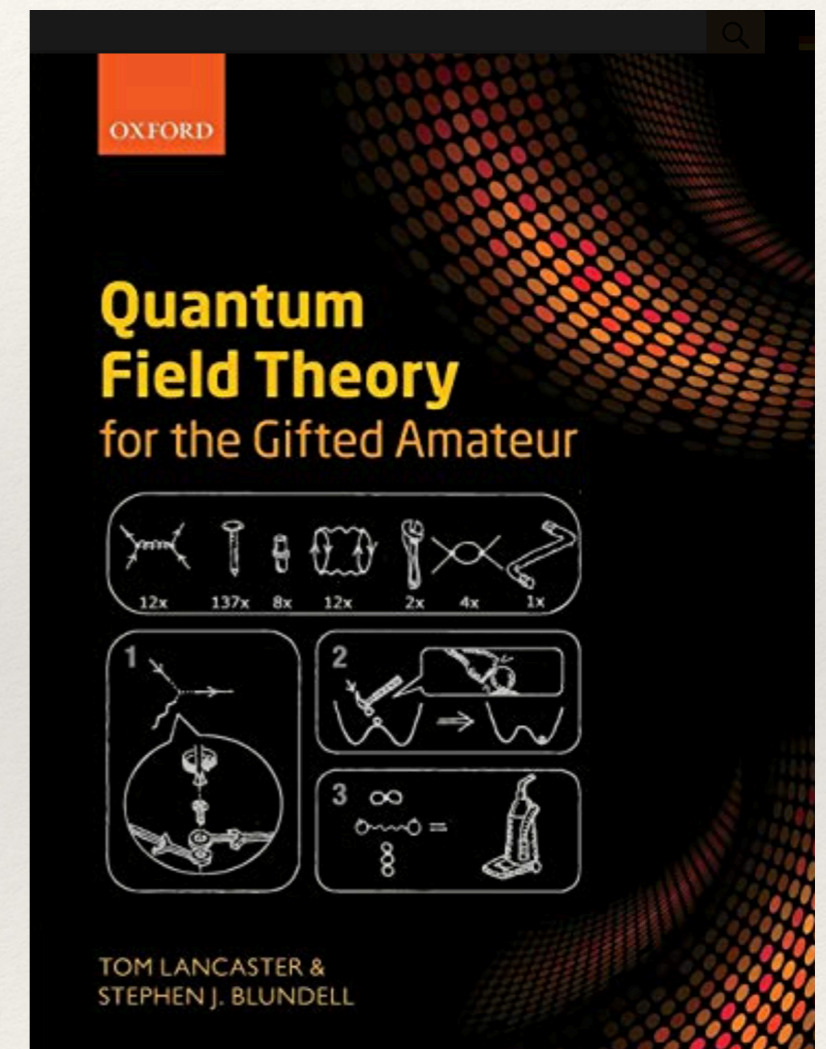
III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

IV Schlussbemerkungen



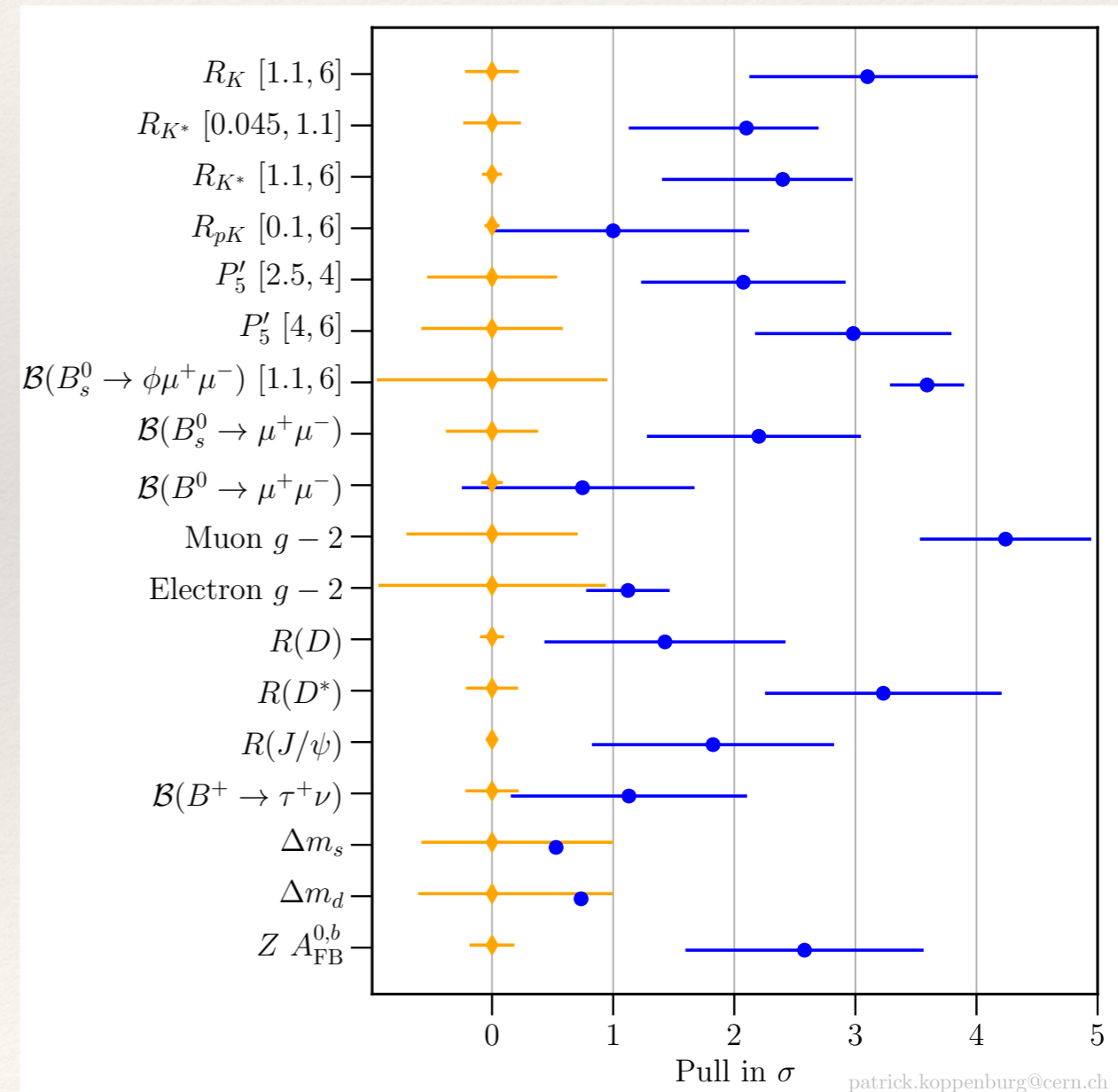
Flavour Anomalien

➤ Fakt #3: Erste Ungereimtheiten tauchen auf (und bleiben)

Standardabweichungen: 3 sigma = 0.27%, 6 sigma = 2×10^{-7} %, Lotto 7×10^{-7} %

- 3-7: Semileptonische Schleifenzerfälle (kleine BSM Beiträge)
- 3-7: Nichtleptonische "Tree-level" Zerfälle (grosse BSM Beiträge)
- 3.9: Semileptonische "Tree-level" Zerfälle (grosse BSM Beiträge)
- 3.6: B-Mischungsphase (Dimuonasymmetrie)
- 2.x: K-pi Puzzle
- 2.x: tau -> mu nu nu/tau -> e nu nu
- 2.x: Vus: K vs. tau, CKM Unitarität

**Langsames, gehäuftes Auftreten von neuer Physik
oder
systematische Unterschätzung von Unsicherheiten?**



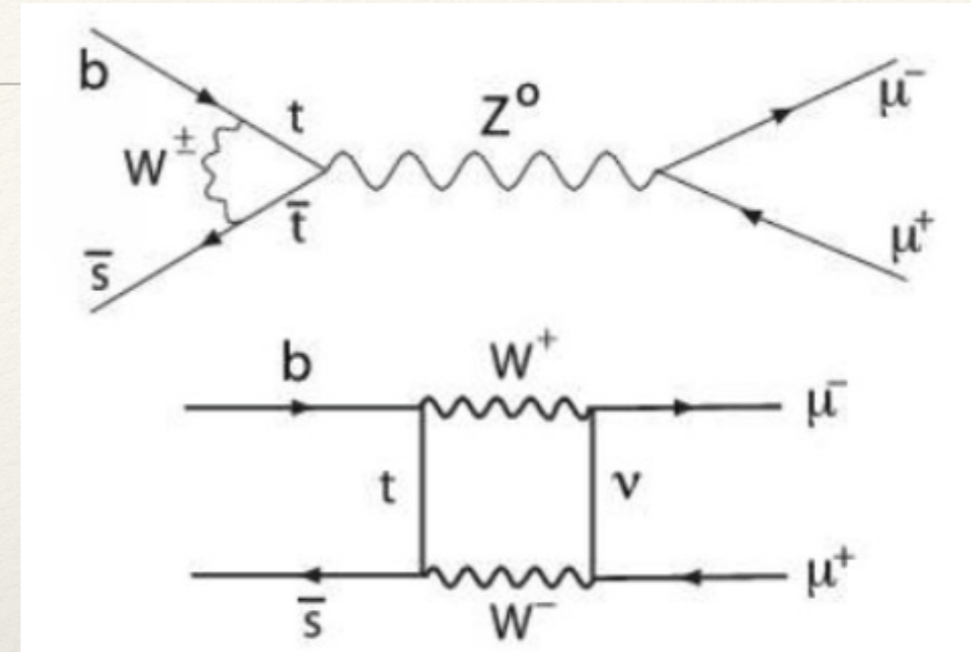
$$b \rightarrow s\mu\mu$$

Flavour Anomalien auf Schleifenniveau

“relativ” einfache hadronische Struktur

$B_{d,s} \rightarrow \mu\mu$: Zerfallskonstante f_{B_s}

$H_b \rightarrow H_q\mu\mu$: Formfaktor $F^{H_b \rightarrow H_q}(q^2)$



Können mit Summenregeln oder auf dem Gitter bestimmt werden

Verlässliche theoretische Bestimmung von perturbativen Korrekturen, Zerfallskonstanten und Formfaktoren unabdingbar!

Observablen:

1. Verzweigungsverhältnisse: $Br(B_s \rightarrow \phi\mu\mu)$, $Br(B \rightarrow K^*\mu\mu)$,
2. Winkelobservablen, z.B. P'_5 hadronische Unsicherheiten heben sich teilweise weg
3. Verhältnisse: $R_K = \frac{Br(B^+ \rightarrow K^+\mu^-\mu^+)}{Br(B^+ \rightarrow K^+e^-e^+)}$ hadronische Unsicherheiten heben sich weg

Flavour Anomalien auf Schleifenniveau

Konsistentes Bild von zahlreichen (> 200) Observablen:

alle können mit einem sehr einfachen Szenarium gefittet werden

(BSM = -1/4 SM)

z.B. modifiziere nur den Wilsonkoeffizient C9 oder C10!

$$\mathcal{H}_{eff} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{CKM} \left[(C_9^{SM} + C_9^{BSM}) Q_9 + (C_{10}^{SM} + C_{10}^{BSM}) Q_{10} \right]$$

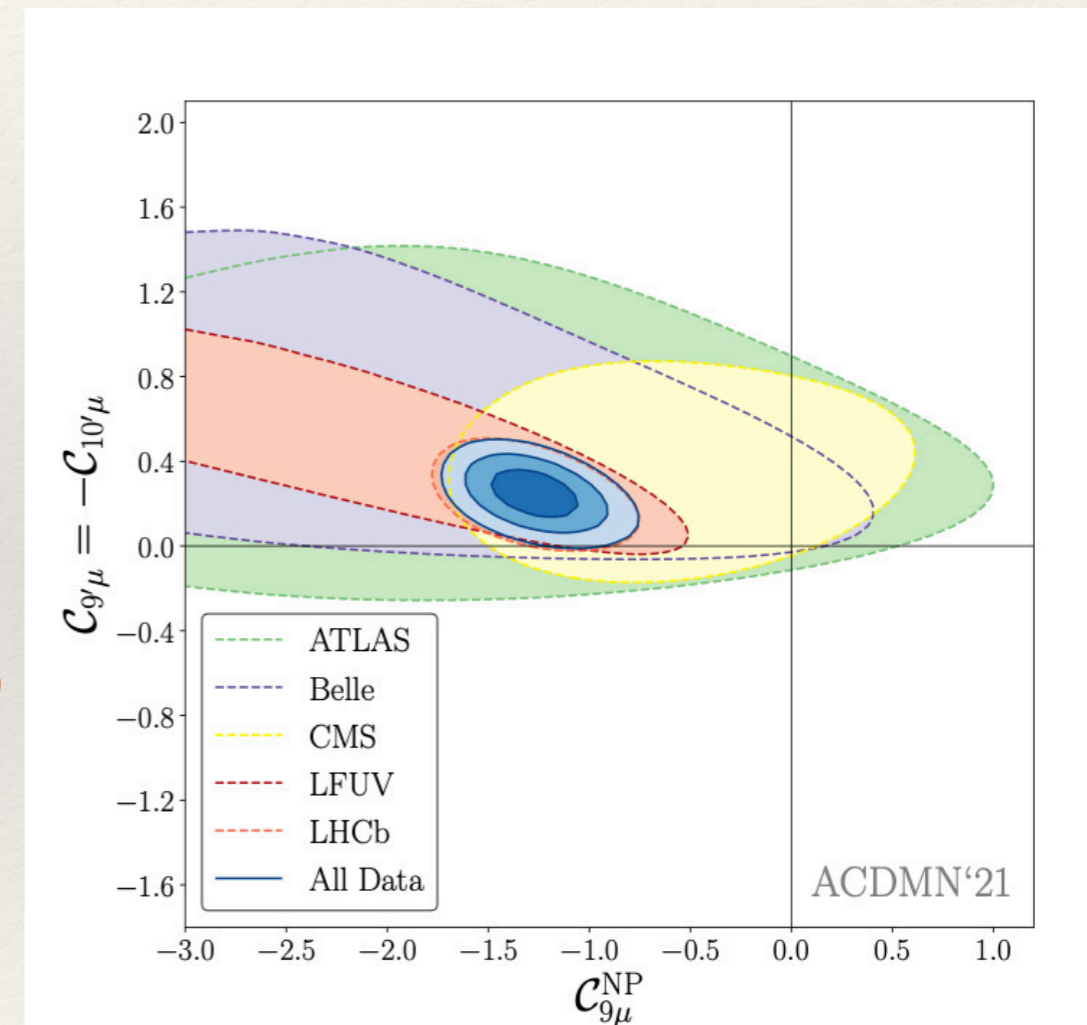
z.B. 2104.08921: Exp 7 sigma von SM entfernt
(30 mal unwahrscheinlicher als ein Lottogewinn)

Alguero, Capdevilla, Descotes-Genon, Matias, Novoa-Brunet

b to sll global fits after Moriond 2021 results

Plus viele andere Fit-Gruppen

$$f^{SM} + f^{NP} = f^{Exp}$$



Verlässliche theoretische Bestimmung von perturbativen Korrekturen, Zerfallskonstanten und Formfaktoren unabdingbar!

Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIb Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

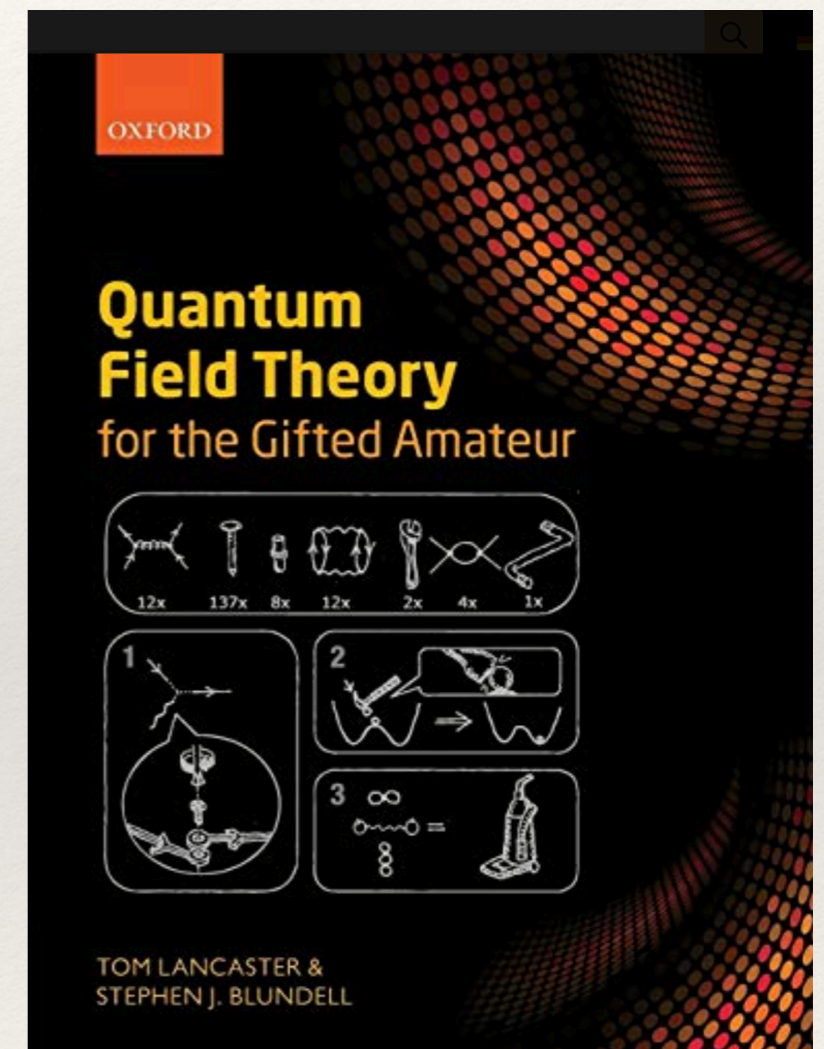
III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

IV Schlussbemerkungen



Physik jenseits vom SM

Hunderte von Publikationen...

Liste von Modellen:

- **Z'** - neue U(1) oder SU(2) W'
- **Leptoquarks**
- **2HDM**
- **SUSY**
- **Vektorartige Quarks**
- **Composite Modelle**
- **WED**
-
-

**Die Qual der Wahl
oder
Die Wahl der Qual?**



Peter Paul Rubens (geb. in Siegen), Die Wahl des Paris ca 1638

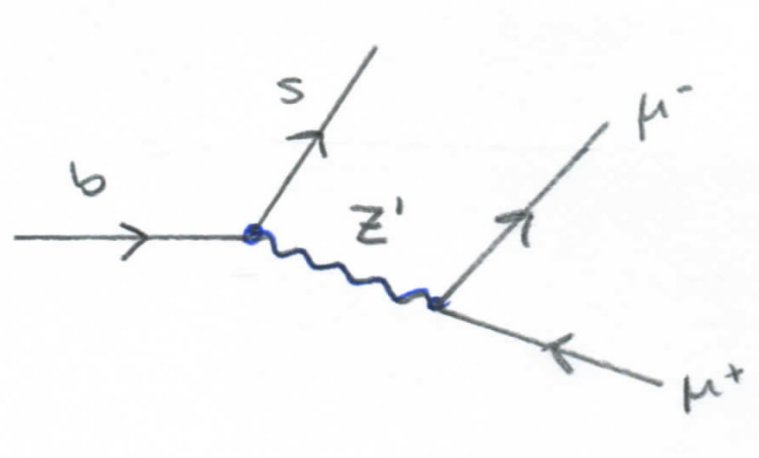
Die Qual der Wahl?



Peter Paul Rubens, ca 1638

Paris wählte Aphrodite -> Trojanischer Krieg

Physik jenseits vom SM

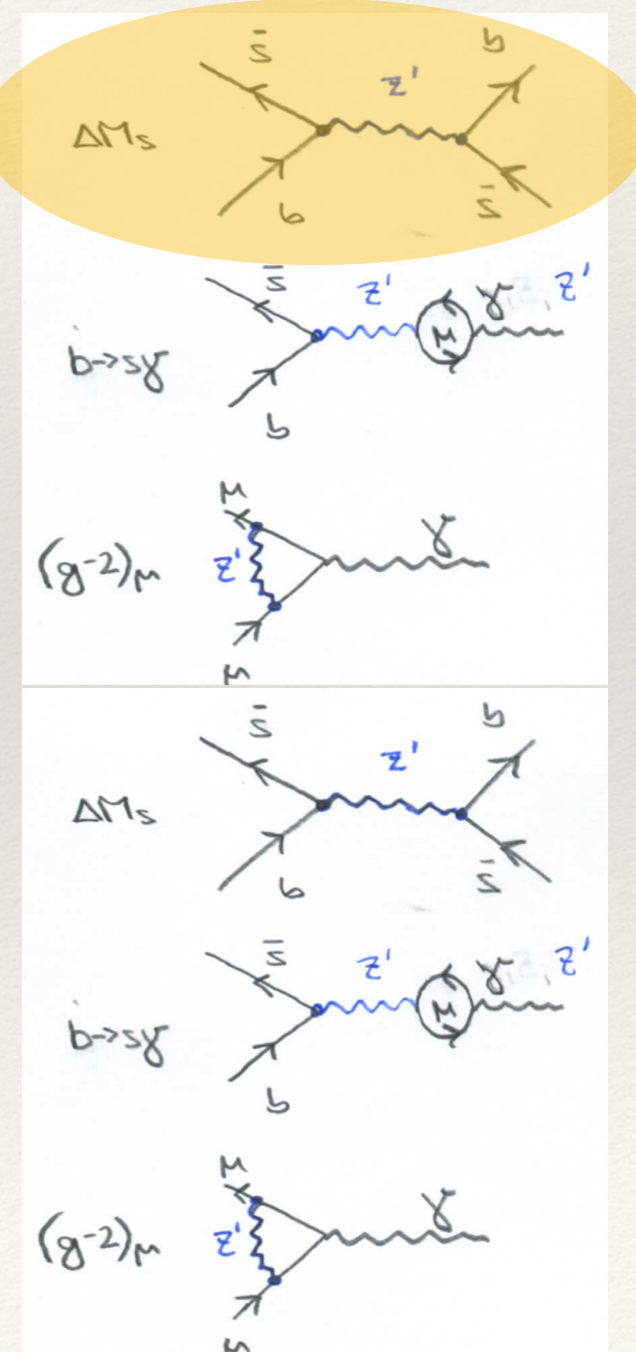


Z' Modelle sind populäre Erklärungsversuche für die Flavouranomalien



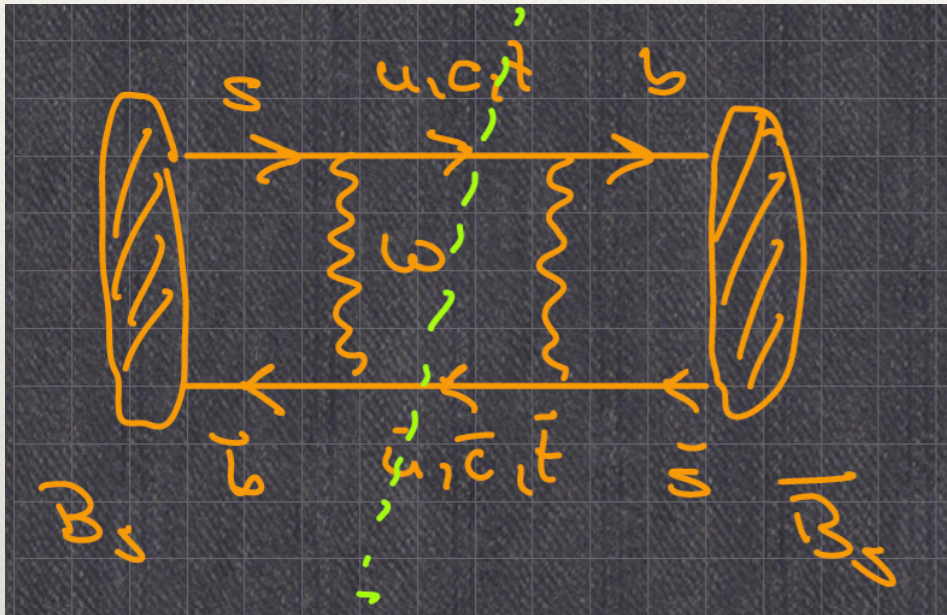
Derartige neue “Treelevel”-Übergänge modifizieren allerdings auch viele andere Observablen - insbesondere **B-Mischung**

= indirekte Schranken

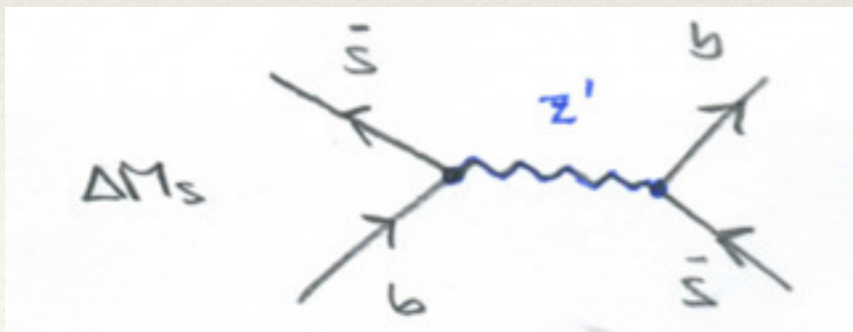


Physik jenseits vom SM

SM: $B_s \leftrightarrow \bar{B}_s$ auf Schleifenniveau



BSM: $B_s \leftrightarrow \bar{B}_s$ auf Tree-niveau



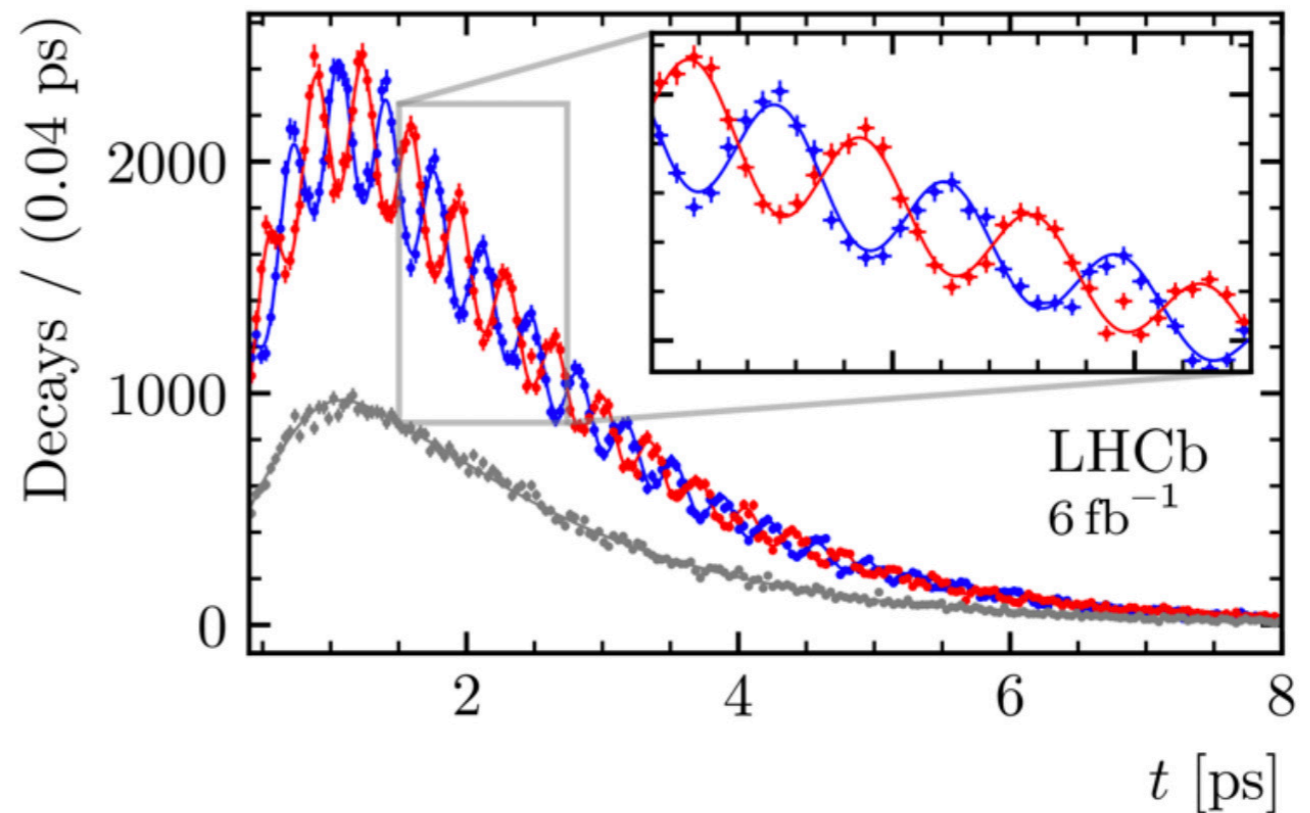
12 April 2021: Fascinating quantum mechanics.

Precise determination of the $B_s^0-\bar{B}_s^0$ oscillation frequency.

"A phenomenon in which quantum mechanics gives a most remarkable prediction" - Richard Feynman

Today, the LHCb Collaboration submitted a paper for publication that reports a precise determination of the $B_s^0-\bar{B}_s^0$ oscillation frequency. This result is presented also today at the joint [annual conference](#) of the UK Institute of Physics (IOP), organized by the University of Edinburgh. The $B_s^0-\bar{B}_s^0$ oscillation is a spectacular and fascinating feature of quantum mechanics. The strange beauty particle B_s^0 composed of a [beauty](#) antiquark (\bar{b}) bound with a [strange](#) quark s turns into its antiparticle partner \bar{B}_s^0 composed of a b quark and an s antiquark (\bar{s}) about 3 million million times per second ($3 \cdot 10^{12}$) as seen in the image below.

— $B_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$ — $\bar{B}_s^0 \rightarrow D_s^- \pi^+$ — Untagged



Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIb Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

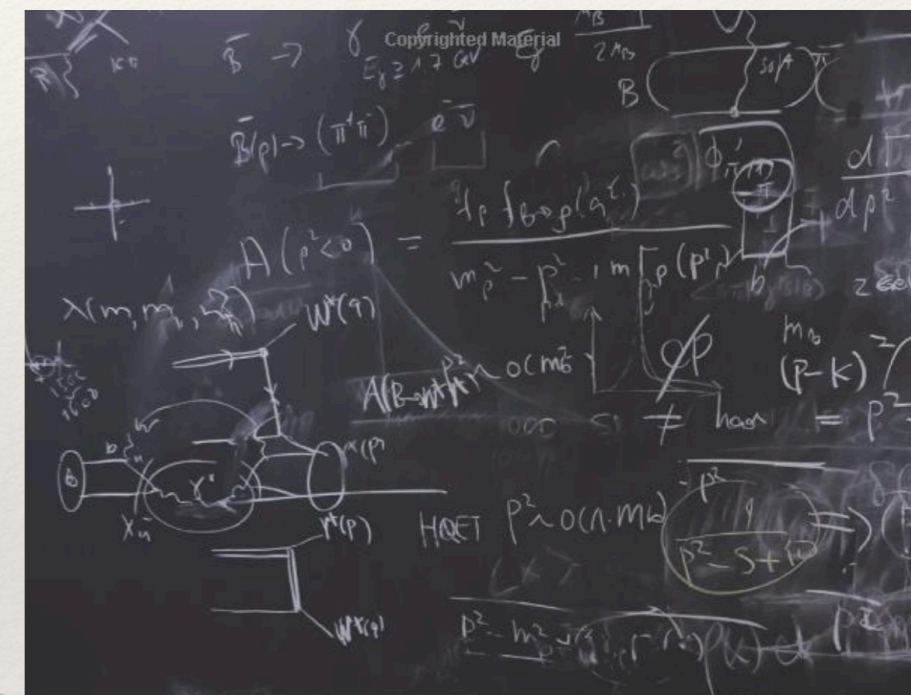
III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

IV Schlussbemerkungen



Hadron Form Factors

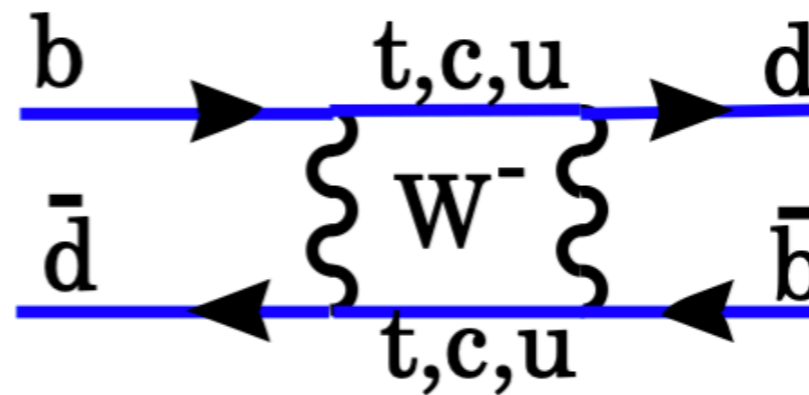
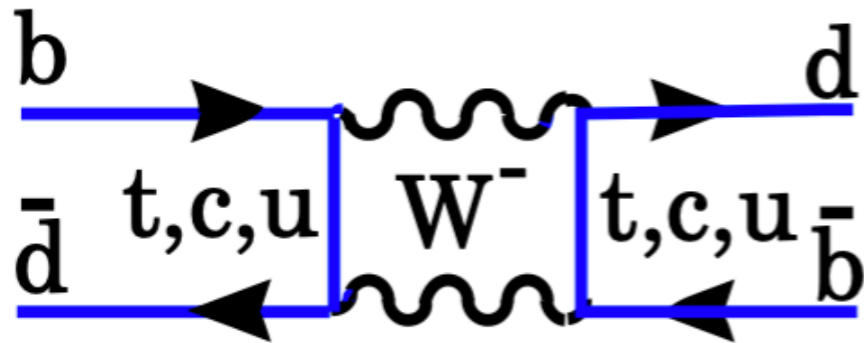
From Basic Phenomenology to
QCD Sum Rules

Alexander Khodjamirian

Präzise SM Vorhersagen

Verlässliche theoretische Bestimmung von perturbativen Korrekturen, Zerfallskonstanten und Formfaktoren unabdingbar!

Präzise SM Vorhersagen: nicht nur für die anomaliebehafteten Observablen, sondern auch für alle indirekten Schranken, z.B. **B-Mischung**



HFLAV

$$\Delta M_s^{\text{Exp}} = (17.757 \pm 0.021) \text{ ps}^{-1}$$

Neue Theorievorhersage - basierend auf Gitter-QCD
deutlich höherer Wert als bisherige Vorhersagen
=> weitere Anomalie?

Di Luzio, Kirk, AL 1712.06572

$$\Delta M_s^{\text{SM}, 2017} = (20.01 \pm 1.25) \text{ ps}^{-1} .$$

Präzise SM Vorhersagen

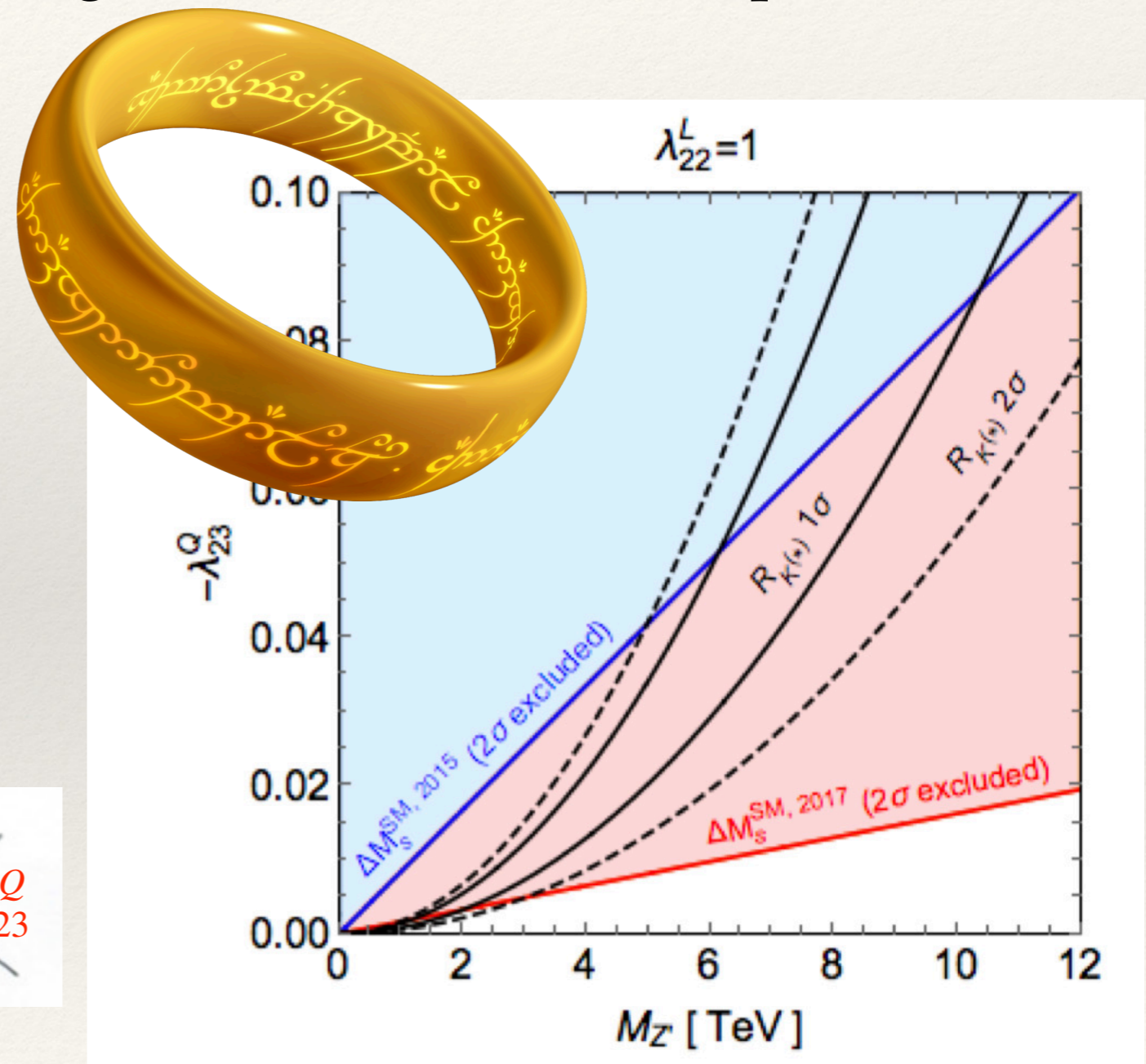
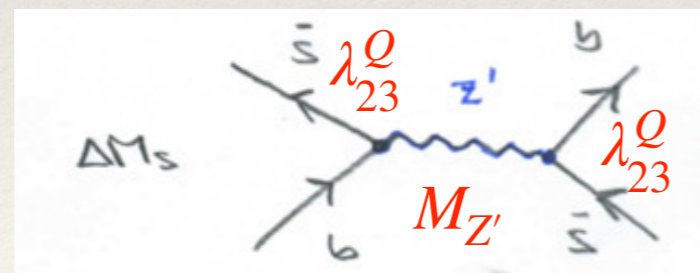
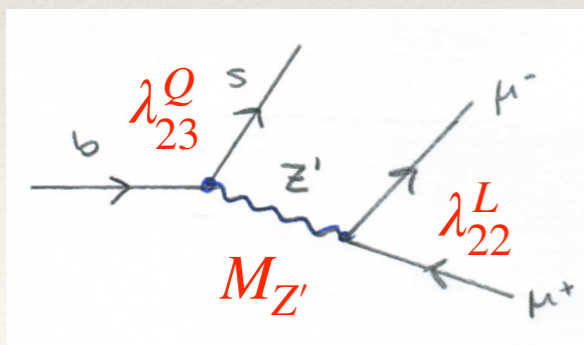
Der 2017er Theoriewert für B-Mischung hat dramatische Konsequenzen

1712.06572, 1811.12884, 1909.11087

One constraint to kill them all?

Luca Di Luzio,^{1,*} Matthew Kirk,^{1,†} and Alexander Lenz^{1,‡}

Die neue Theorievorhersage beruht auf Parametern die von der Gittergemeinde (FLAG) zur Verfügung gestellt werden.



$$\Delta M_s^{\text{SM}} > \Delta M_s^{\text{Exp}}, \Delta M_s^{\text{BSM}} > 0$$

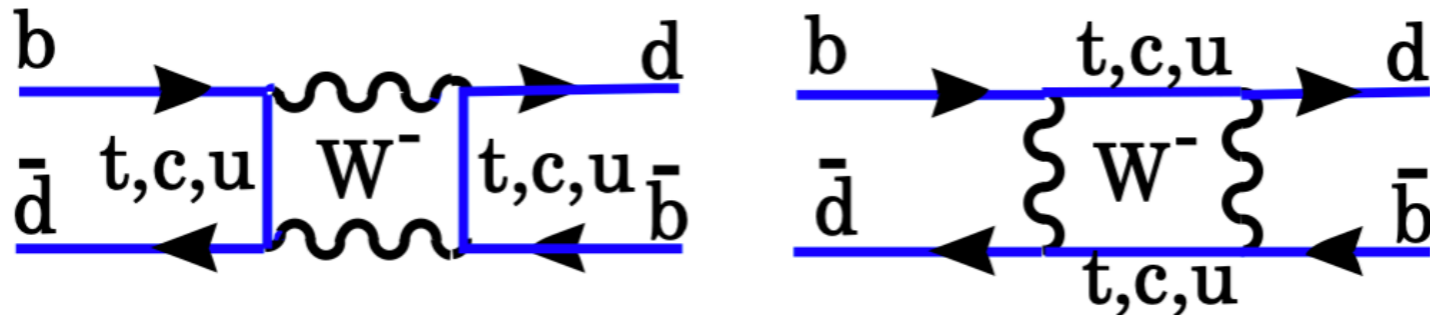
Präzise SM Vorhersagen

Die Massendifferenz von neutralen B Mesonen

$$\Delta M_s = (17.741 \pm 0.020) \text{ ps}^{-1}$$

HFLAV 2021

$$\Delta M_s = 2 |M_{12}^s|$$



$$Q = \bar{s}^\alpha \gamma_\mu (1 - \gamma_5) b^\alpha \times \bar{s}^\beta \gamma^\mu (1 - \gamma_5) b^\beta$$

$$\langle Q \rangle \equiv \langle B_s^0 | Q | \bar{B}_s^0 \rangle = \frac{8}{3} M_{B_s}^2 f_{B_s}^2 B(\mu)$$

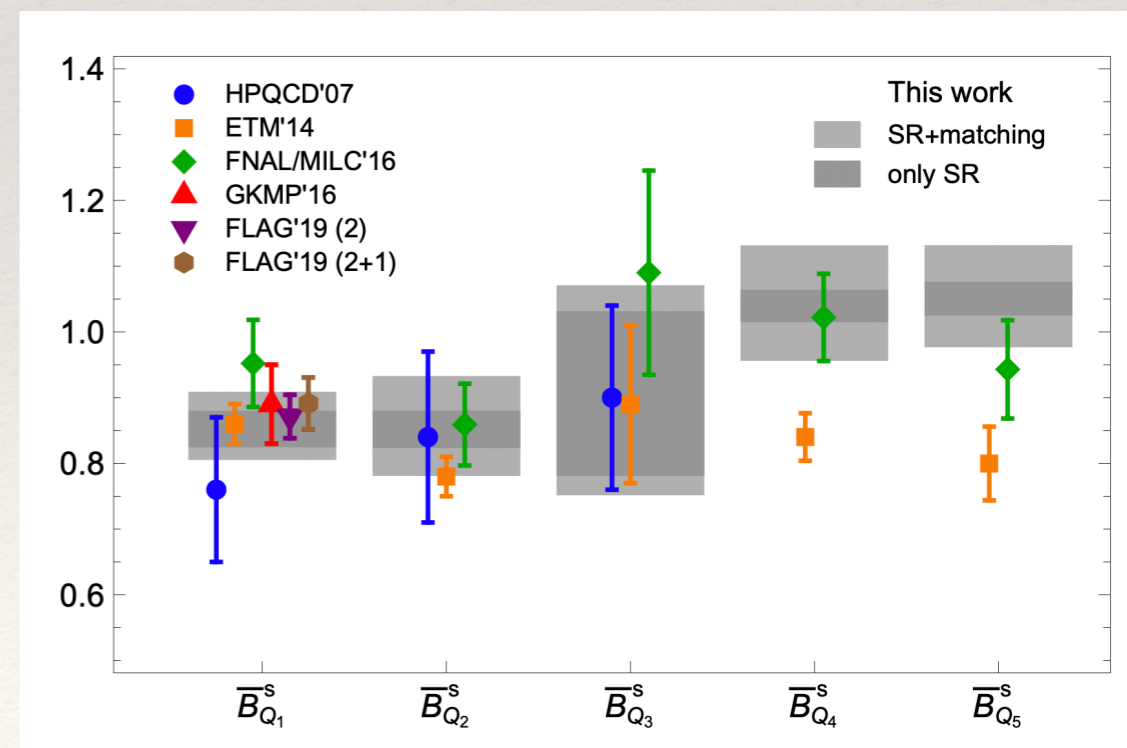
$$M_{12}^q = \frac{G_F^2}{12\pi^2} \lambda_t^2 M_W^2 S_0(x_t) B f_{B_q}^2 M_{B_q} \hat{\eta}_B,$$

Signifikante CKM Abhängigkeit

Test der Gitterrechnungen

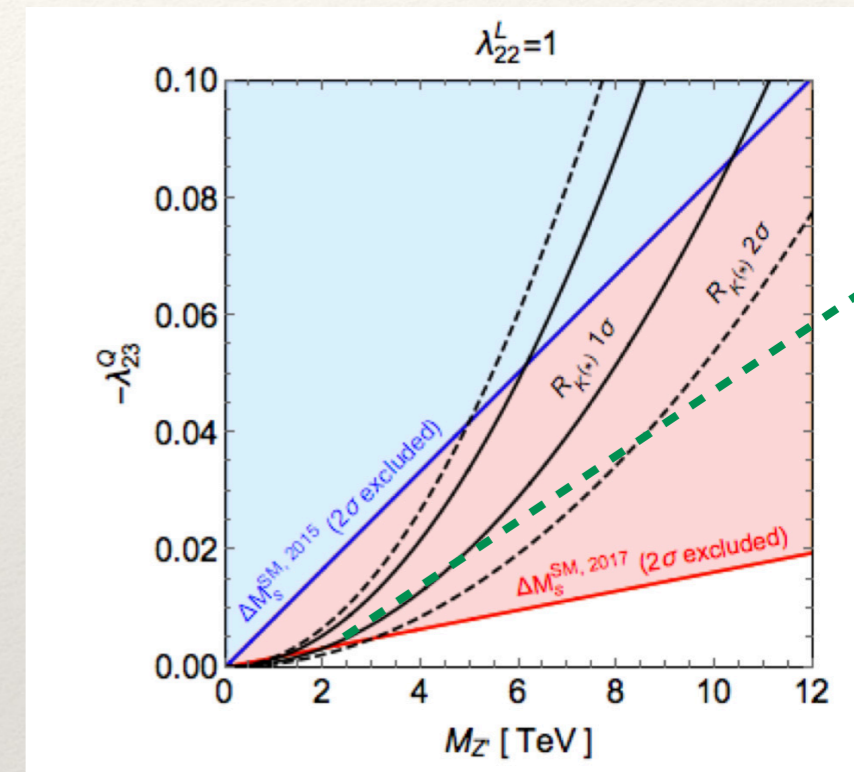
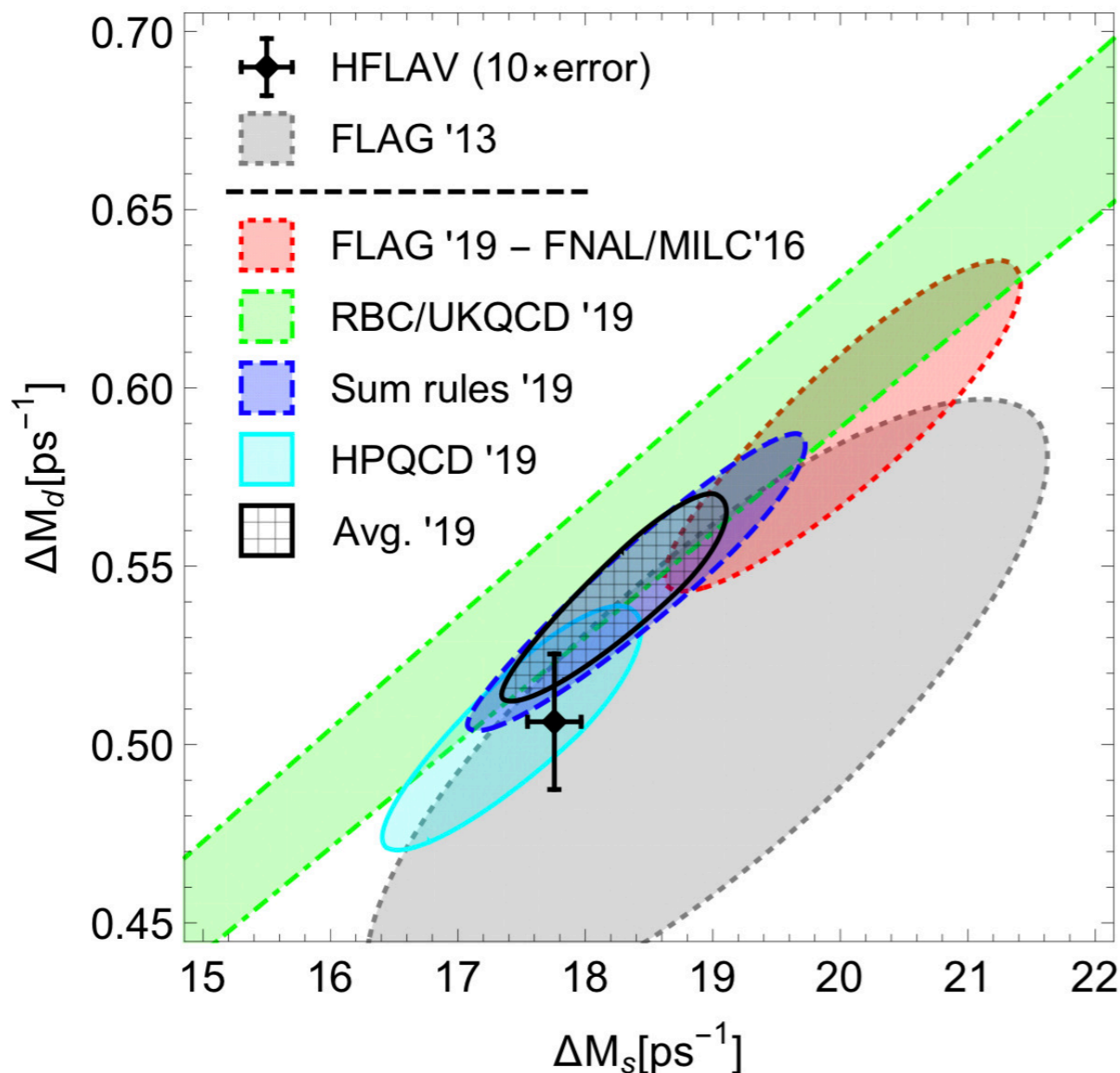
- HQET-Summenregeln: 3-loop + Teil von NNLO matching:
- *B_d Mischung:
Siegen: Grozin, Klein, Mannel, Pivovarov 1606.06054, 1706.05910, 1806.00253
- *B_d and D Mischung, D⁰, D⁺, B_d and B⁺ Lebensdauern
Durham: Kirk (Rome), AL, Rauh (Bern) 1711.02100
- *B_s Mischung
Durham: King, AL, Rauh (Bern) 1904.00940
- *B_s and D_s⁺ Lebensdauern
Siegen: King (Durham), AL, Rauh (Bern) 2112.xxxxx

Mit Abstand dominante Unsicherheit



Präzise SM Vorhersagen

Summenregelerggebnisse für SM Operator für **Bs** Mischung



- **Summenregeln sind jetzt und zukünftig relevant**
- **Massive Konsequenzen für Neue Physikmodelle**
- **Können systematisch verbessert werden!**

Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

Synergie: Gitter/Summenregeln (ziemlich einzigartig)

- Erste Gitterbestimmung der Matrixelemente von D=6 Operatoren für Lebensdauern
- Bestimmung der Matrixelemente von D=7 Operatoren für Lebensdauern und Mischung mit Gitter und Summenregeln

HQET-Summenregeln: 3-loop + Teil von NNLO matching:

*B_d Mischung:

Siegen: Grozin, Klein, Mannel, Pivovarov 1606.06054, 1706.05910, 1806.00253

*B_d and D Mischung, D⁰, D⁺, B_d and B⁺ Lebensdauern

Durham: Kirk (Rome), AL, Rauh (Bern) 1711.02100

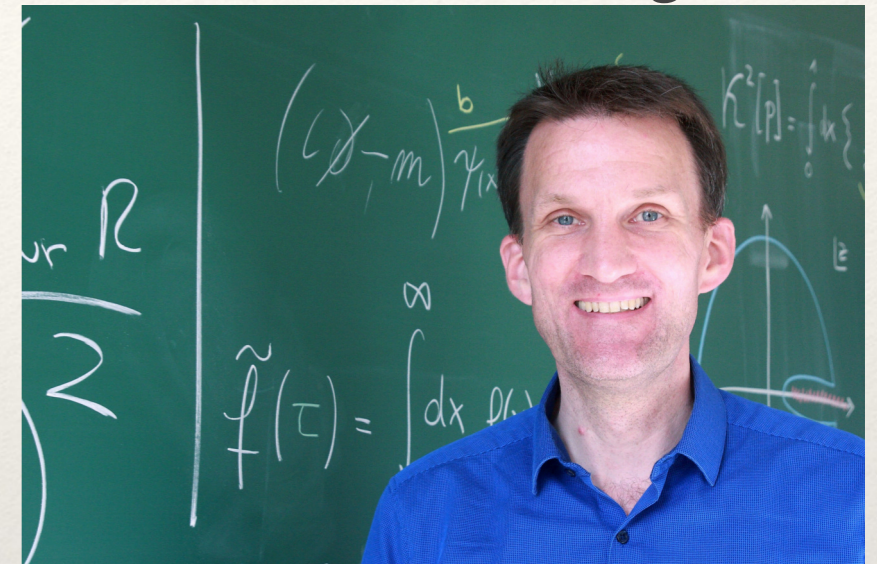
*B_s Mischung

Durham: King, AL, Rauh (Bern) 1904.00940

*B_s and D_s⁺ Lebensdauern

Siegen: King (Durham), AL, Rauh (Bern) 2112.xxxxx

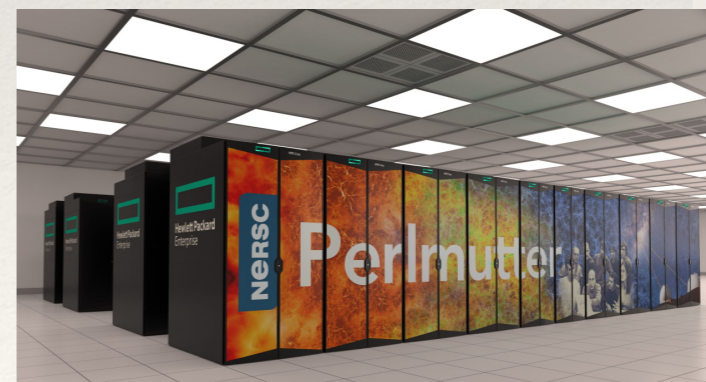
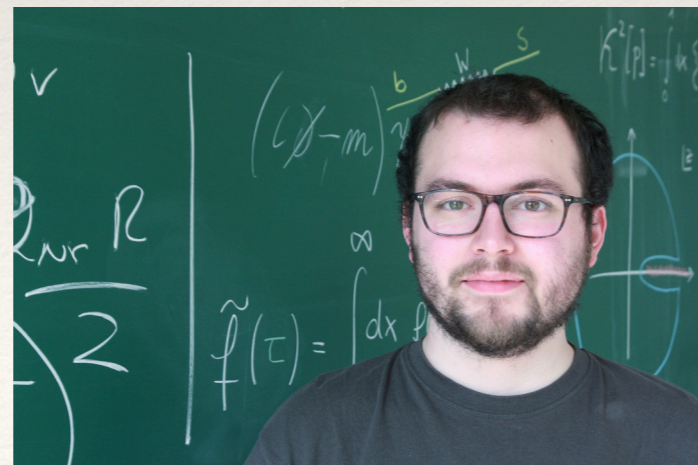
Neu: Gitter in Siegen



Oliver Witzel, AR, 27.1.2022

Christian Schneider, Master Matthew Black, Doktorand

Linus Henke, Bachelor



5 of TOP 500



Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

Synergie: Gitter/Summe

- Erste Gitterbestimmung $D=6$ Operatoren für Leb
- Bestimmung der Matrix $D=6$ Operatoren für Lebensd
Gitter und Summenregel

HQET-Summenregeln: 3-loop + Teil von NNLC
* B_d Mischung:
Siegen: Grozin, Klein, Mannel, Pivovarov 1608.00940
* B_d and D Mischung, D^0 , D^+ , B_d and B^+
Durham: Kirk (Rome), AL, Rauh (Bern) 1711.00940
* B_s Mischung
Durham: King, AL, Rauh (Bern) 1904.00940
* B_s and D_s^+ Lebensdauern
Siegen: King (Durham), AL, Rauh (Bern) 2112.00940

Christian Schneider, Mas

Linus Henke, Bachelor



Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIb Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

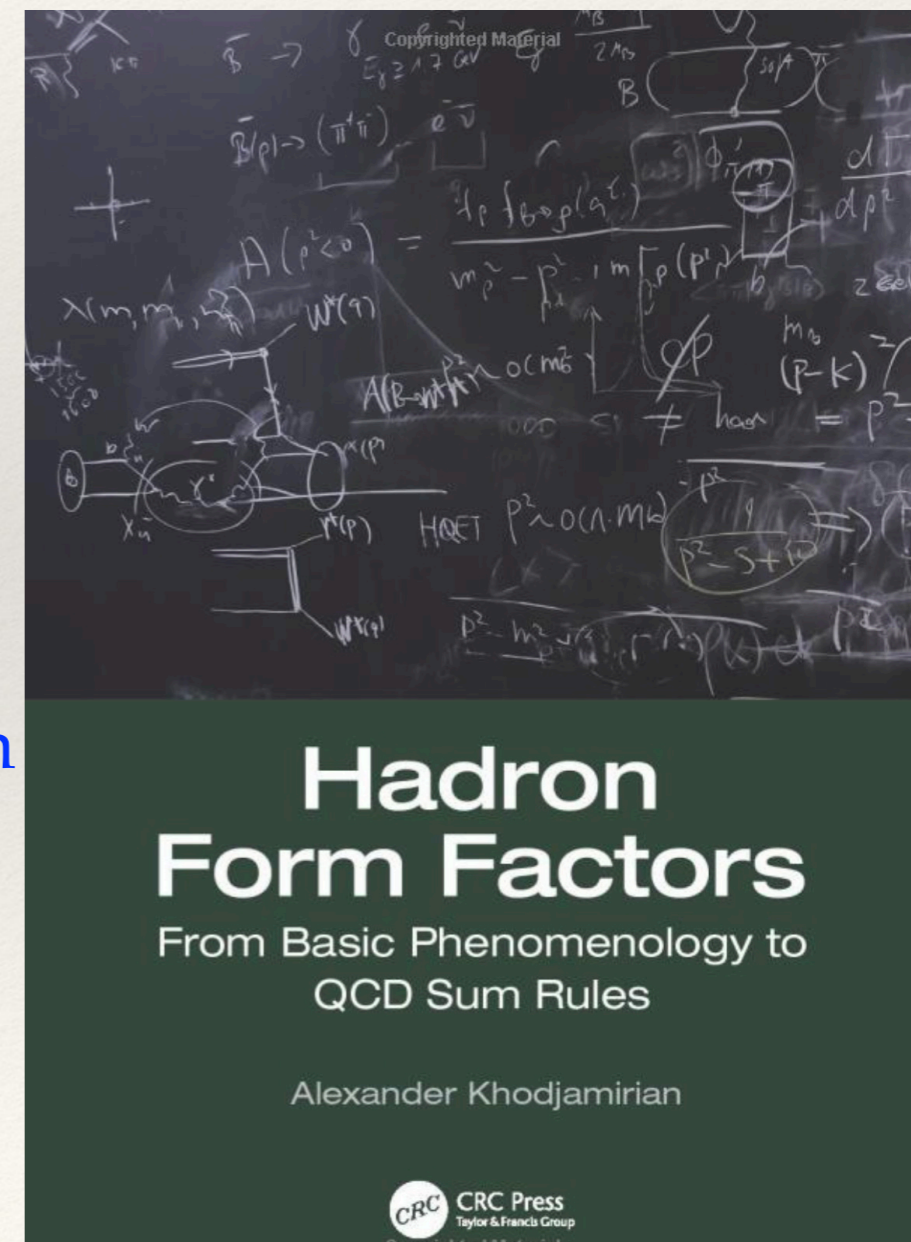
III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

IV Schlussbemerkungen

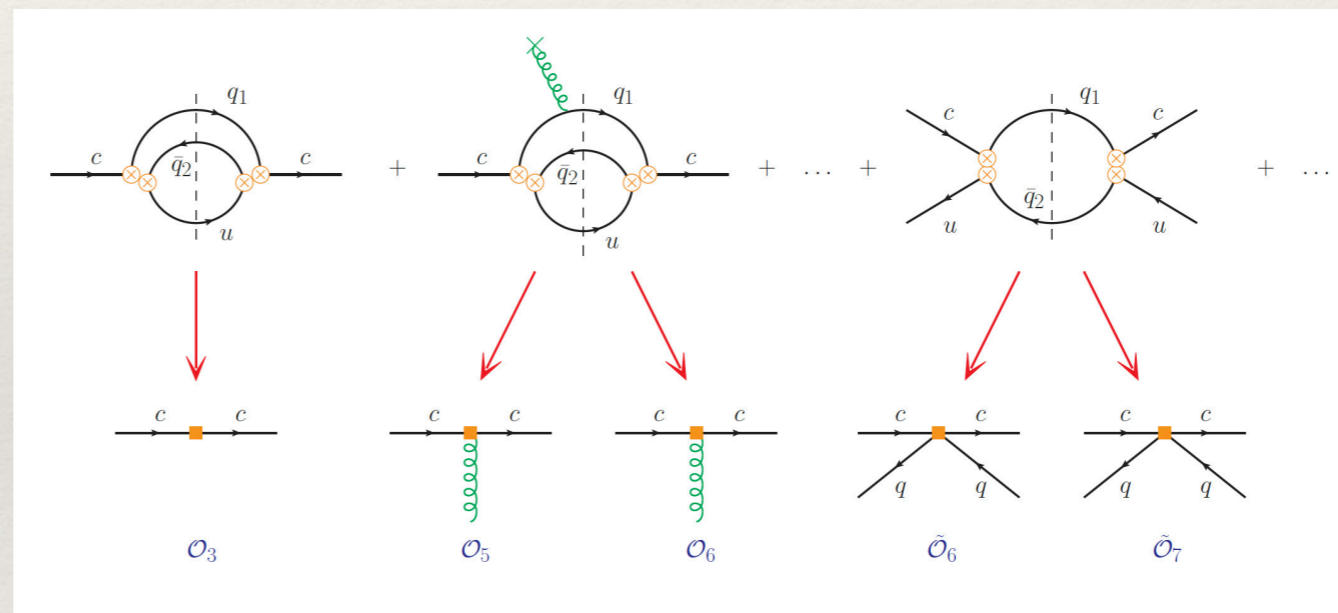
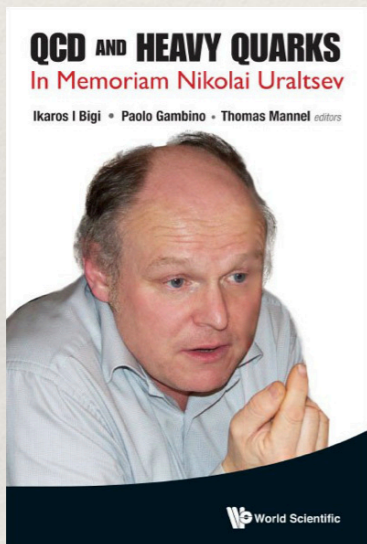


Test unserer Theoriwerkzeuge

Lebensdauer ($\tau = 1/\Gamma_{tot}$) und Masse sind die grundlegendsten Eigenschaften von Teilchen

Heavy
Quark
Expansion

$$\Gamma(D) = \Gamma_3 + \Gamma_5 \frac{\langle \mathcal{O}_5 \rangle}{m_c^2} + \Gamma_6 \frac{\langle \mathcal{O}_6 \rangle}{m_c^3} + \dots + 16\pi^2 \left(\tilde{\Gamma}_6 \frac{\langle \tilde{\mathcal{O}}_6 \rangle}{m_c^3} + \tilde{\Gamma}_7 \frac{\langle \tilde{\mathcal{O}}_7 \rangle}{m_c^4} + \dots \right)$$



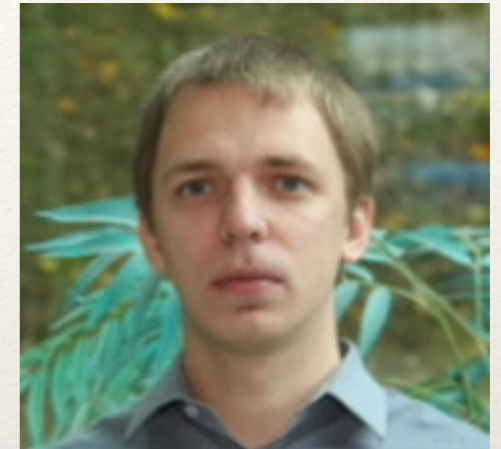
Jeder Term: perturbativer Wilsonkoeffizient mal nicht-perturbatives Matrixelement

$$\Gamma_i = \Gamma_i^{(0)} + \frac{\alpha_s(m_c)}{4\pi} \Gamma_i^{(1)} + \left[\frac{\alpha_s(m_c)}{4\pi} \right]^2 \Gamma_i^{(2)} + \dots$$

- Keine großen BSM Effekte erwartet => Test unserer Theoriwerkzeuge

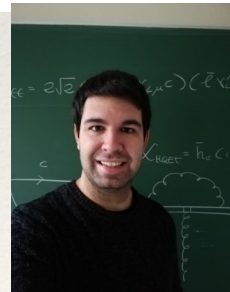
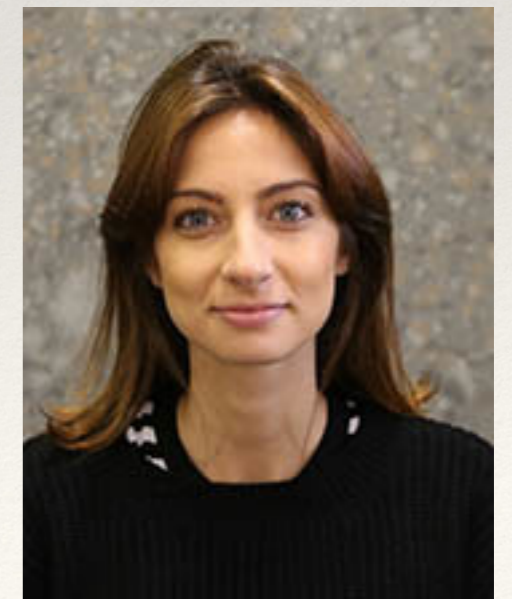
Test unserer Theoriewerkzeuge

| | | |
|-------------------------------|-------------|---|
| $\Gamma_3^{(1)}$ | 1983 – 2013 | HoKim, Pham, Altarelli, Petrarca, Voloshin, Bagan, Ball, Braun, Goszinsky, Fiol, Lenz, Nierste, Ostermaier, Krinner, Rauh |
| $\Gamma_3^{(2)}$ | 2005 | partly by : Czarnecki, Slusarczyk |
| $\Gamma_5^{(0)}$ | 1992 | Bigi, Uraltsev, Vainshtein, Blok, Shifman |
| $\Gamma_6^{(0)}$ | 2020 | Lenz, Piscopo, Rusov, Mannel, Moreno, Pivovarov |
| $\langle Q_{5,6} \rangle$ | | from semi – leptonic experiment |
| $\tilde{\Gamma}_6^{(0)}$ | 1979 – 1996 | Guberina, Nussinov, Peccei, Ruckl, Shifman, Voloshin, Uraltsev, Neubert, Sachrajda |
| $\tilde{\Gamma}_6^{(1)}$ | 2002 | Beneke, Buchalla, Greub, Lenz, Nierste Franco, Lubicz, Mescia, Tarantino, Rauh |
| $\langle \tilde{Q}_6 \rangle$ | 2017, 2021 | Kirk, Lenz, Rauh – NO LATTICE!!! |
| $\tilde{\Gamma}_7^{(0)}$ | 2004 | Lenz, Nierste, Gabbiani, Onishchenko, Petrov |
| $\langle \tilde{Q}_7 \rangle$ | | VIA |



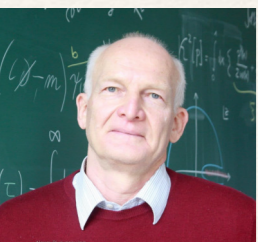
Aleksey Rusov, post-doc

Maria Laura Piscopo, PhD/post-doc



Darwinoperator liefert unerwartet großen Beitrag

$$\frac{\tau(B_s)}{\tau(B_d)} = 1 + \dots + \frac{C_D}{m_b^3} [\rho_D^3(B_d) - \rho_D^3(B_s)] \tau(B_s)^{\text{Exp}} + \dots$$



Test unserer Theoriwerkzeuge

HQE + HQET Summenregeln für Lebensdauern:

- Sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment
- Konvergenz scheint selbst im Charmsystem möglich

$$\frac{\tau(D^+)}{\tau(D^0)} = 2.7 = 1 + 16\pi^2 (0.25)^3 (1 - 0.34)$$

Kirk, AL, Rauh 1711.02100
pert. NLO-QCD:
AL, Rauh 1305.3588

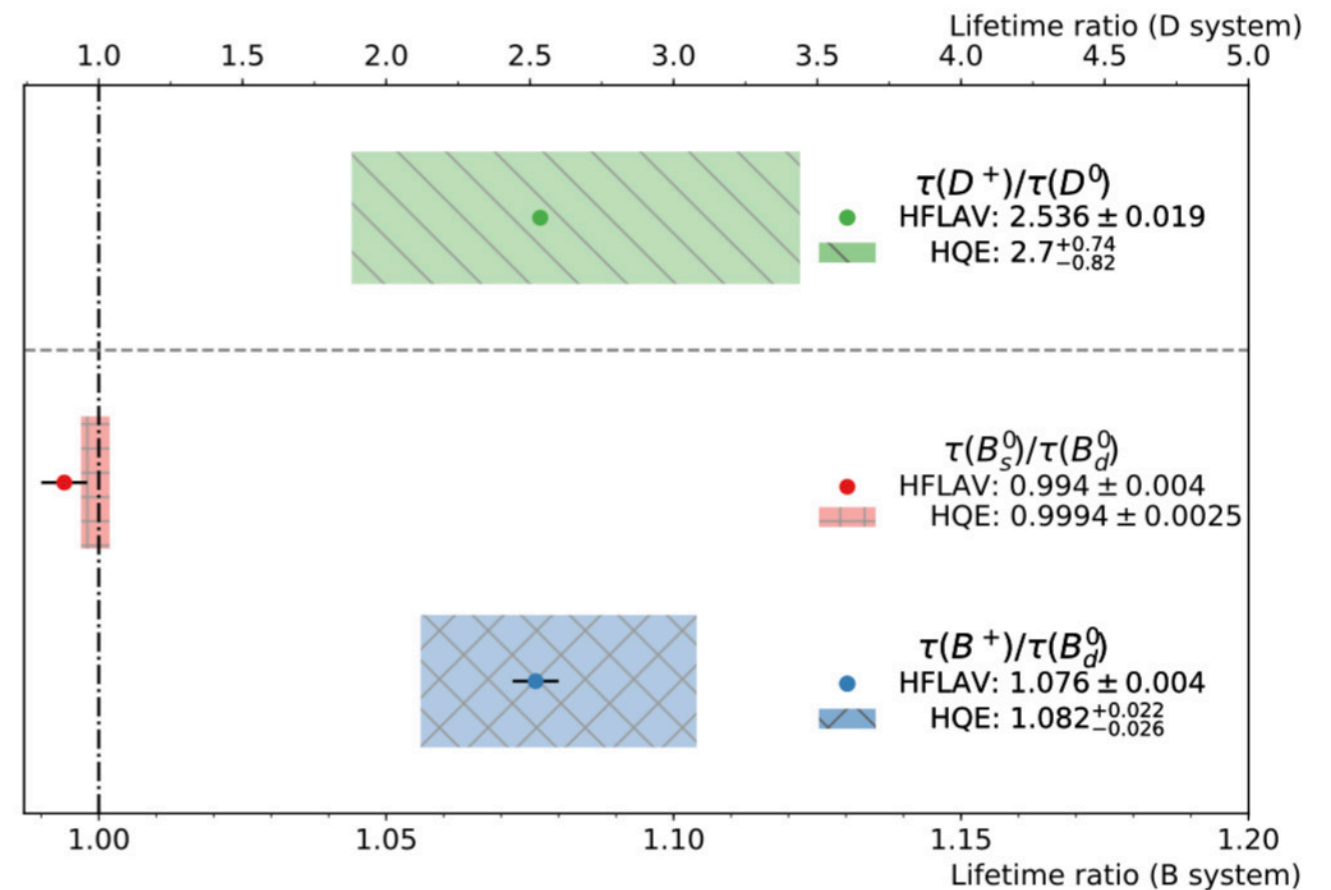
Expansion parameter for HQE in charm = 0.3
not a back of envelope statement, but real calculations

d=6 calculated with sum rules
lattice confirmation urgently needed

d=7 estimated in vacuum insertion approximation
do sum rule/lattice

- Präzision der HQET Summenregeln kann weiter verbessert werden

- Unabhängige Gitterbestimmung sehr wünschenswert



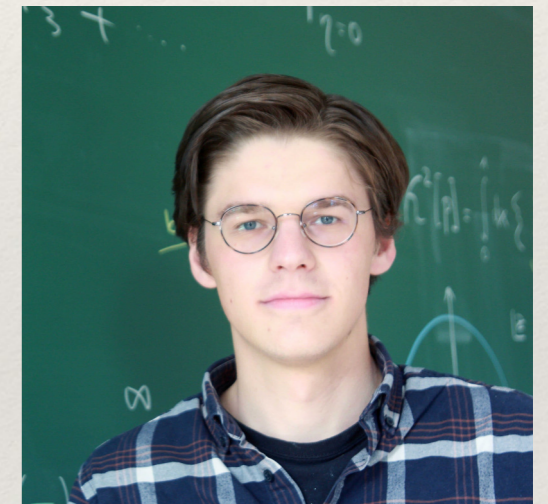
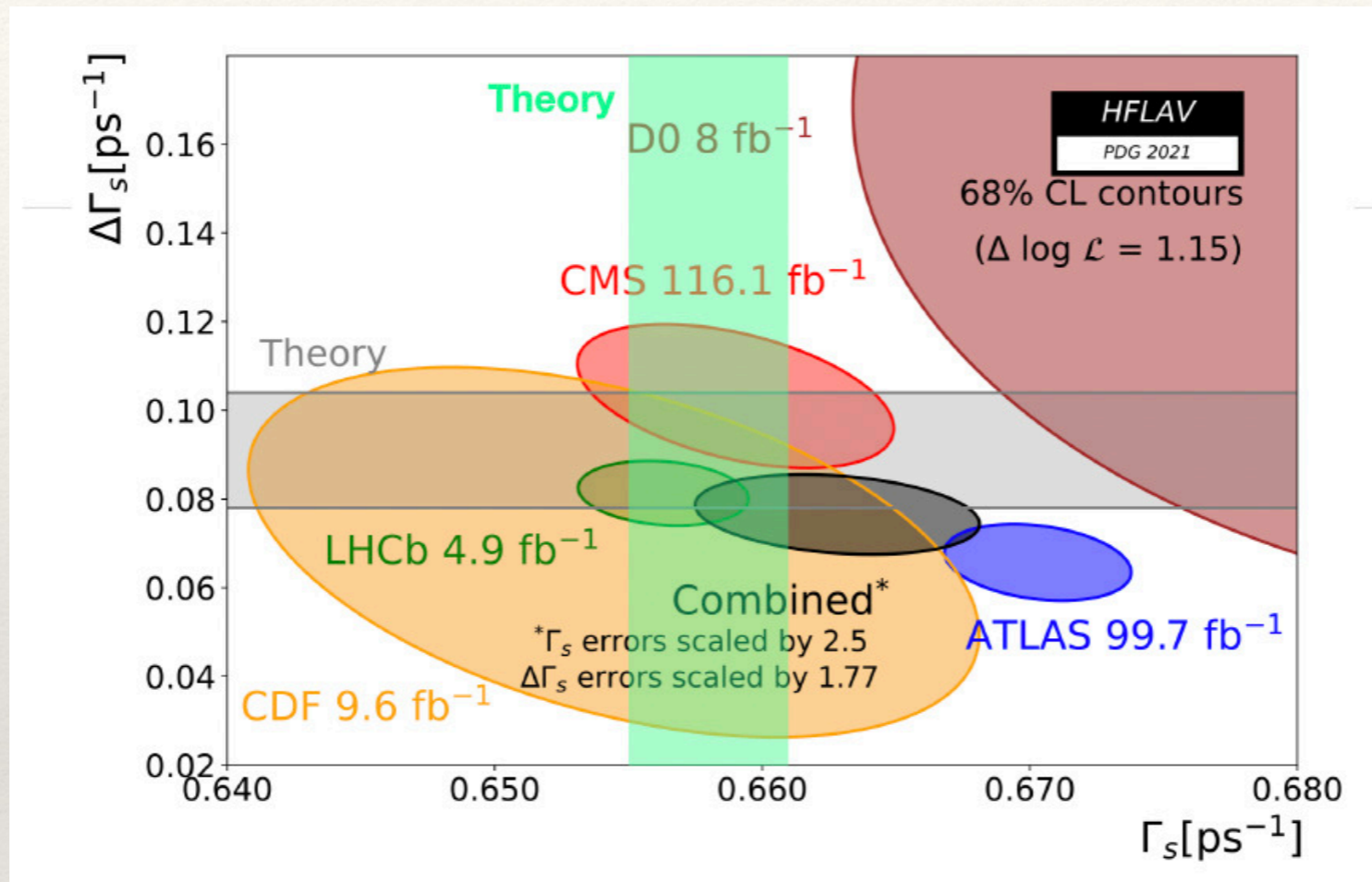
Rauh, Kirk, AL 2017

King, AL, Rauh, Rusov, Piscopo, Vlahos 2109.13219

Oliver Witzel und Matthew Black
im Rahmen von RBC/UKQCD

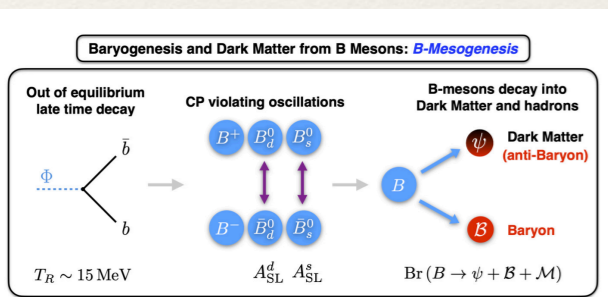
Test unserer Theoriewerkzeuge

Eine weitere Anomalie? :-)



Jakob Müller, Master

Suche nach BSM Effekten in Lebensdauern:



Alonso-Alvarez,
Elor, Escudero
2101.02706

$$\underbrace{\frac{\tau(B_s)}{\tau(B_d)}}_{\text{exp.}} \approx 1 - \underbrace{\Gamma_b^{-1} (\delta\Gamma_{B_s}^{\text{SM}} - \delta\Gamma_{B_d}^{\text{SM}})}_{\text{theory}} - \underbrace{[\text{BR}(B_s \rightarrow X)^{\text{BSM}} - \text{BR}(B_d \rightarrow X)^{\text{BSM}}]}_{\text{indirectly constrained}}$$

Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIb Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

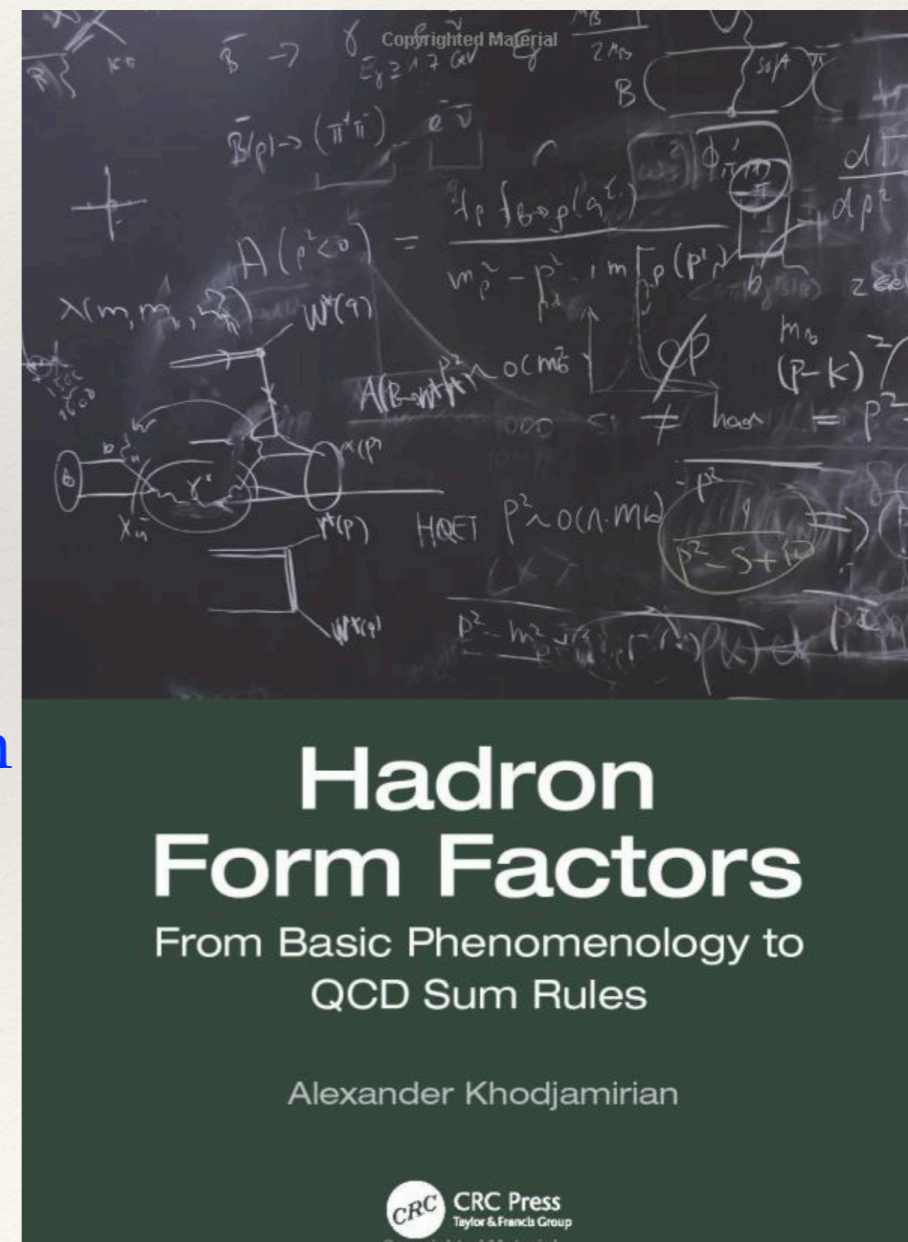
III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

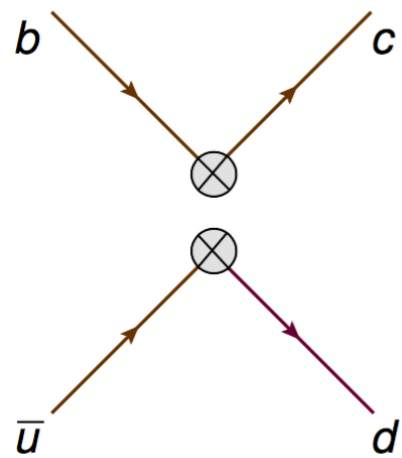
IV Schlussbemerkungen



Jenseits vom SM

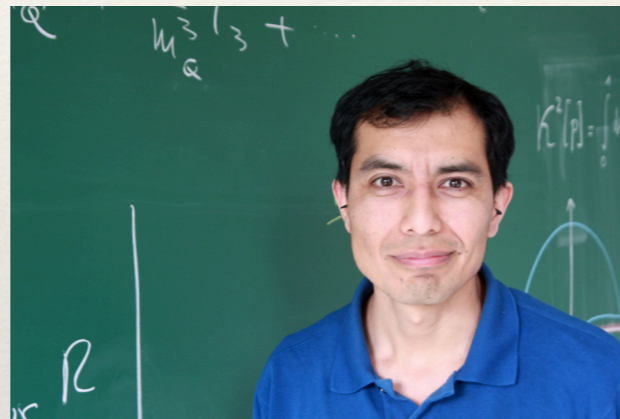
Kann es in nicht-leptonischen Tree-level Zerfällen BSM Effekte geben?

$$\hat{\mathcal{H}}_{eff} = \frac{V_{cb}V_{ud}^*}{\sqrt{2}} (C_1\hat{Q}_1 + C_2\hat{Q}_2)$$



Systematische Studie von nicht-leptonischen Tree-level Zerfällen

$$C_{1,2}^{SM} \rightarrow C_{1,2}^{SM} + \Delta C_{1,2}$$



AL, Tetlalmatzi-Xolocotzi 2014-19

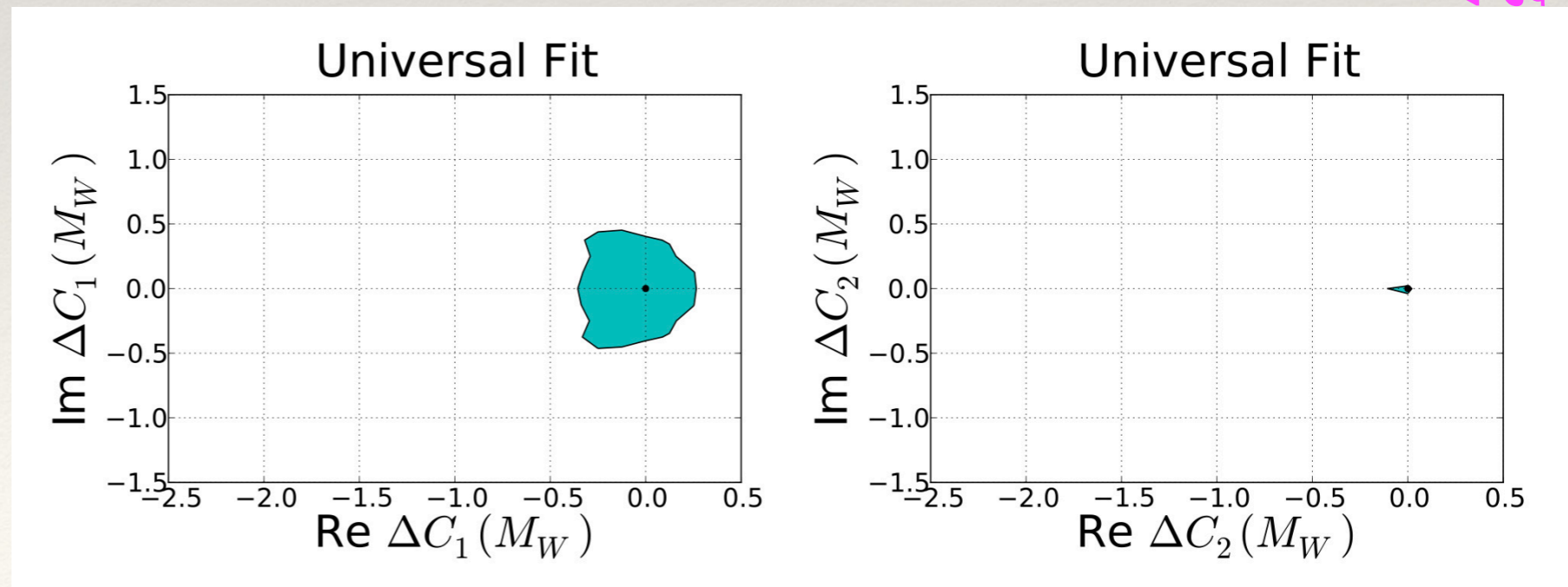
- 4.3 Constraints from $b \rightarrow u\bar{u}d$ transitions
 - 4.3.1 $R_{\pi\pi}$
 - 4.3.2 $S_{\pi\pi}$ and $S_{\rho\pi}$
 - 4.3.3 $R_{\rho\rho}$
- 4.4 Constraints from $b \rightarrow c\bar{u}d$ transitions
 - 4.4.1 $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+}\pi^-$
 - 4.4.2 S_{D^*h}
- 4.5 Observables constraining $b \rightarrow c\bar{c}d$ transitions
 - 4.5.1 M_{12}^d
 - 4.5.2 $B \rightarrow X_d\gamma$
- 4.6 Constraints from $b \rightarrow c\bar{c}s$ transitions
 - 4.6.1 $\bar{B} \rightarrow X_s\gamma$
 - 4.6.2 B_s lifetimes
 - 4.6.3 B_s Mixing

e.g. (Ball), Braun, AL 04,06,07
Präzise SM Werte notwendig

Was bedeutet das?

Ist die Größe dieser Effekte

relevant oder irrelevant?



Jenseits vom SM

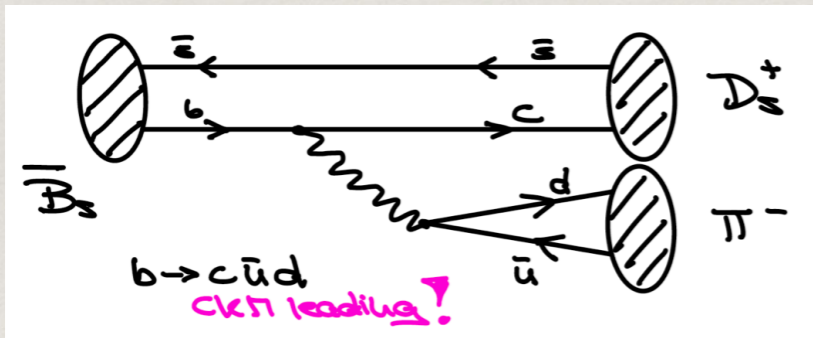
- Bestimmung des CKM Winkels γ kann um mehrere Grad modifiziert werden
SM Präzision 1 ppm
Exp. Präzision: jetzt 3.5° , zukünftig $< 1^\circ$

NP effects in tree-level decay and the precision of γ
 Brod, AL, Tetlamatzi-Xolocotzi
 Phys. Rev. D92(2015) no.3,033002

- Systematischer Fit bisher **nur SM Dirac-Strukturen**

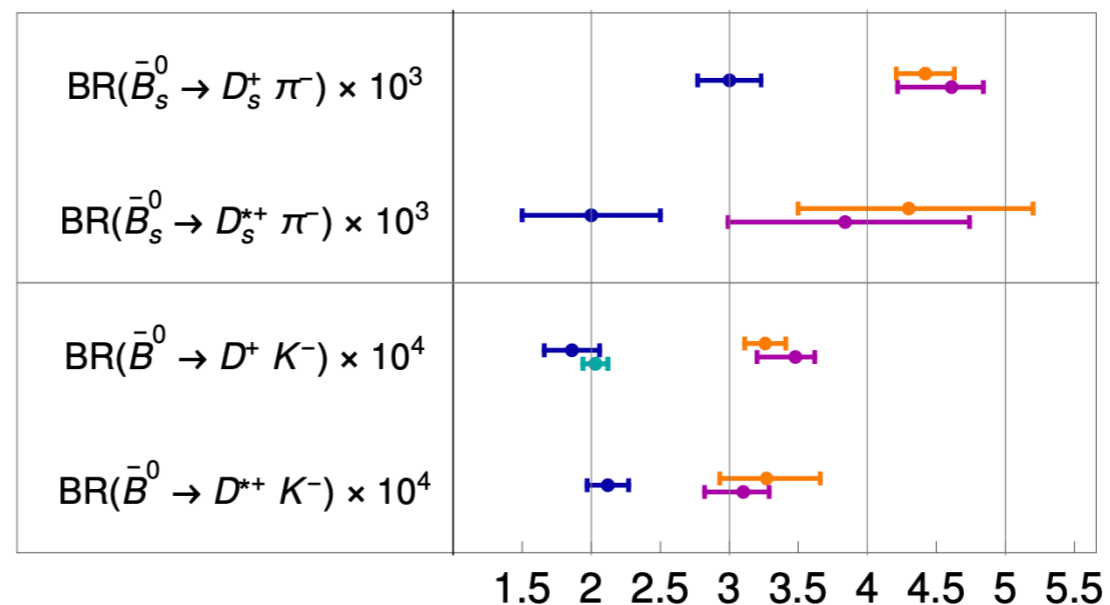
Model independent bounds on NP effects in non-leptonic tree-level decay and the
 AL, Tetlamatzi-Xolocotzi
 JHEP 2007 (2020) 177

Neue Anomalien



- Huber, Kränkl 1606.02888
- Bordone, Gubernari, Huber, Jung, vanDyk
- Iguro, Kitahara 2008.01086
- Cai, Deng, Li, Yang 2103.04138
- Bordone, Greljo, Maryocca 2103.10332
- Beneke, Böer, Finauro, Vos 2107.03819

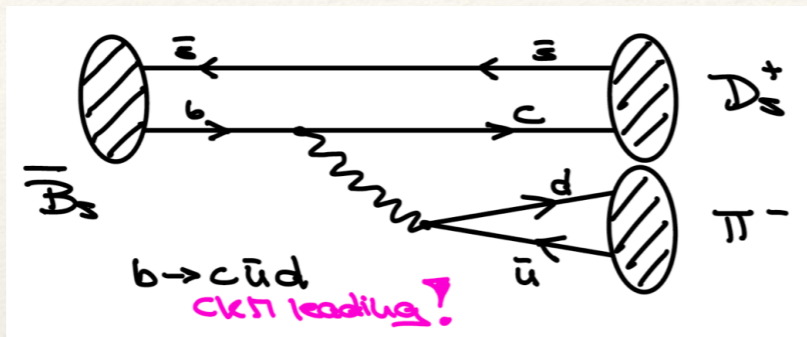
[Bordone, Gubernari, Huber, Jung, van Dyk, arXiv: 2007.10338]
 [Cai, Deng, Li, Yang, arXiv: 2103.04138]



Vortrag von A. Rusov bei
 CKM2021, Melbourne

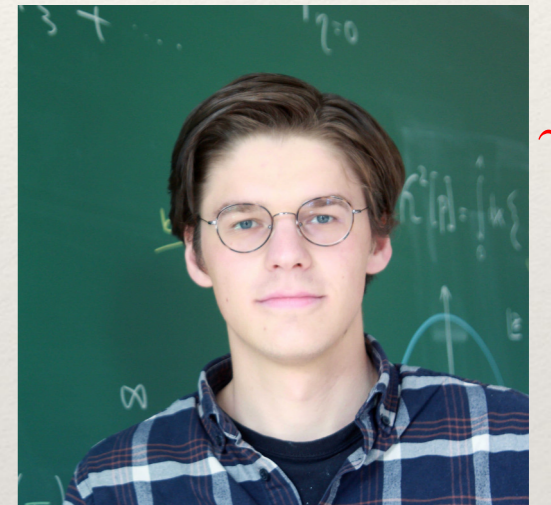
Jenseits vom SM

BSM Effekte in



modifizieren z.B. $\tau(B^+)$ oder $\Delta\Gamma_d$

- Sehr genaue SM Vorhersagen von $\tau(B^+)$ oder $\Delta\Gamma_d$ notwendig
- Untersuchung der möglichen BSM Effekte



Eindeutige experimentelle Identifizierung von BSM Effekten

Testing the Standard Model with CP asymmetries in flavour-specific non-leptonic decays

Tim Gershon

Department of Physics, University of Warwick, Coventry, CV4 7AL, UK.

Alexander Lenz and Aleksey V. Rusov

Physik Department, Universität Siegen, Walter-Flex-Str. 3, 57068 Siegen, Germany.

Nicola Skidmore

University of Manchester, Schuster Building, Manchester, M13 9PL, UK.

(Dated: December 1, 2021)

Inhaltsübersicht

I Teilchenphysik für die Allgemeinheit

Ia Einführung in Teilchenphysik

Ib Grundlagenforschung

II Teilchenphysik für Physiker

IIa Einführung in Flavour Physik

IIb Flavour Anomalien

IIb Physik jenseits vom Standard Modell (SM)?

III Teilchenphysik für Teilchenphysiker

IIIa Die Notwendigkeit präziser SM Vorhersagen

IIIb Test unserer Theoriewerkzeuge

IIIc Modelle jenseits vom SM

IV Schlussbemerkungen

Heavy Flavour Physics
and
Effective Field Theories

Epiphany 2020



An inspiring example of *Heavy Flavour*

Alexander Lenz

IPPP Durham

October 23, 2021

Schlussbemerkungen I

- SM sehr erfolgreich, aber einige Probleme unbeantwortet
- Flavour Physik: CP Verletzung
viele Daten, Theorie unter Kontrolle, es gibt Anomalien!
- BSM Modell kann kosmologische Konsequenzen haben



Schlussbemerkungen II

- Indirekte Suche nach neuer Physik

$$O^{\text{Exp}} \pm \delta O^{\text{Exp}} = O^{\text{SM}} \pm \delta O^{\text{SM}} + O^{\text{BSM}} \pm \delta O^{\text{BSM}}$$

Kontrolle der Unsicherheiten!!!!

- Lehrbuchannahmen müssen neu überprüft werden
- Kombination von Gitter und Summenregeln

5 Physiker

1 Jahr Rechnen

1 Zahl :-)

2012 Exp. bestätigt

Next-to-Leading Order QCD Corrections
to the Lifetime Difference of B_s Mesons

M. BENEKE, G. BUCHALLA
Theory Division, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

C. GREUB
Institut für Theoretische Physik, Universität Bern
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Berne, Switzerland

A. LENZ
Max-Planck-Institut für Physik – Werner-Heisenberg-Institut
Föhringer Ring 6, D-80805 Munich, Germany

and
U. NIERSTE

DESY - Theory Group, Notkestraße 85, D-22607 Hamburg, Germany

$$F_{11}^{(0)}(z) = 3\sqrt{1-4z}(1-z) \quad F_{S,11}^{(0)}(z) = 3\sqrt{1-4z}(1+2z), \quad (18)$$

$$F_{12}^{(0)}(z) = 2\sqrt{1-4z}(1-z) \quad F_{S,12}^{(0)}(z) = 2\sqrt{1-4z}(1+2z), \quad (19)$$

$$F_{22}^{(0)}(z) = \frac{1}{2}(1-4z)^{3/2} \quad F_{S,22}^{(0)}(z) = -\sqrt{1-4z}(1+2z). \quad (20)$$

The next-to-leading order expressions $F_{ij}^{(1)}$, $F_{S,ij}^{(1)}$ are

$$\begin{aligned} F_{11}^{(1)}(z) = & 32(1-z)(1-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + 64(1-z)(1-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & - 4(13-26z-4z^2+14z^3) \ln \sigma \\ & + \sqrt{1-4z} [4(13-10z) \ln z - 12(3-2z) \ln(1-4z) \\ & + \frac{1}{6}(109-226z+168z^2)] + 2\sqrt{1-4z}(5-8z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} F_{S,11}^{(1)}(z) = & 32(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + 64(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & - 16(4-2z-7z^2+14z^3) \ln \sigma \\ & + \sqrt{1-4z} [64(1+2z) \ln z - 48(1+2z) \ln(1-4z) \\ & - \frac{8}{3}(1-6z)(5+7z)] - 32\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} F_{12}^{(1)}(z) = & \frac{64}{3}(1-z)(1-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + \frac{128}{3}(1-z)(1-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \end{aligned}$$

5

$$\begin{aligned} & + (2-259z+662z^2-76z^3-200z^4) \frac{\ln \sigma}{6z} \\ & - \sqrt{1-4z} \left[(2-255z+316z^2) \frac{\ln z}{6z} + 8(3-2z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. + \frac{2}{9}(127-199z-75z^2) \right] \\ & - 2\sqrt{1-4z}(17-26z) \ln \frac{\mu_1}{m_b} + \frac{4}{3}\sqrt{1-4z}(5-8z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} F_{S,12}^{(1)}(z) = & \frac{64}{3}(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + \frac{128}{3}(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & + (1-35z+4z^2+76z^3-100z^4) \frac{4 \ln \sigma}{3z} \\ & - \sqrt{1-4z} \left[(1-33z-76z^2) \frac{4 \ln z}{3z} + 32(1+2z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. + \frac{4}{9}(68+49z-150z^2) \right] \\ & - 16\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_1}{m_b} - \frac{64}{3}\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} F_{22}^{(1)}(z) = & \frac{4}{3}(4-21z+2z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + \frac{4}{3}(1-2z)(5-2z) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \\ & - (7+13z-194z^2+304z^3-64z^4) \frac{\ln \sigma}{6z} - \frac{\pi^2}{3}(1-10z) \\ & + \sqrt{1-4z} \left[(7+27z-250z^2) \frac{\ln z}{6z} - 4(1-6z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. - \frac{1}{18}(115+632z+96z^2) \right] \\ & - 2\sqrt{1-4z}(5-2z) \ln \frac{\mu_1}{m_b} + \frac{4}{3}\sqrt{1-4z}(2-5z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}, \end{aligned} \quad (25)$$

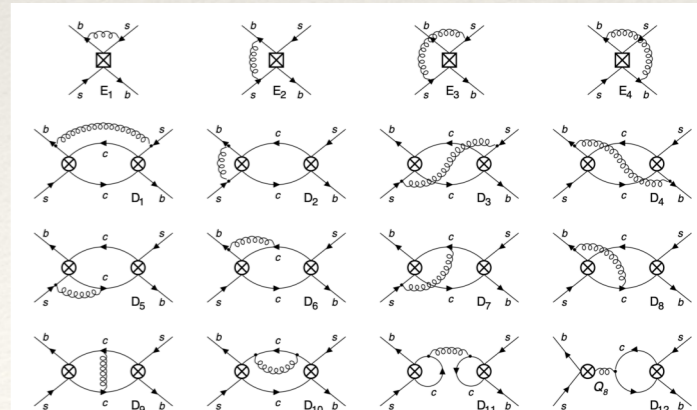
$$\begin{aligned} F_{S,22}^{(1)}(z) = & -\frac{32}{3}(1+z)(1+2z) \left(\text{Li}_2(\sigma^2) + \ln^2 \sigma + \frac{1}{2} \ln \sigma \ln(1-4z) - \ln \sigma \ln z \right) \\ & + \frac{32}{3}(1-4z^2) \left(\text{Li}_2(\sigma) + \frac{1}{2} \ln(1-\sigma) \ln \sigma \right) \end{aligned}$$

6

$$\begin{aligned} & + (1+7z+10z^2-68z^3+32z^4) \frac{4 \ln \sigma}{3z} + \frac{8\pi^2}{3}(1+2z) \\ & - \sqrt{1-4z} \left[(1+9z+26z^2) \frac{4 \ln z}{3z} - 16(1+2z) \ln(1-4z) \right. \\ & \left. + \frac{8}{9}(19+53z+24z^2) \right] \\ & - 16\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_1}{m_b} + \frac{32}{3}\sqrt{1-4z}(1+2z) \ln \frac{\mu_2}{m_b}. \end{aligned} \quad (26)$$

In these equations we have set $N_c = 3$ and used

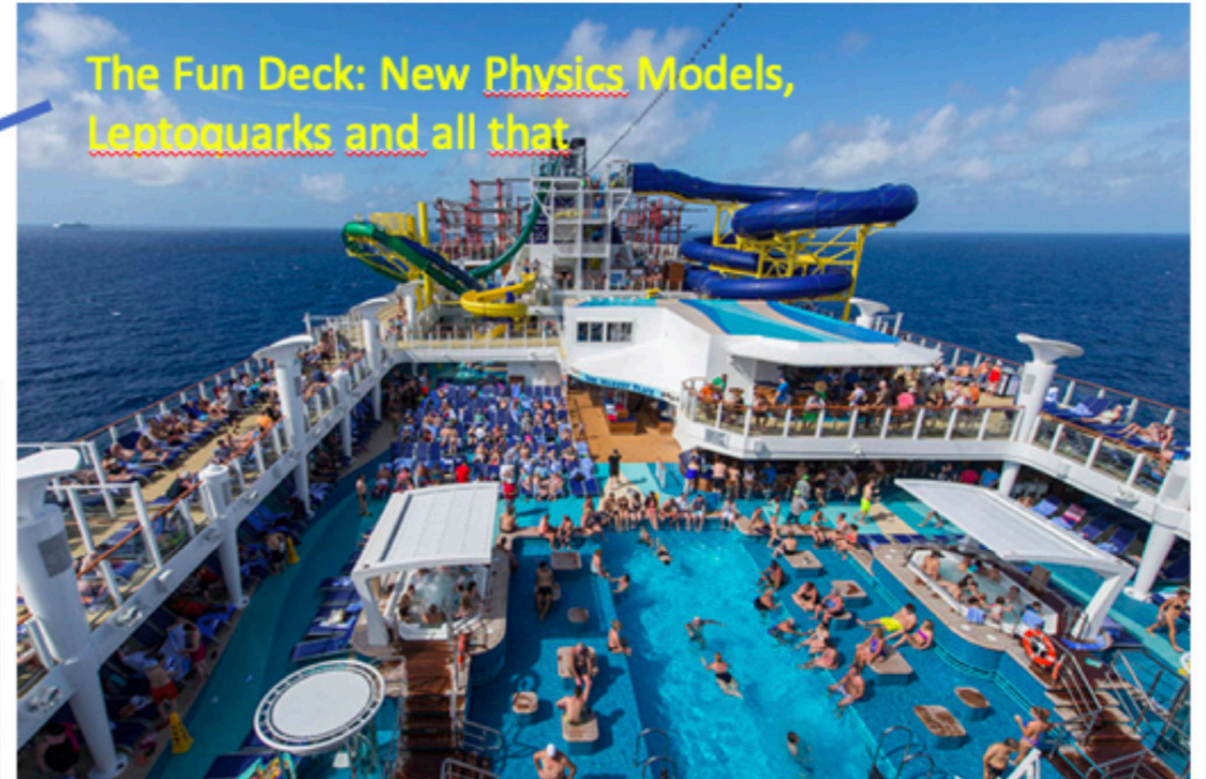
$$\text{Li}_2(x) = -\int_0^x dt \frac{\ln(1-t)}{t}, \quad \sigma = \frac{1-\sqrt{1-4z}}{1+\sqrt{1-4z}}, \quad z = \frac{m_c^2}{m_b^2}. \quad (27)$$



Schlussbemerkungen III



Ship of Flavour Theory



The Fun Deck: New Physics Models, Leptoquarks and all that

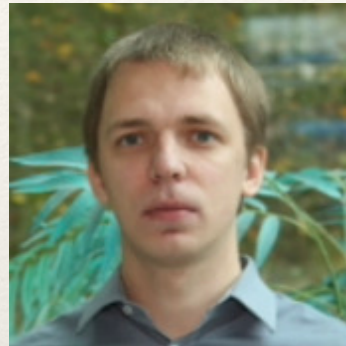
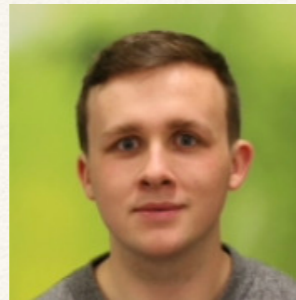


The Machine Deck: QCD Loops, Hadronic Matrix Elements and all that

alamy stock photo

Taken from Thomas Mannel

Siegener Teilchenphysiker aus Durham



Next week 9.12.2021

Prof. Dr. Michael Spannowsky
IPPP Direktor, Durham University

Quantum Computing for
High-Energy Physics



Alexander Lenz mit David Straub und 2 weiteren Personen

12. Juni 2019 · 🌐

Theoretical elementary particle physics is a very serious, competitive and tough business



Ma Marion, Andreas Kronfeld und 127 weitere Personen

16 Kommentare

Knowledge

Speculation

Experimentally tested

direct

indirect

Theory motivated

Known elementary particles:



Standard Model

unknown, very weakly particles could hide here!

Large Hadron Collider

Precision Tests: LHCb, ...

100 times more speculative

Supersymmetry
 New Heavy Particles (Z', Leptoquark, DM, ...)
 Grand Unified Theories?
 Superstrings 2
 Quantum Gravity?

