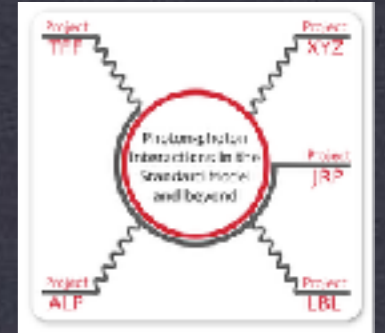




Camille Flammarions



NEUE PHYSIK MIT DEM MYON?

HARVEY MEYER
ACHIM DENIG

BACHELOR-SEMINAR
27. JUNI 2023

ANOMALES MYON ????

WAS IST DA LOS ????

April 2021

The New York Times

SCIENCE

A Tiny Particle's Wobble Could Upend the Known Laws of Physics

Experiments with particles known as muons suggest that there are forms of matter and energy vital to the nature and evolution of the cosmos that are not yet known to science.

By Dennis Overbye

L'anomalia del muone: l'esperimento che suggerisce l'esistenza di nuove forze della

Frankfurter Allgemeine

ANOMALES MYON

Attacke auf das Standardmodell?

VON MANFRED LINDINGER - AKTUALISIERT AM 17.04.2021 - 15:00

DER SPIEGEL

Neue Erkenntnisse in der Teilchenphysik

Kundschafter ins Unbekannte

Seit 50 Jahren erschließen Forscher Einblicke in die Welt jenseits der Welt. Jetzt öffnet sich das Tor zu einer neuen Physik.



PIEGEL 05/2021



SCIENCES - PHYSIQUE

Les rotations du muon électrisent la communauté des physiciens

Une anomalie dans le comportement magnétique du muon, une particule élémentaire, est-elle le signe que le cadre conceptuel servant à décrire l'infiniment petit est en train de craquer? Des résultats contradictoires relancent le débat.



NEWS | 07 April 2021

Is the standard model broken? Physicists cheer major muon result

The muon's magnetic moment is larger than expected — a hint that new elementary particles are waiting to be discovered.

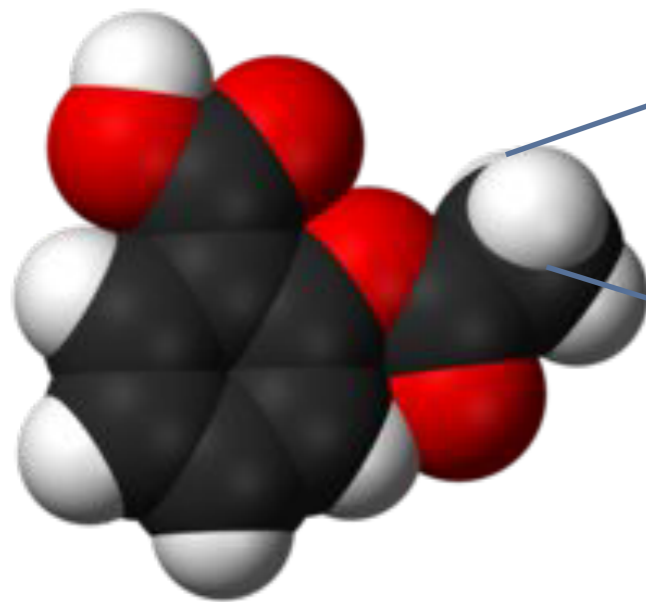
AUFBAU DER MATERIE

Festkörperphysik

Atomphysik

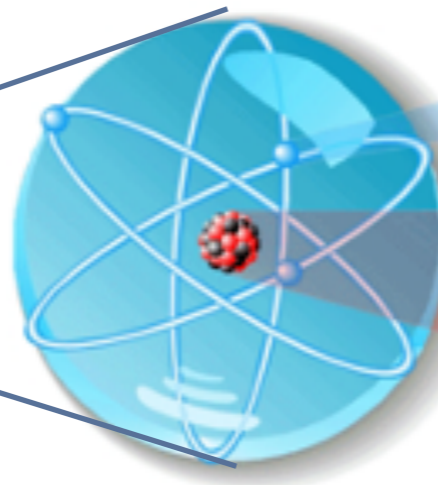
Kern- / Teilchenphysik

Molekül



Nanoskala
~1 Milliardstel Meter

Atom



Elektron



Elementarteilchen
punktförmig



Kern



Nukleon

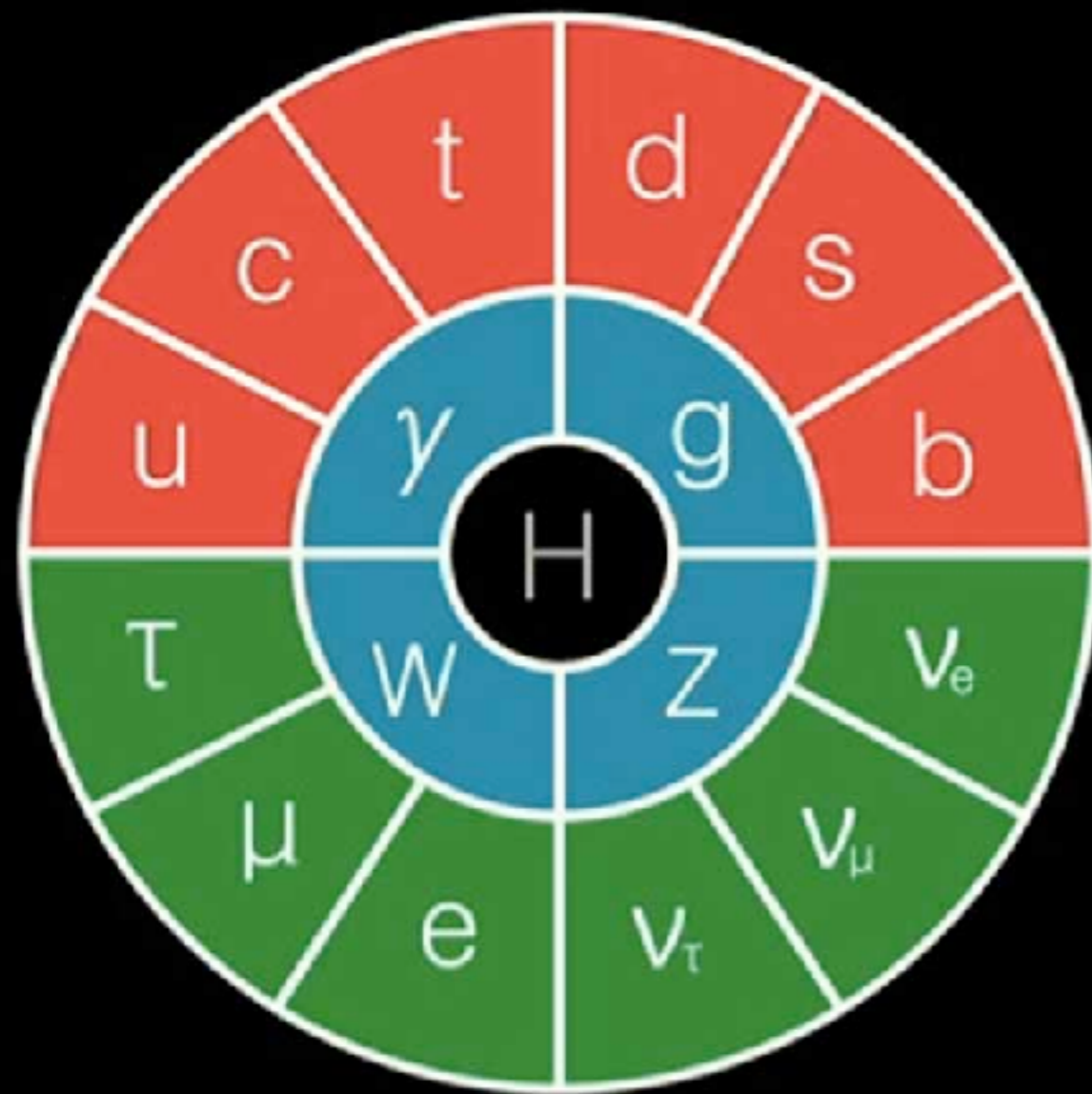
(Proton+Neutron)

Femtoskala
~1 Millionstel Nanometer


up, down
Quarks



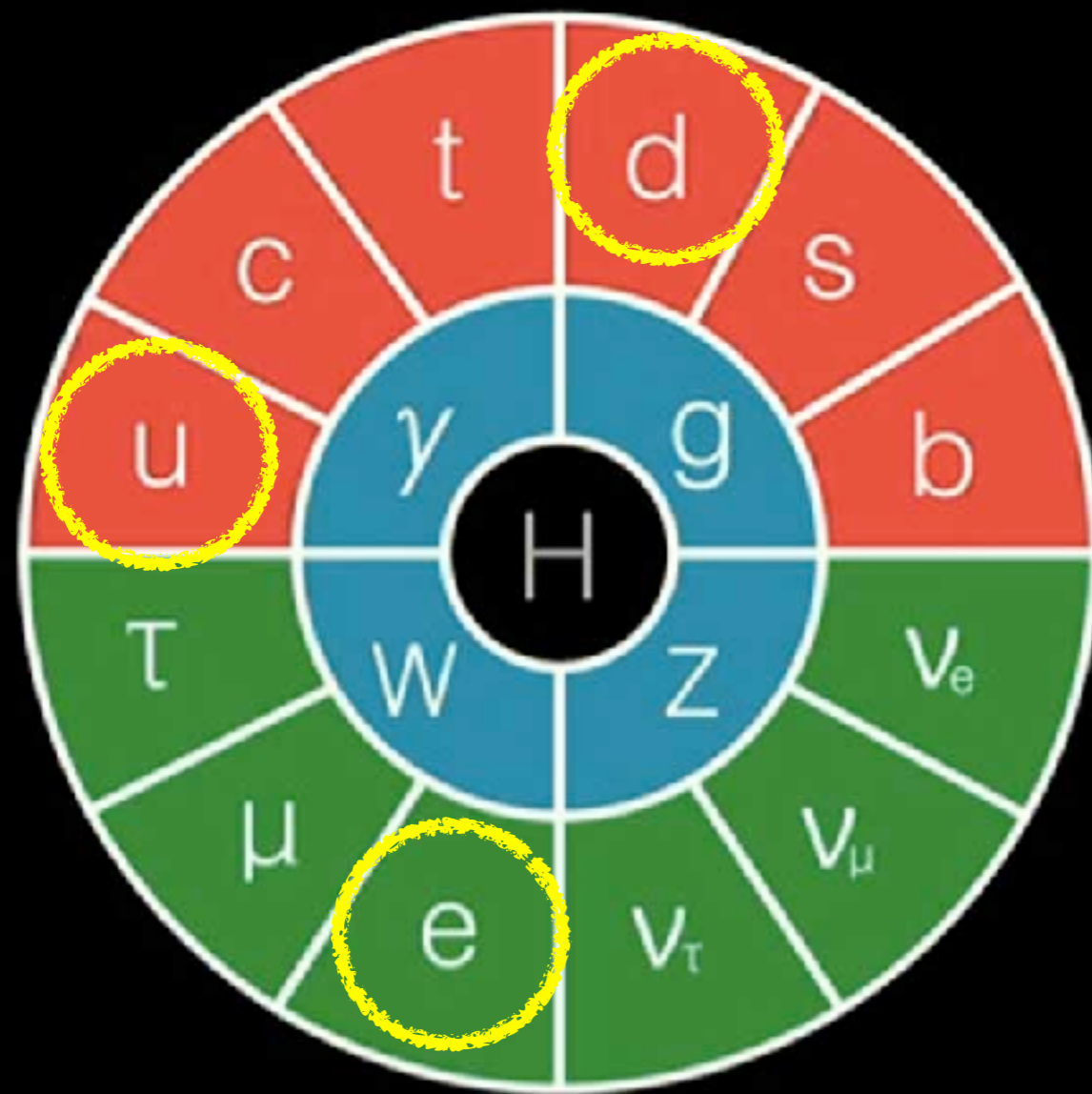
STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK







Materie- Teilchen

- | | |
|--|---|
|  Quarks |  Kraft-Teilchen |
|  Leptonen |  Higgs-Boson
(vermittelt Masse) |

STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK



Materie- Teilchen

- | | |
|--|---|
|  Quarks |  Kraft-Teilchen |
|  Leptonen |  Higgs-Boson
(vermittelt Masse) |

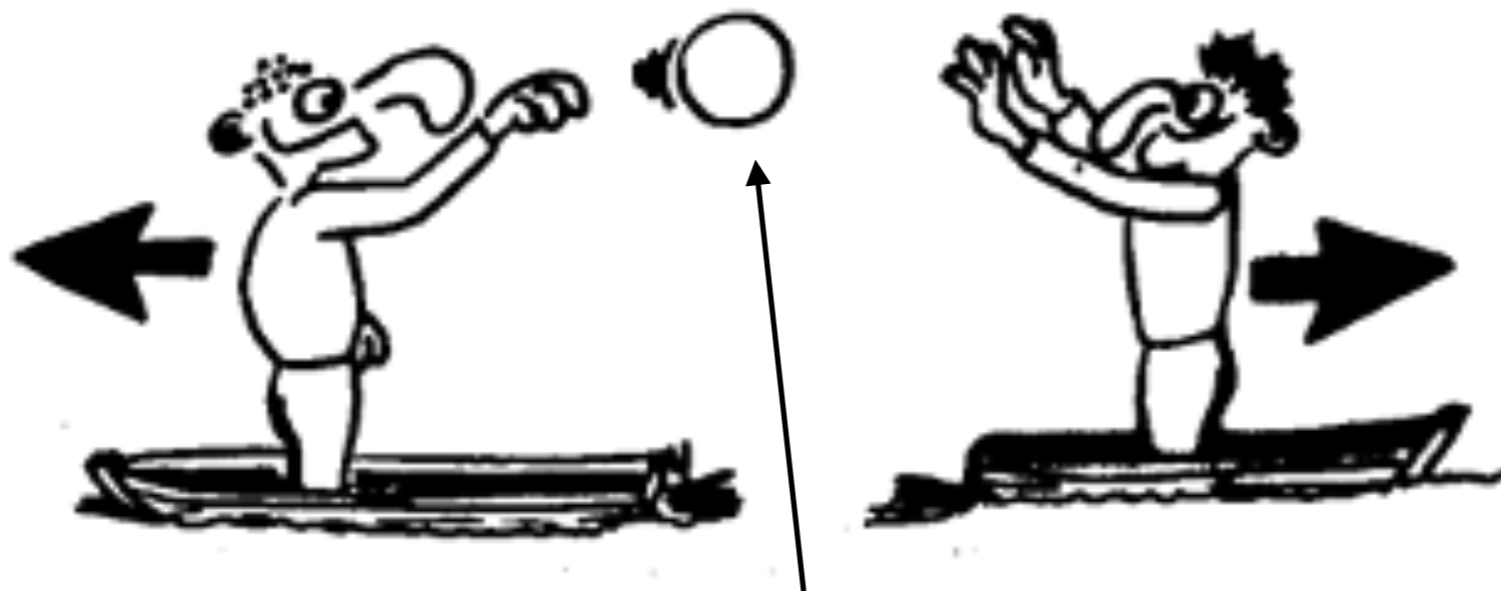
STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Vermittlung der Wechselwirkung (WW)
über Austauschteilchen



STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Vermittlung der Wechselwirkung (WW)
über Austauschteilchen



Austauschteilchen:

- **Photon** im Falle Elektromagnetismus
- **W- bzw. Z-Bosonen** im Falle schwache WW
- **Gluonen** im Falle der starken WW

EINE GROßARTIGE THEORIE DIESES STANDARDMODELL !!!

Beschreibt drei fundamentale Wechselwirkungen der Natur ...

**Mathematisch basierend auf eleganten Symmetrieprinzipien,
formuliert in Quantenfeldtheorien ...**

Besitzt eine großartige Vorhersagekraft ...

In tausenden von Experimenten experimentell bestätigt ...

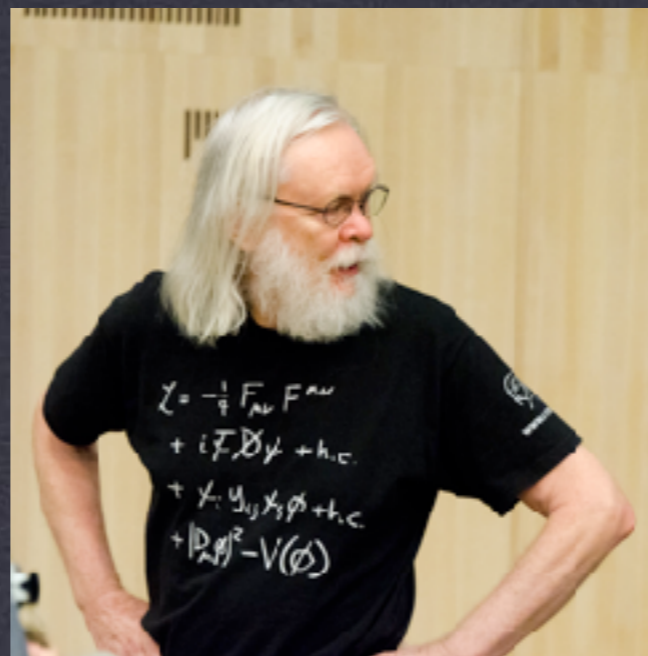
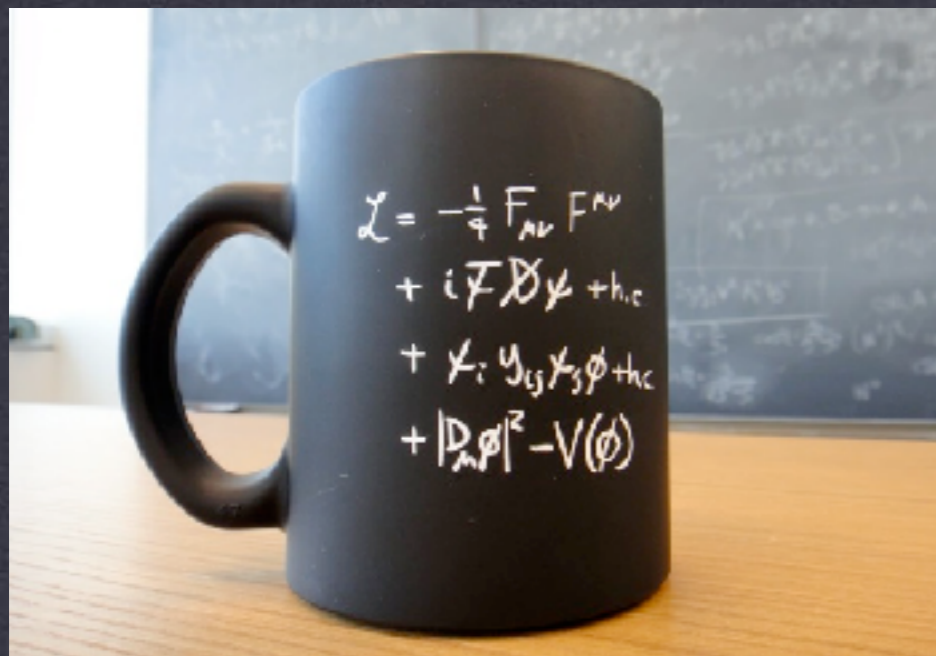
EINE GROßARTIGE THEORIE DIESES STANDARDMODELL !!!

Beschreibt drei fundamentale Wechselwirkungen der Natur ...

Mathematisch basierend auf eleganten Symmetrieprinzipien,
formuliert in Quantenfeldtheorien ...

Besitzt eine großartige Vorhersagekraft ...

In tausenden von Experimenten experimentell bestätigt ...



ABER: STANDARDMODELL KANN SO EINIGES NICHT ERKLÄREN !!!

Viel mehr Materie im Weltall als durch Standardmodell
erklärt ... **Dunkle Materie** ... ?!?!?!?

Materie-Antimaterie-Asymmetrie nicht erklärt ... ?!?!?!?

Warum so **unterschiedliche Massen** von Materieteilchen ... ?!?!?!?

6 Quarks und Leptonen ... warum so viele ... ?!?!?!

Gravitation nicht Teil des Standardmodells ... ?!?!?!?

AB
SO

ANN
N !!!

Vie

odell

Ma

?!?!?!?

Warum s

n ... ?!?!?!?

6

?!?

G

?!?!?



Neue Physik

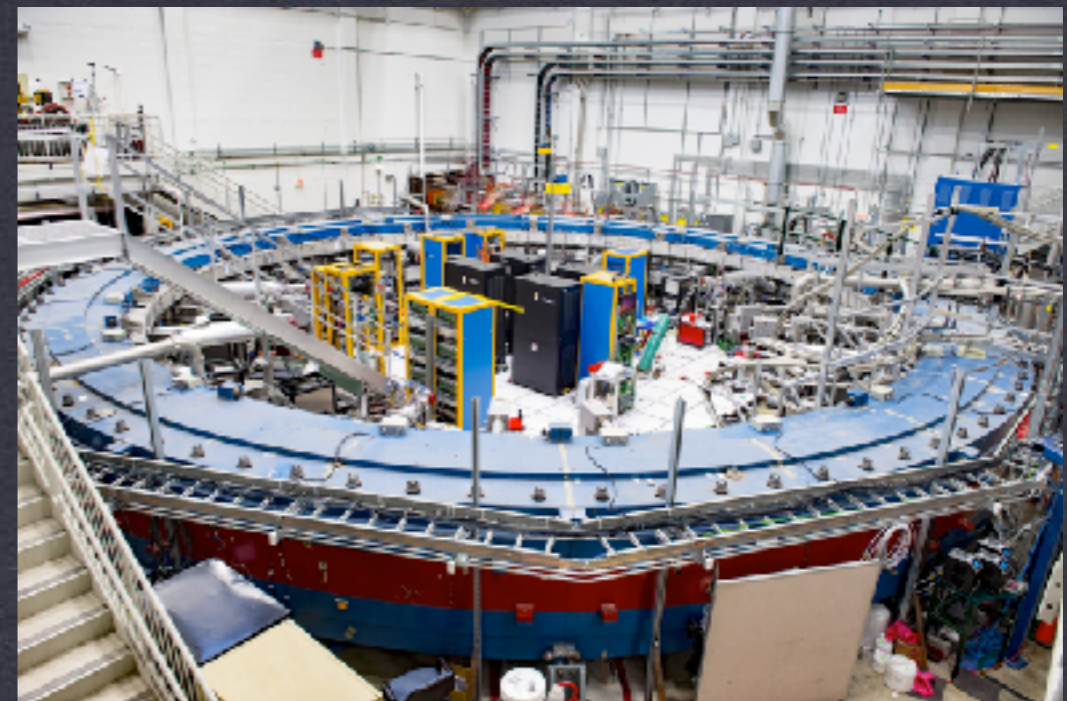
**Suche nach übergeordneter Theorie:
Erprobe die Grenzen des Standardmodells**

WIE ERPROBT MAN DIE GRENZEN DES STANDARDMODELLS ?

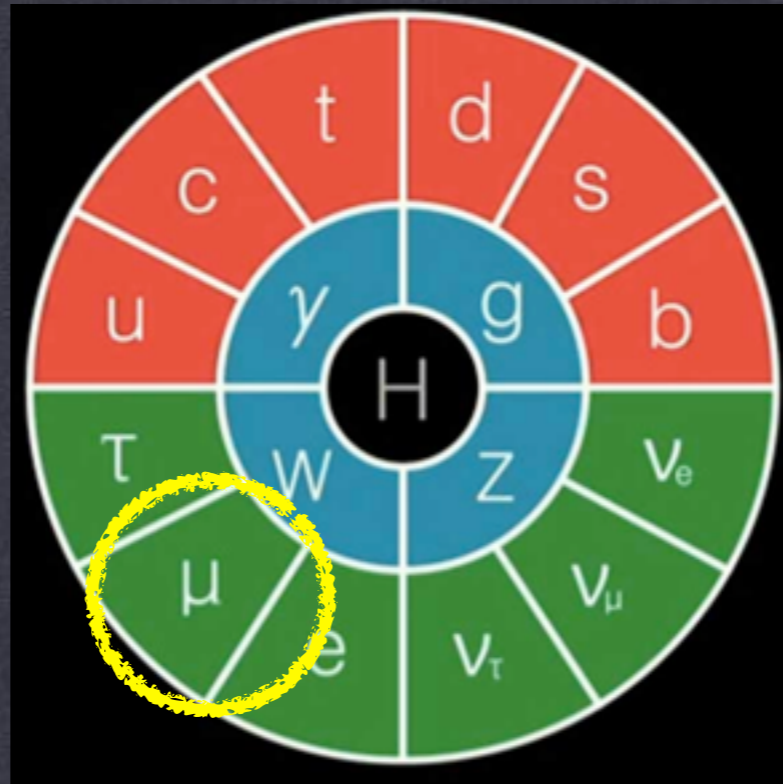
Messungen bei **höchsten
Energien** (z.B. LHC / CERN)



Messungen bei **höchster
Präzision** (z.B. g-2 des Myons)



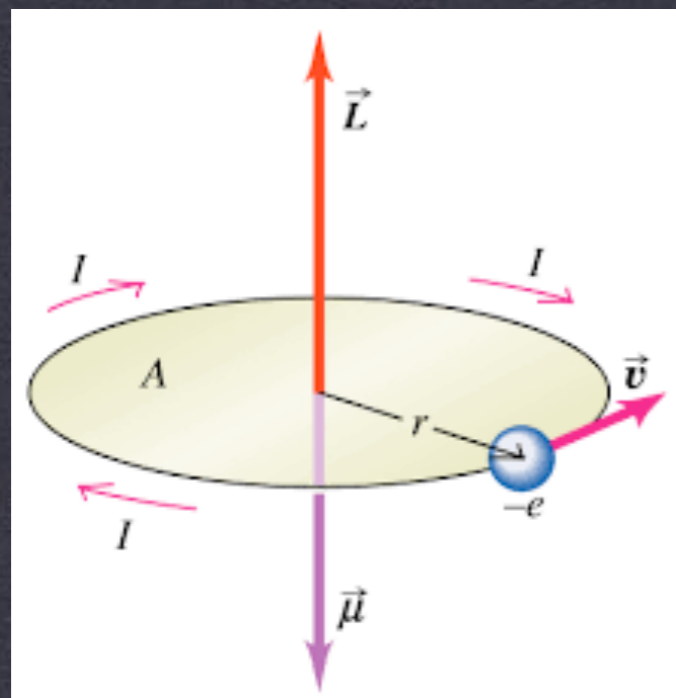
**Ziel in beiden Fällen: Finde Abweichung von
einer Vorhersage des Standardmodells !**



DAS MAGNETISCHE MOMENT DES MYONS

MAGNETISCHES MOMENT

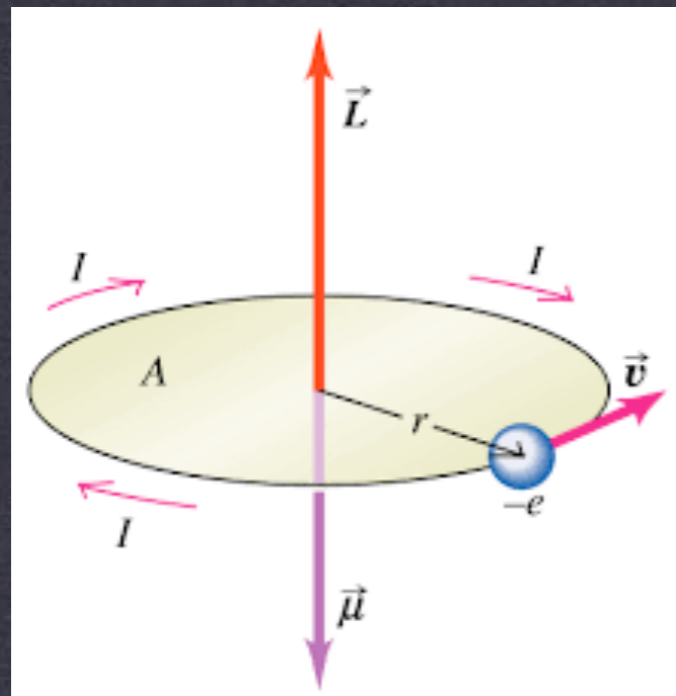
Im Atom:



Bewegte Ladung $q=-e$ des Elektrons um den Atomkern im Zentrum bildet einen Strom $I = q \cdot \omega/2\pi = -e \cdot \omega/2\pi$
Drehimpuls $L = mr^2 \cdot \omega$

MAGNETISCHES MOMENT

Im Atom:



Bewegte Ladung $q=-e$ des Elektrons um den Atomkern im Zentrum bildet einen Strom $I = q \cdot \omega/2\pi = -e \cdot \omega/2\pi$
Drehimpuls $L = mr^2 \cdot \omega$

Magnetisches Moment ist (anti-)parallel zum Drehimpuls des Elektrons

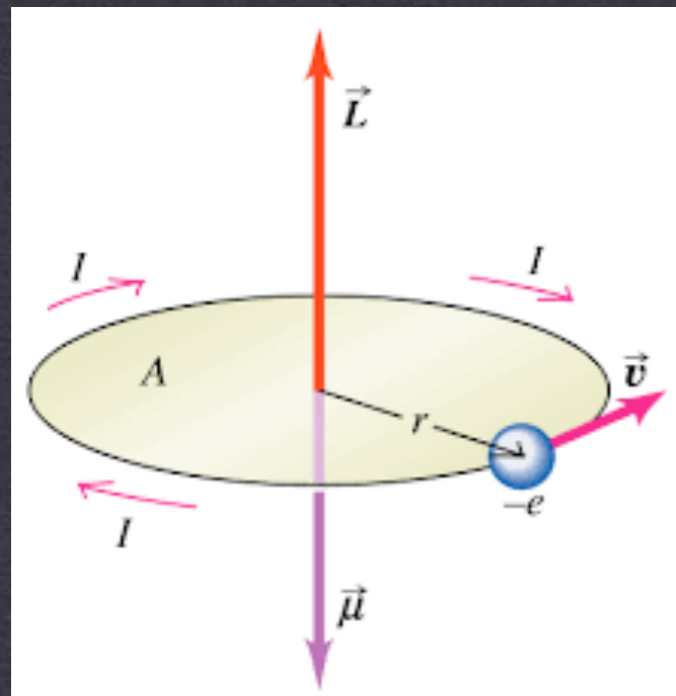
$$\vec{\mu} = I \cdot \vec{A} = g \cdot \frac{-e}{2m_e} \vec{L}$$

$g = 1$

und richtet sich im Magnetfeld aus

MAGNETISCHES MOMENT

Im Atom:



Bewegte Ladung $q=-e$ des Elektrons um den Atomkern im Zentrum bildet einen Strom $I = q \cdot \omega/2\pi = -e \cdot \omega/2\pi$
Drehimpuls $L = mr^2 \cdot \omega$

Magnetisches Moment ist (anti-)parallel zum Drehimpuls des Elektrons

$$\vec{\mu} = I \cdot \vec{A} = g \cdot \frac{-e}{2m_e} \vec{L}$$

$g = 1$

und richtet sich im Magnetfeld aus

In Quantenmechanik ist Drehimpuls quantisiert: $|\vec{L}| = l \cdot \hbar$
 $l = 1, 2, 3, \dots$

MAGNETISCHES MOMENT MYON

Myon ist ein schwerer Bruder des Elektrons ($m_\mu \sim 200 \times m_e$);
Myon nicht stabil, zerfällt in 2,2 Mikrosekunden; Ladung $q = -e$;

besitzt einen Quanten - Spin (Eigendrehimpuls) $|\vec{S}| = \frac{1}{2} \cdot \hbar$

MAGNETISCHES MOMENT MYON

Myon ist ein schwerer Bruder des Elektrons ($m_\mu \sim 200 \times m_e$);
Myon nicht stabil, zerfällt in 2,2 Mikrosekunden; Ladung $q = -e$;

besitzt einen Quanten - Spin (Eigendrehimpuls) $|\vec{S}| = \frac{1}{2} \cdot \hbar$

➔ Magnetisches Moment Spin richtet sich im Magnetfeld aus

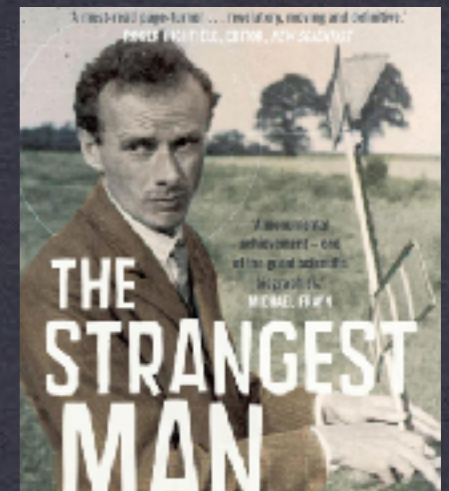
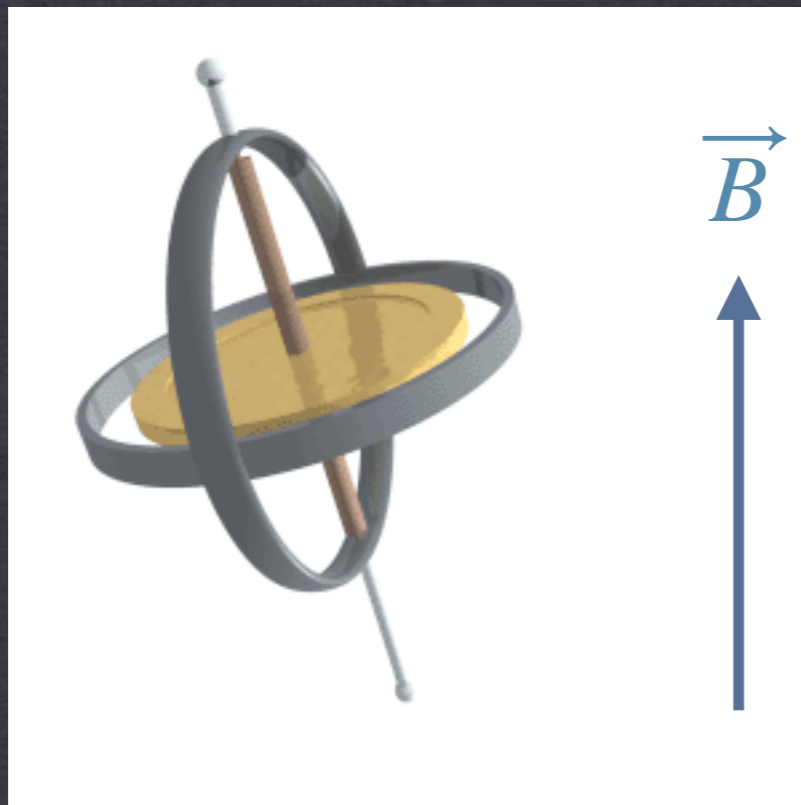
Relativistische Quantenmechanik:

Stärke der Kopplung des
Myons mit Magnetfeld
parametrisiert durch g :

$$g=2$$

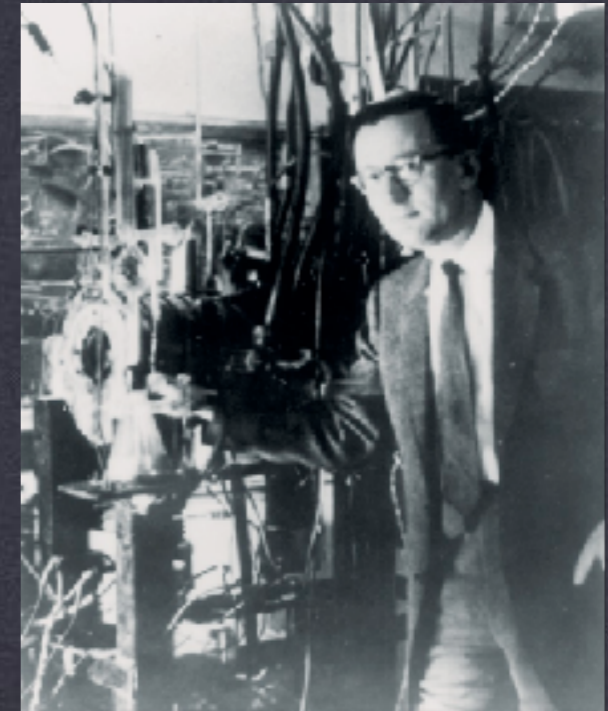
Paul Dirac

1928



g - 2

Polykarp Kusch zeigt in den 40er Jahren
experimentell: $g = 2,002 \dots$

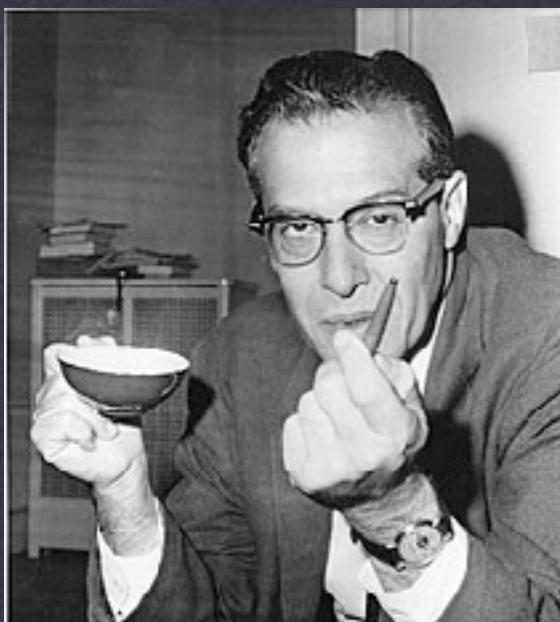


g - 2

Polykarp Kusch zeigt in den 40er Jahren experimentell: $g = 2,002 \dots$



Grund dafür, dass g von 2 verschieden ist, liegt darin, dass die Quantenmechanik nicht ausreichend zur Beschreibung des magnetischen Moments ist \rightarrow **Quantenfeldtheorie**



$$\frac{g - 2}{2} \sim \frac{\alpha}{2\pi}$$

Erste Berechnung der Abweichung von g von 2 durch Julian Schwinger

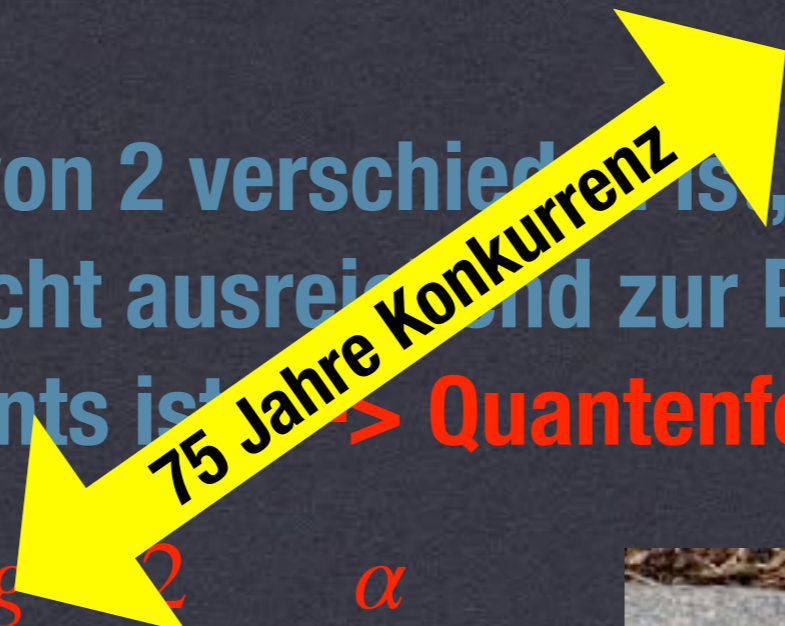


g - 2

Polykarp Kusch zeigt in den 40er Jahren experimentell: $g = 2,002 \dots$



Grund dafür, dass g von 2 verschieden ist, liegt darin, dass die Quantenmechanik nicht ausreichend zur Beschreibung des magnetischen Moments ist. \rightarrow Quantenfeldtheorie



75 Jahre Konkurrenz

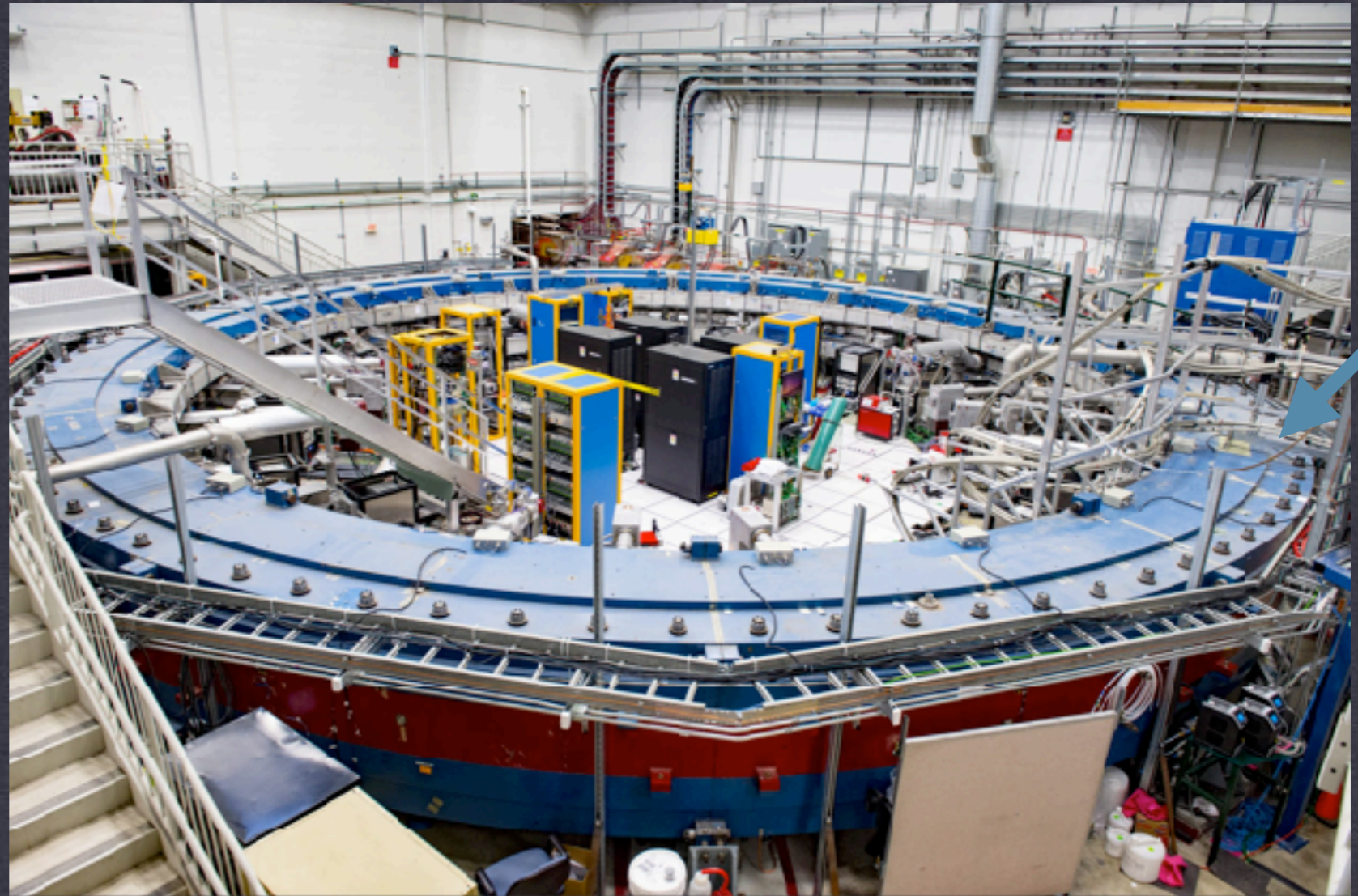


$$\frac{g-2}{2} \sim \frac{\alpha}{2\pi}$$

Erste Berechnung der Abweichung von g von 2 durch Julian Schwinger

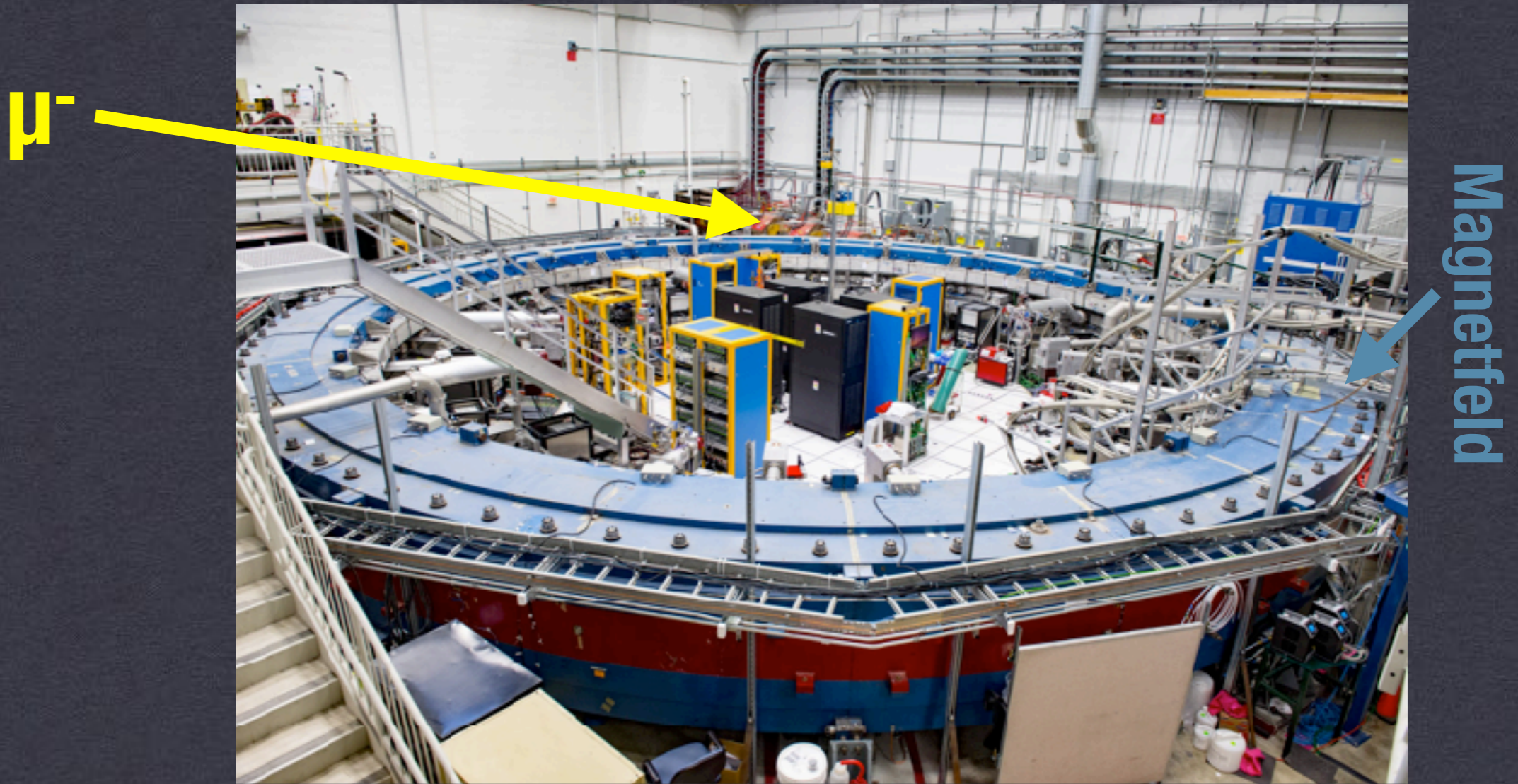


MAGNETISCHES MOMENT MYON IM FERMILAB EXPERIMENT

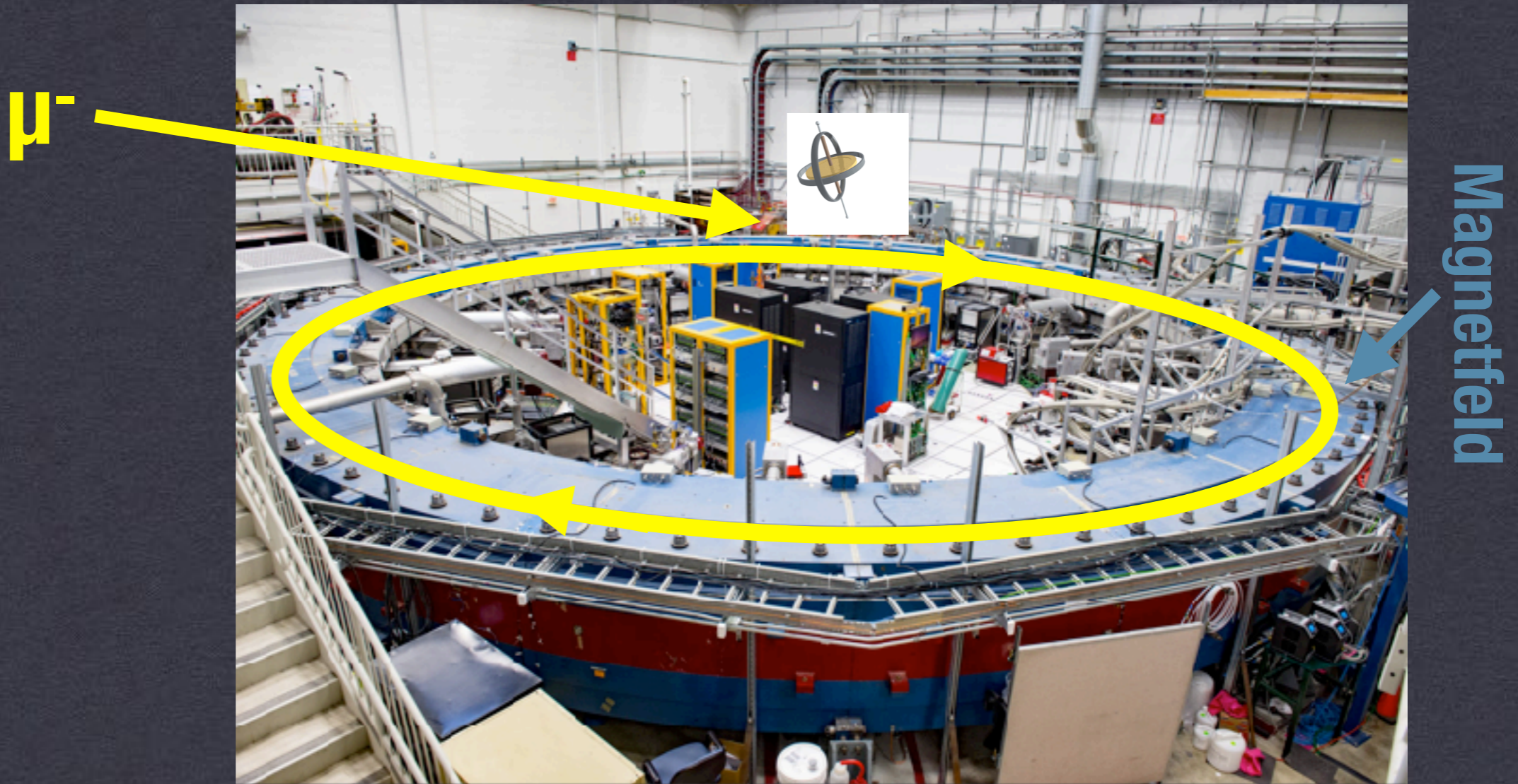


Magnetfeld

MAGNETISCHES MOMENT MYON IM FERMILAB EXPERIMENT



MAGNETISCHES MOMENT MYON IM FERMILAB EXPERIMENT

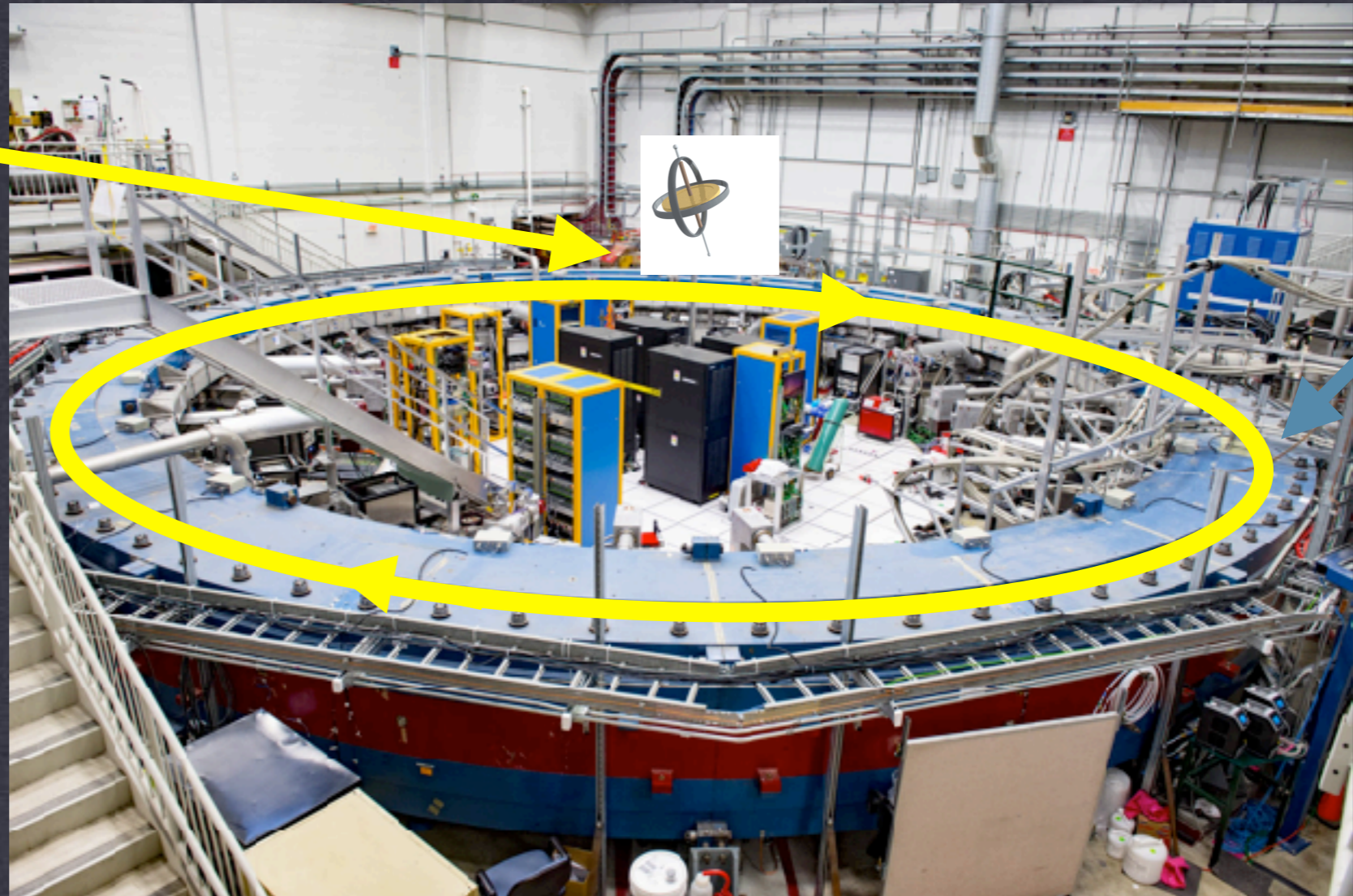


MAGNETISCHES MOMENT MYON IM FERMILAB EXPERIMENT

μ^-

mittlere Weglänge (bei 99,5% der Lichtgeschwindigkeit):
19,5 km

400 Umdrehungen



Magnetfeld

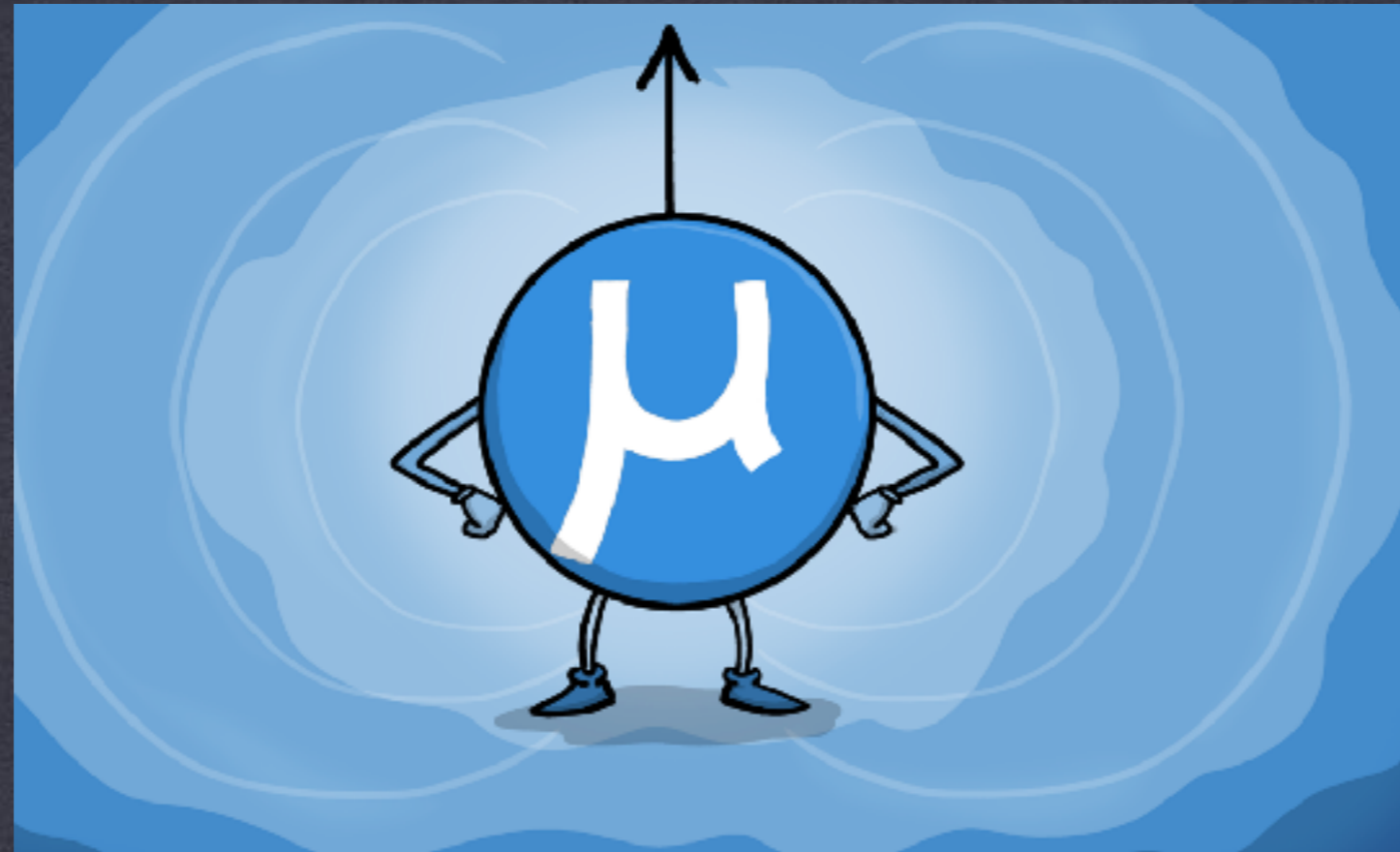
$$g_{\text{exp}} = 2,00233184122 \pm 0,000000000082$$

QUANTENFELDTHEORIE

Erweiterung der (relativistischen) Quantenmechanik;

Fundamentale WWen im Standardmodell der Teilchenphysik werden im Rahmen von solchen Quantenfeldtheorien beschrieben;

Erzeugung und Vernichtung von (virtuellen) Teilchen / Antiteilchen

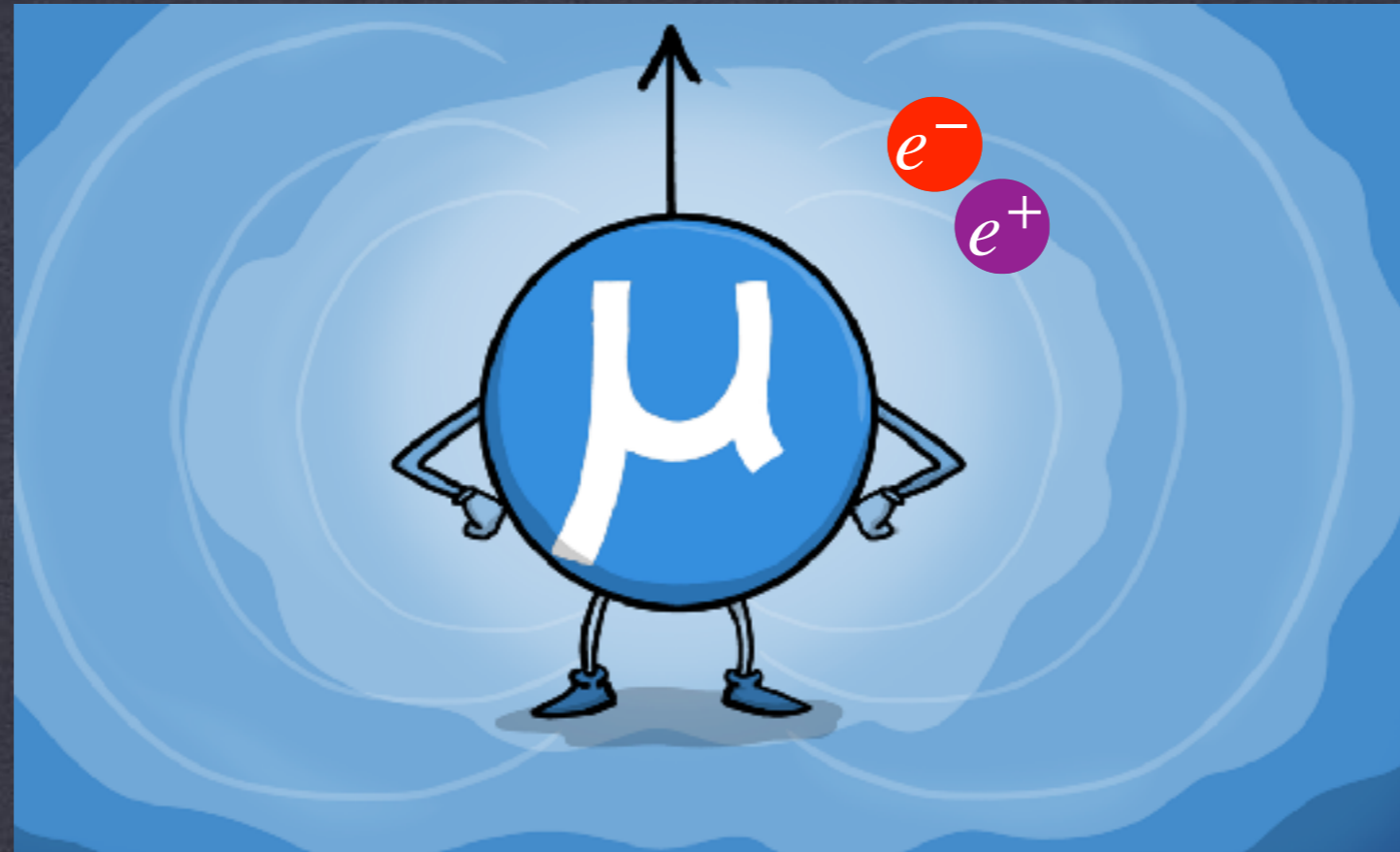


QUANTENFELDTHEORIE

Erweiterung der (relativistischen) Quantenmechanik;

Fundamentale WWen im Standardmodell der Teilchenphysik werden im Rahmen von solchen Quantenfeldtheorien beschrieben;

Erzeugung und Vernichtung von (virtuellen) Teilchen / Antiteilchen

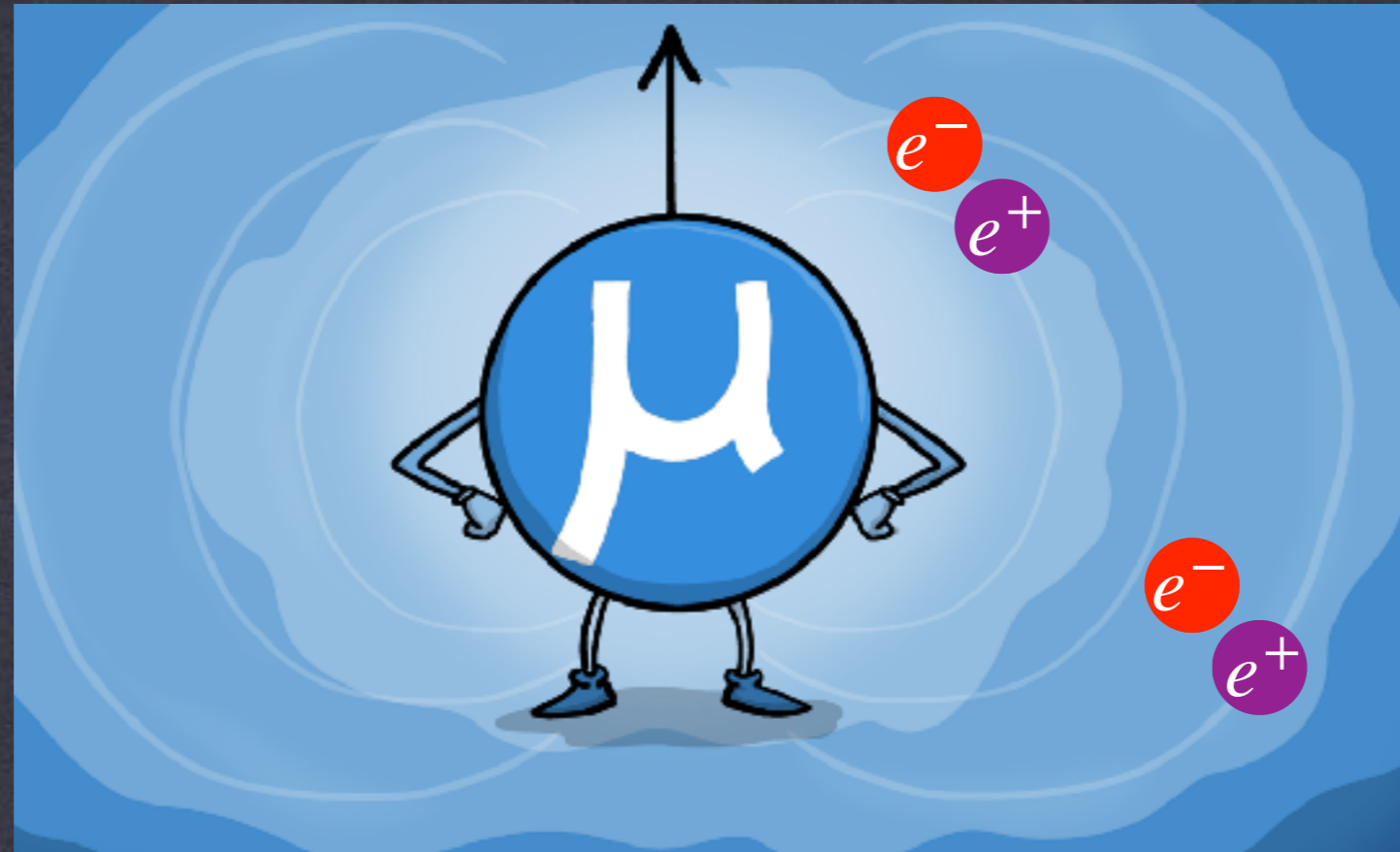


QUANTENFELDTHEORIE

Erweiterung der (relativistischen) Quantenmechanik;

Fundamentale WWen im Standardmodell der Teilchenphysik werden im Rahmen von solchen Quantenfeldtheorien beschrieben;

Erzeugung und Vernichtung von (virtuellen) Teilchen / Antiteilchen

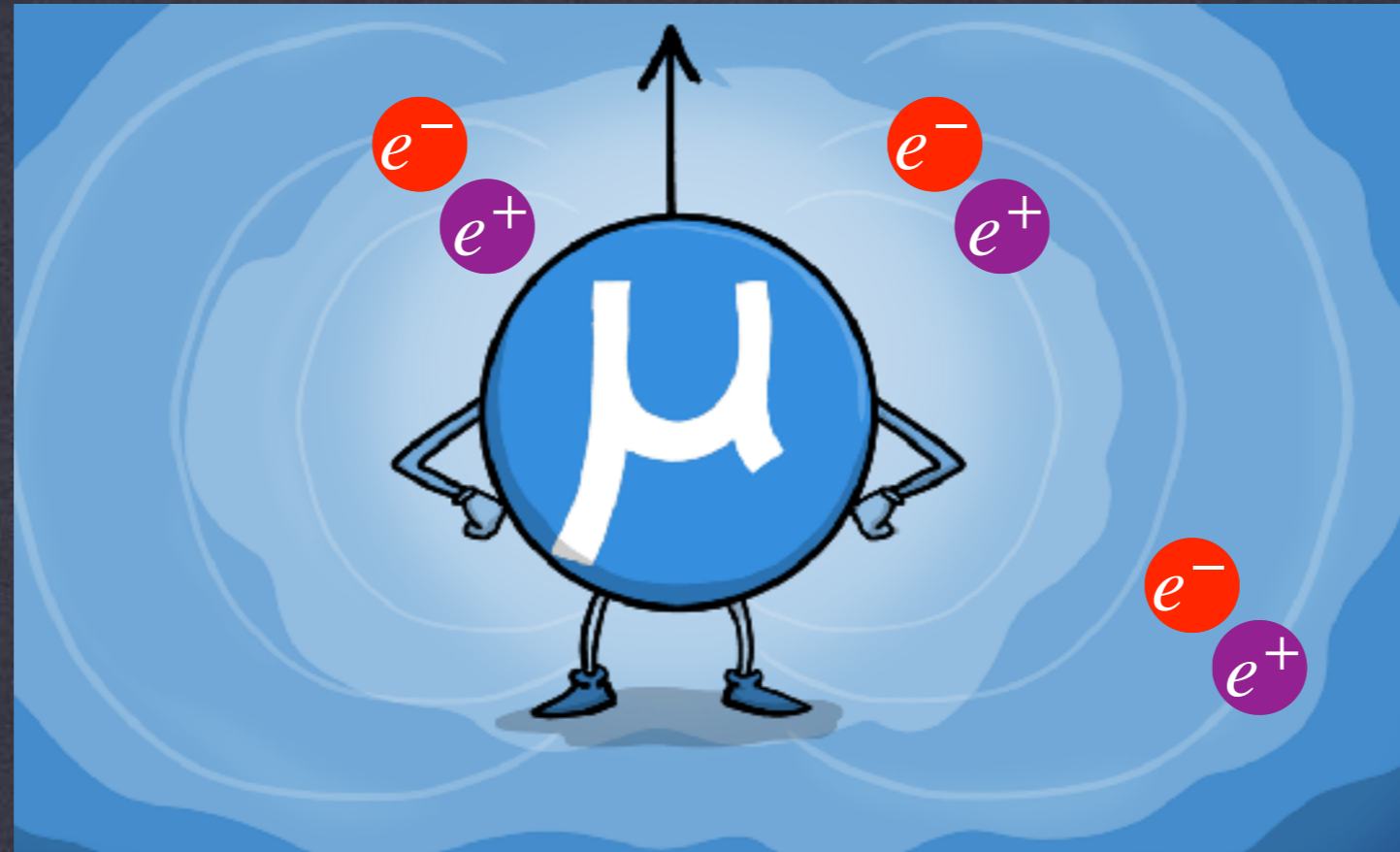


QUANTENFELDTHEORIE

Erweiterung der (relativistischen) Quantenmechanik;

Fundamentale WWen im Standardmodell der Teilchenphysik werden im Rahmen von solchen Quantenfeldtheorien beschrieben;

Erzeugung und Vernichtung von (virtuellen) Teilchen / Antiteilchen

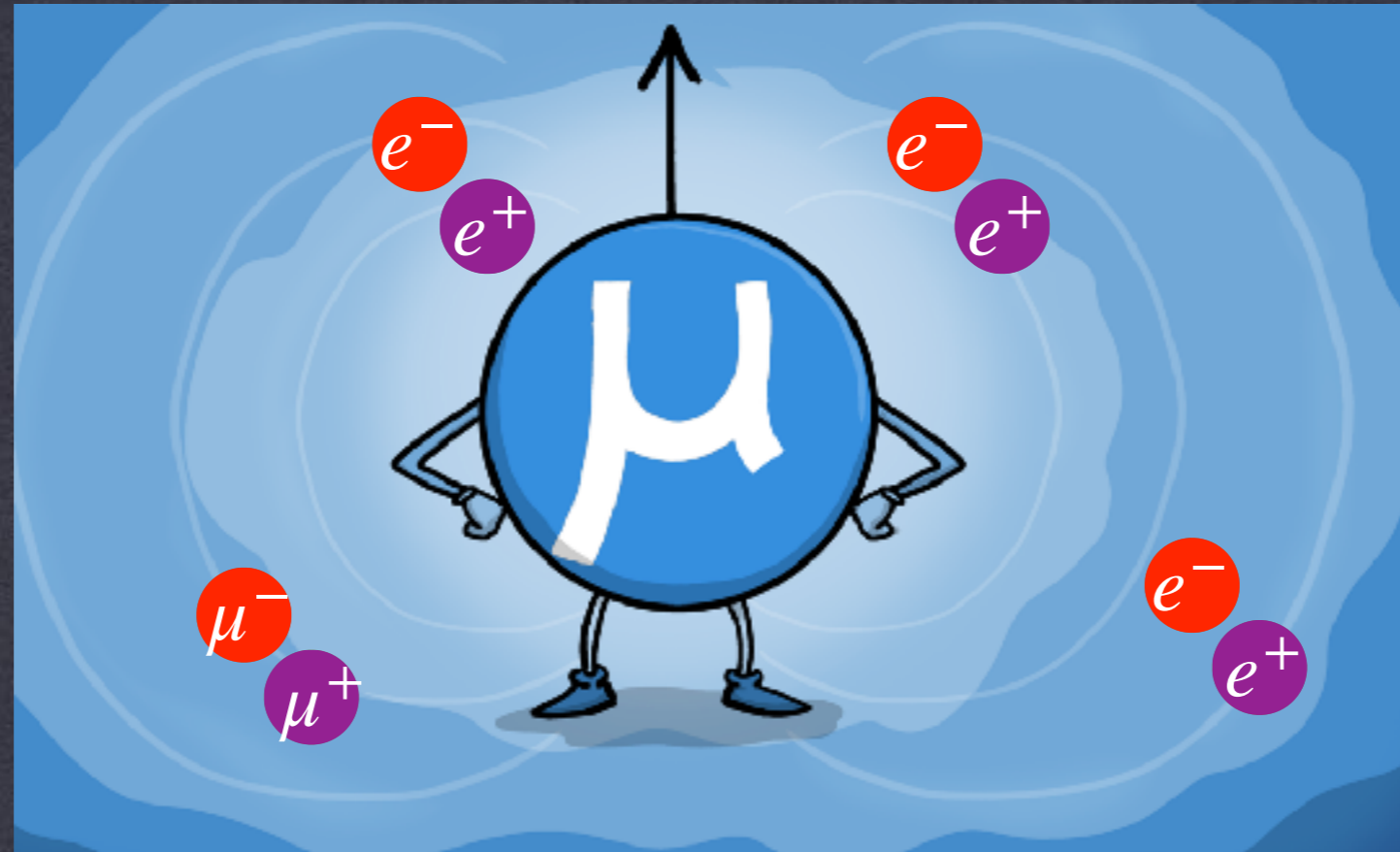


QUANTENFELDTHEORIE

Erweiterung der (relativistischen) Quantenmechanik;

Fundamentale WWen im Standardmodell der Teilchenphysik werden im Rahmen von solchen Quantenfeldtheorien beschrieben;

Erzeugung und Vernichtung von (virtuellen) Teilchen / Antiteilchen

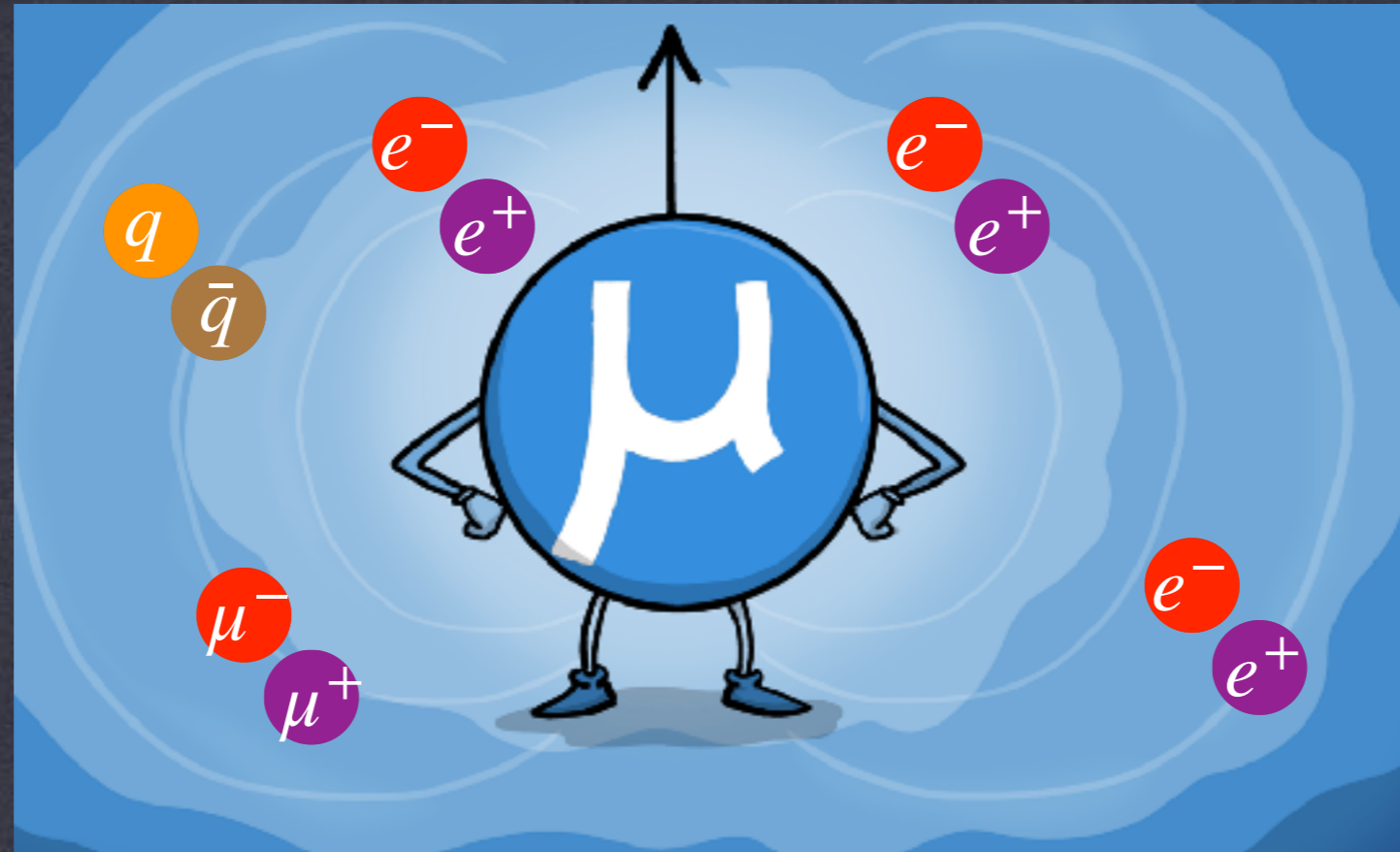


QUANTENFELDTHEORIE

Erweiterung der (relativistischen) Quantenmechanik;

Fundamentale WWen im Standardmodell der Teilchenphysik werden im Rahmen von solchen Quantenfeldtheorien beschrieben;

Erzeugung und Vernichtung von (virtuellen) Teilchen / Antiteilchen

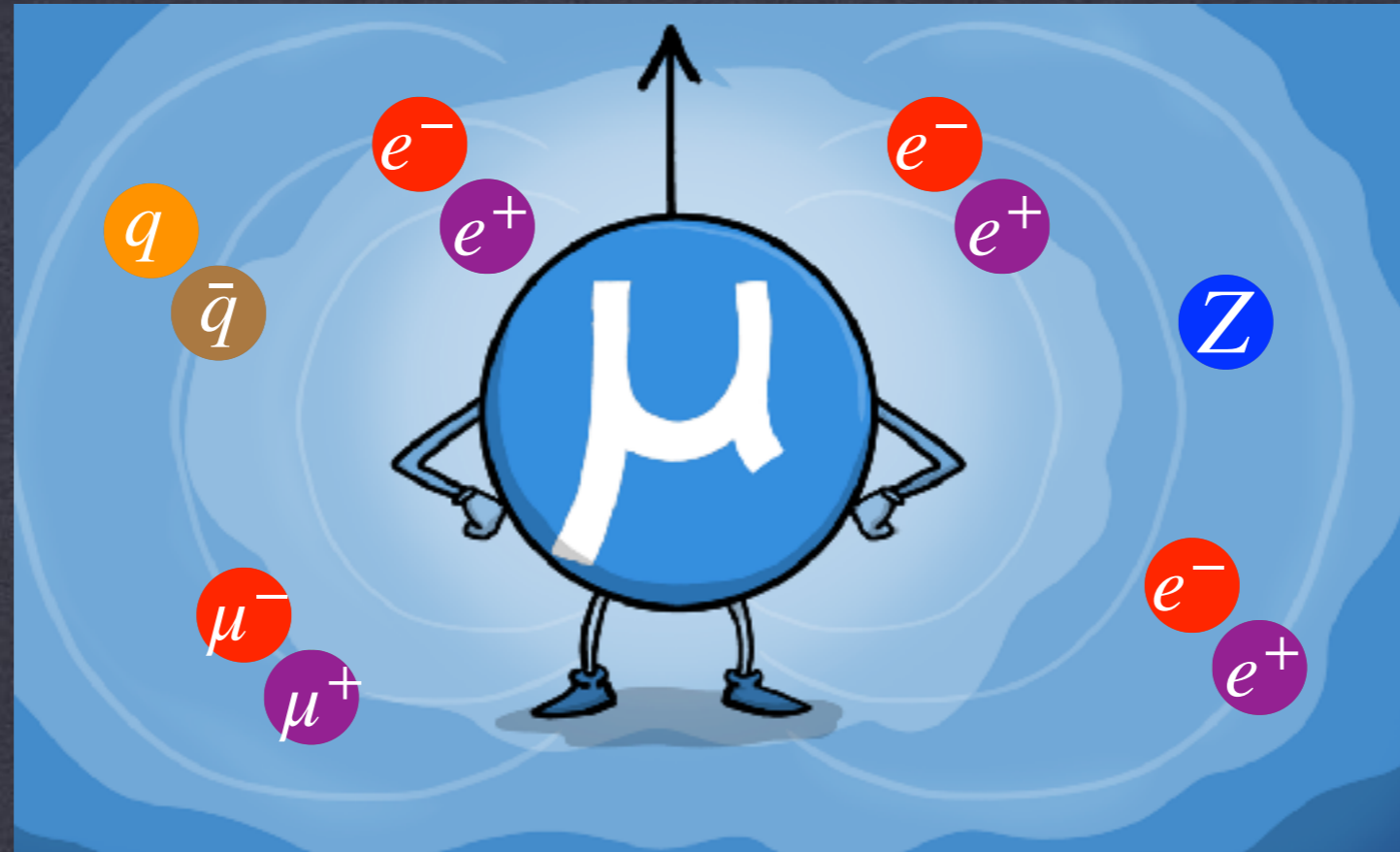


QUANTENFELDTHEORIE

Erweiterung der (relativistischen) Quantenmechanik;

Fundamentale WWen im Standardmodell der Teilchenphysik werden im Rahmen von solchen Quantenfeldtheorien beschrieben;

Erzeugung und Vernichtung von (virtuellen) Teilchen / Antiteilchen

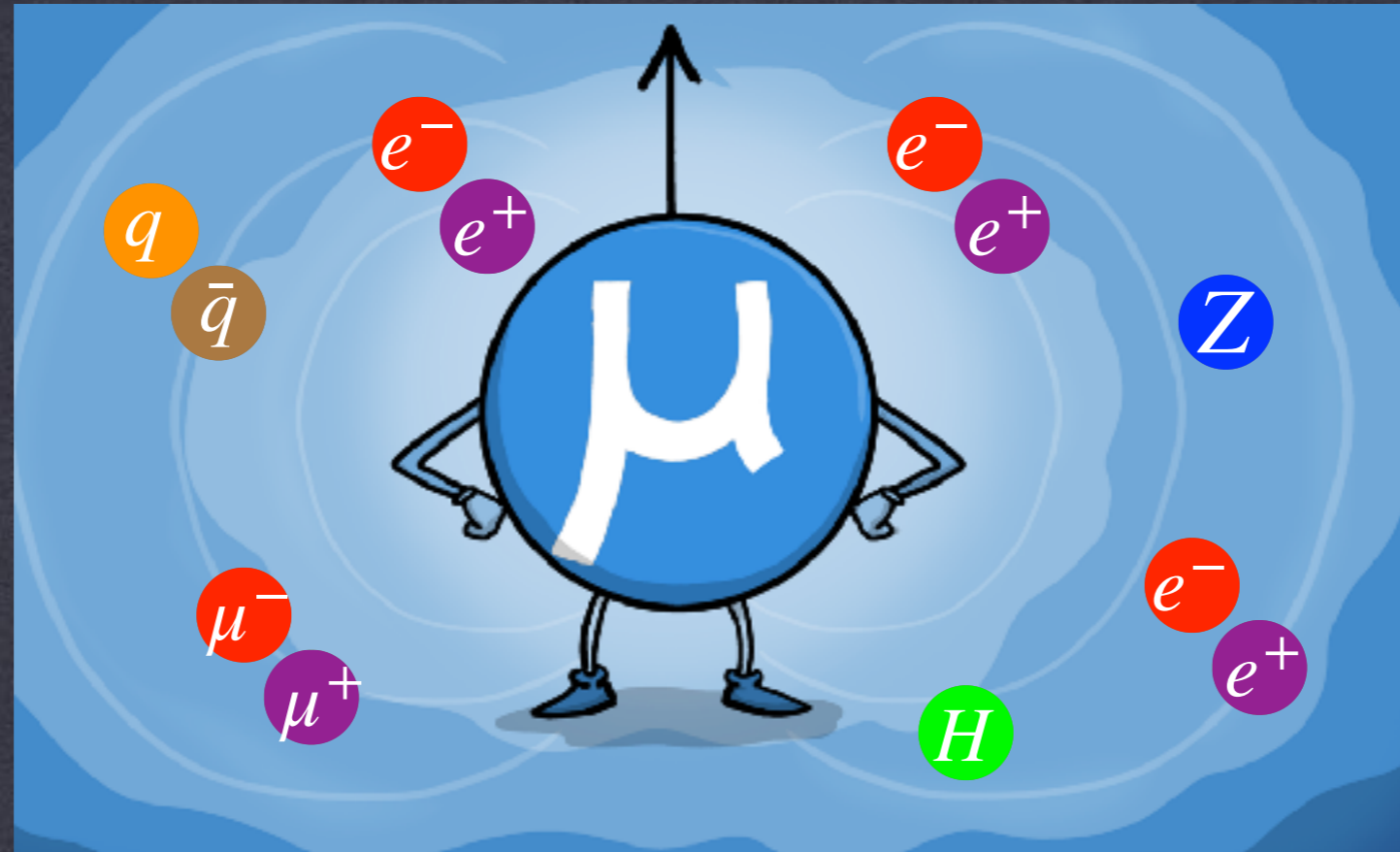


QUANTENFELDTHEORIE

Erweiterung der (relativistischen) Quantenmechanik;

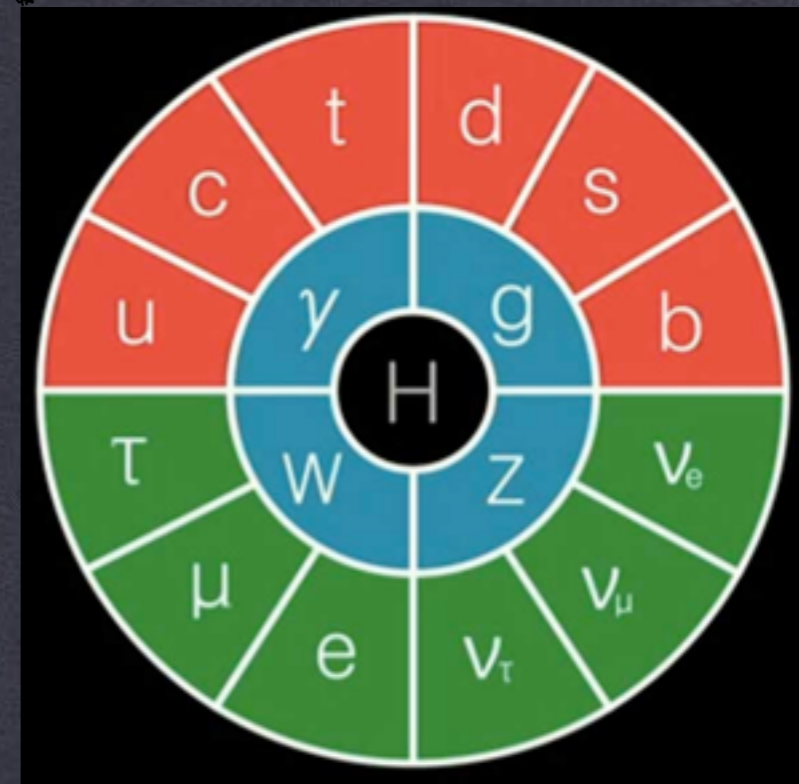
Fundamentale WWen im Standardmodell der Teilchenphysik werden im Rahmen von solchen Quantenfeldtheorien beschrieben;

Erzeugung und Vernichtung von (virtuellen) Teilchen / Antiteilchen



MAGNETISCHES MOMENT MYON IM STANDARDMODELL

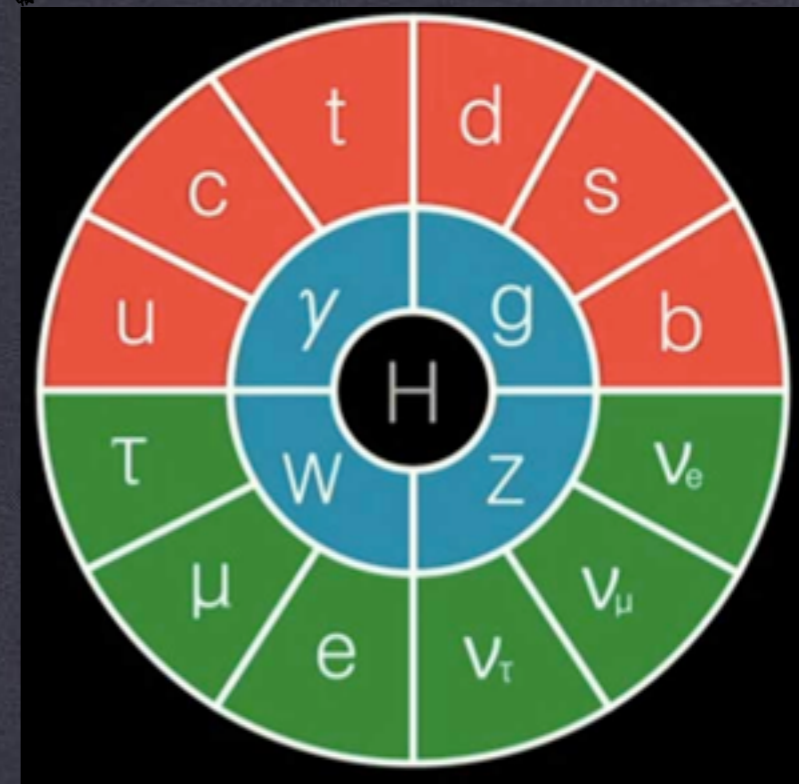
Aus dem Katalog der Standardmodell-Teilchen werden alle bekannten Teilchen ausgewählt und der entsprechende Beitrag zu g berechnet (kompliziert, aber machbar)



MAGNETISCHES MOMENT MYON IM STANDARDMODELL

Aus dem Katalog der Standardmodell-Teilchen werden alle bekannten Teilchen ausgewählt und der entsprechende Beitrag zu g berechnet (kompliziert, aber machbar)

Quark-
Antiquark



QUARK-BEITRÄGE ZU DEM ANOMALEN MOMENT DES MYONS

Limitieren vollkommen die Vorhersage für $g-2$ des Myons :-)

QUARK-BEITRÄGE ZU DEM ANOMALEN MOMENT DES MYONS

Limitieren vollkommen die Vorhersage für $g-2$ des Myons :-)

Können an Elektron-Positron-Beschleunigern vermessen werden :-)

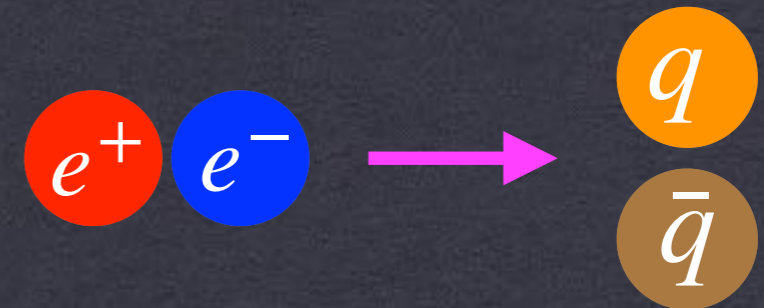


QUARK-BEITRÄGE ZU DEM ANOMALEN MOMENT DES MYONS

Limitieren vollkommen die Vorhersage für $g-2$ des Myons :-)

Können an Elektron-Positron-Beschleunigern vermessen werden :-)

Reaktion $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow$ Hadronen

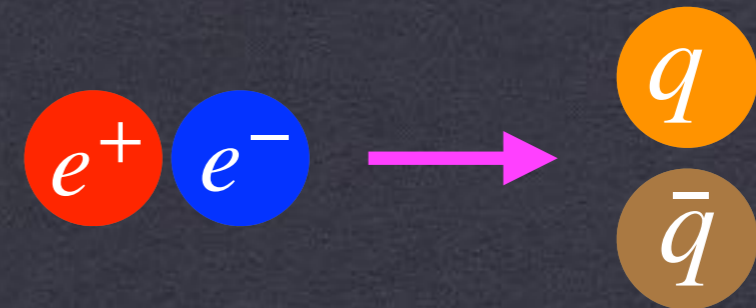


QUARK-BEITRÄGE ZU DEM ANOMALEN MOMENT DES MYONS

Limitieren vollkommen die Vorhersage für $g-2$ des Myons :-)

Können an Elektron-Positron-Beschleunigern vermessen werden :-)

Reaktion $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{Hadronen}$



KLOE/Rom



BABAR/Stanford

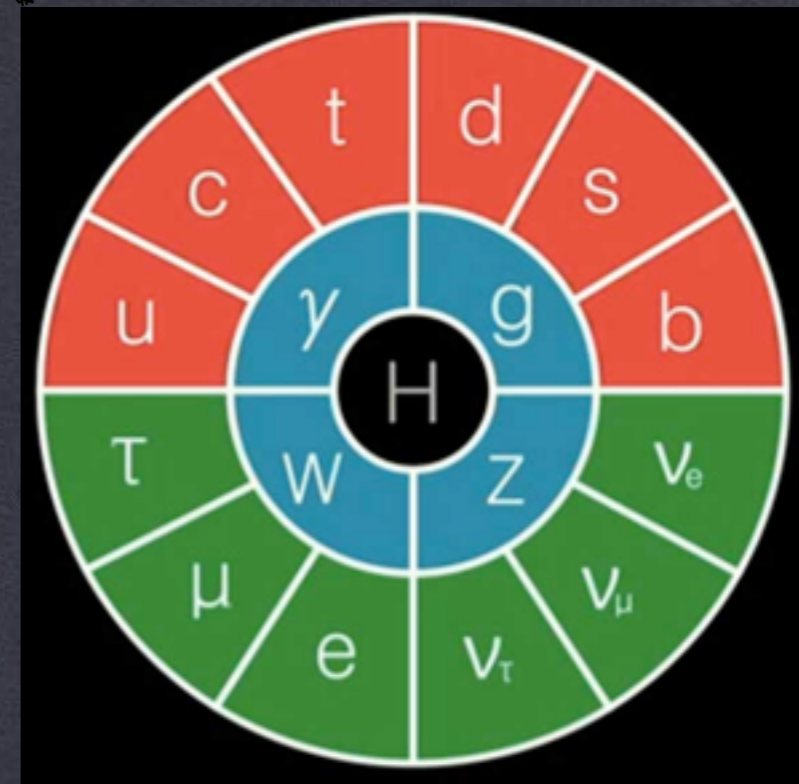


BESIII/Peking

MAGNETISCHES MOMENT MYON IM STANDARDMODELL

Aus dem Katalog der Standardmodell-Teilchen werden alle bekannten Teilchen ausgewählt und der entsprechende Beitrag zu g berechnet (kompliziert, aber machbar)

Quark-
Antiquark



$$g_{SM} = 2,00233183620 \pm 0,0000000000086$$

MAGNETISCHES MOMENT MYON

$$g_{SM} =$$

$$g_{exp} =$$

MAGNETISCHES MOMENT MYON

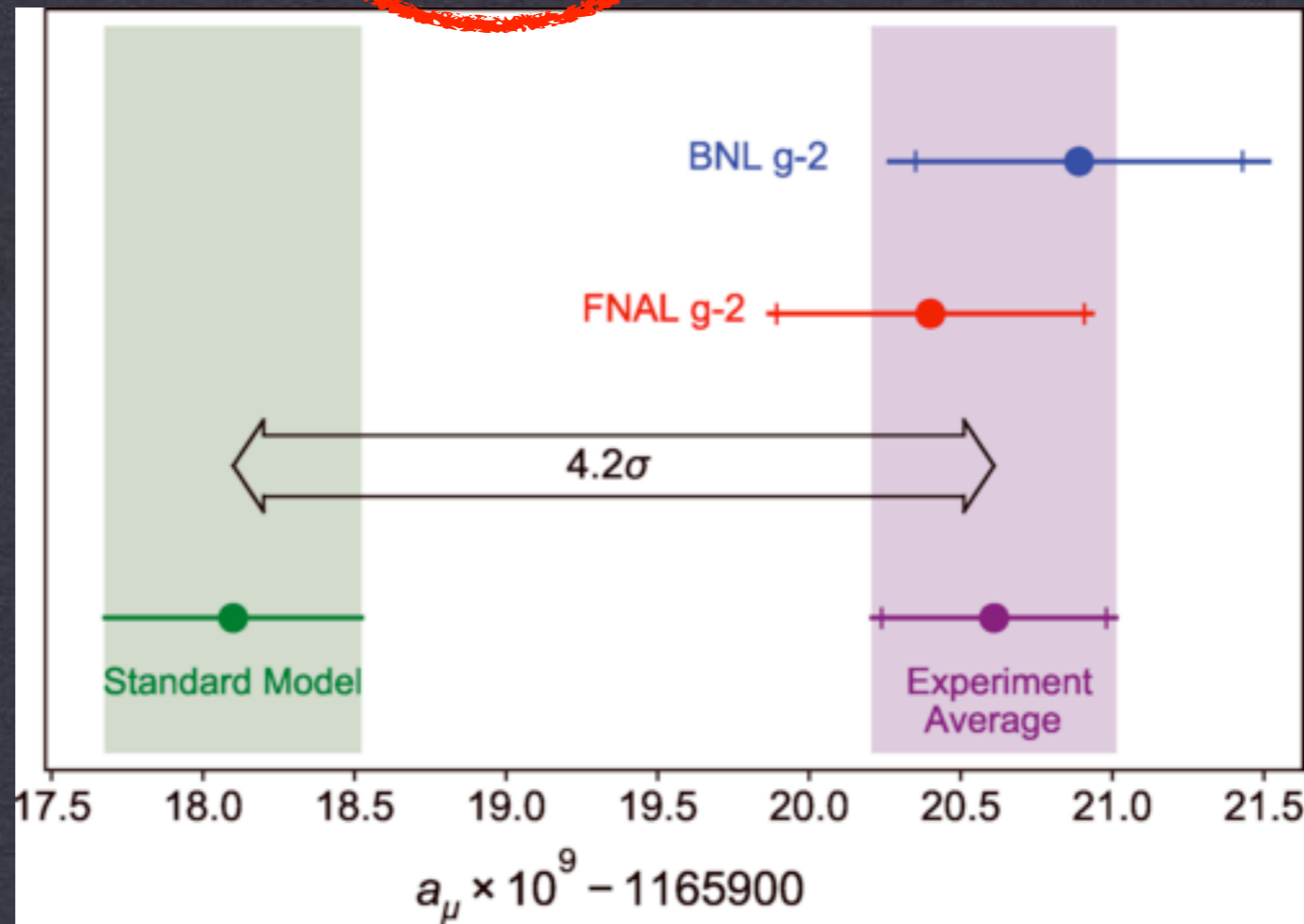
$$g_{SM} = 2,00233183620 \pm 0,00000000086$$

$$g_{exp} = 2,00233184122 \pm 0,00000000082$$

MAGNETISCHES MOMENT MYON

$$g_{\text{SM}} = 2,00233183620 \pm 0,000000000086$$

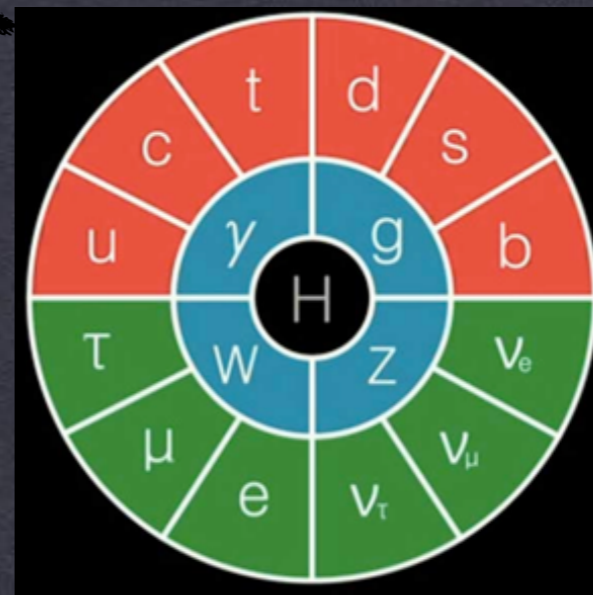
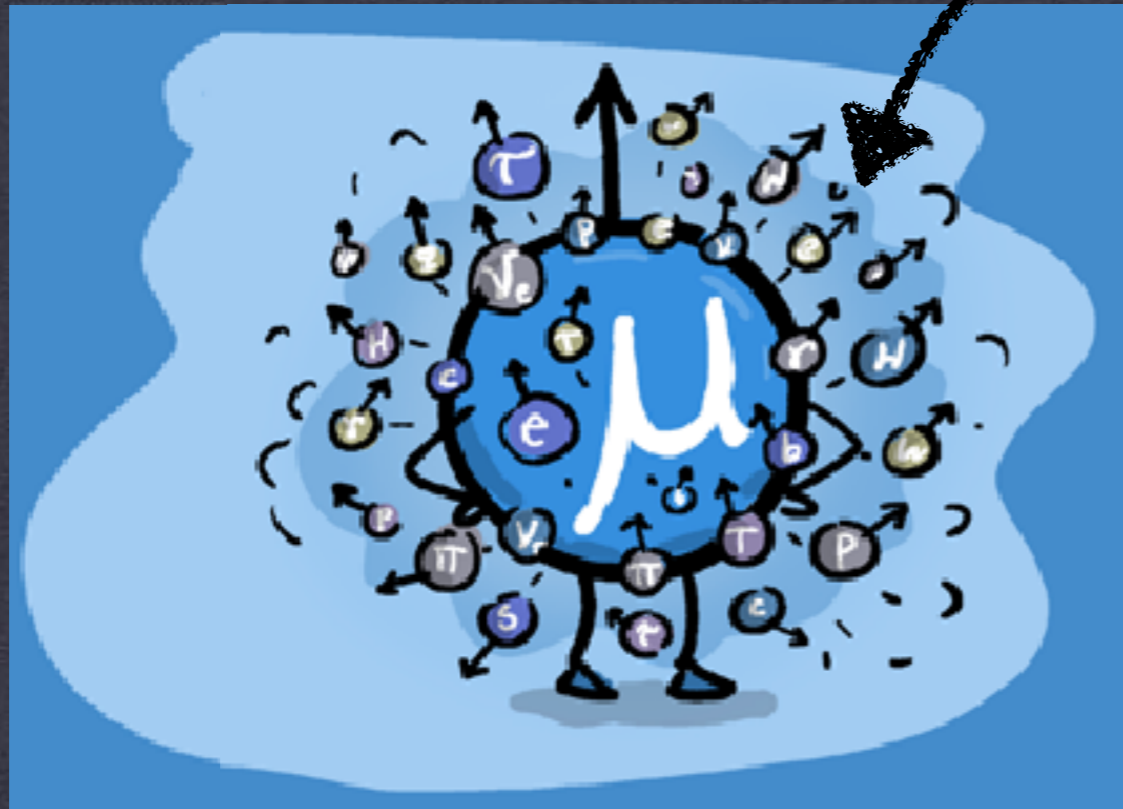
$$g_{\text{exp}} = 2,00233184122 \pm 0,000000000082$$



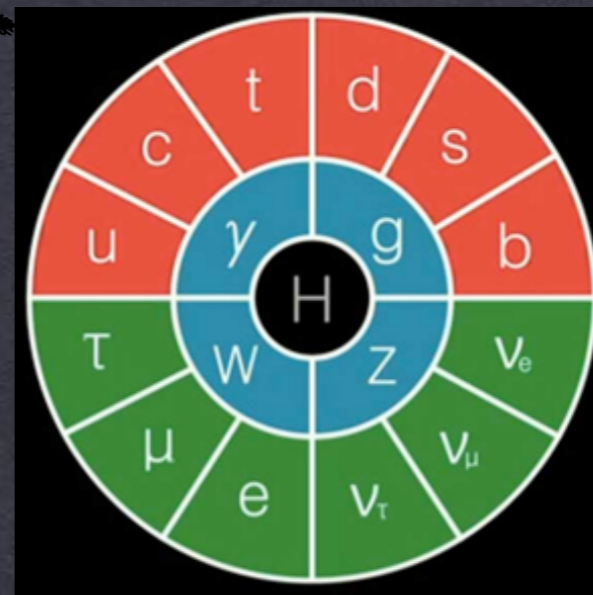
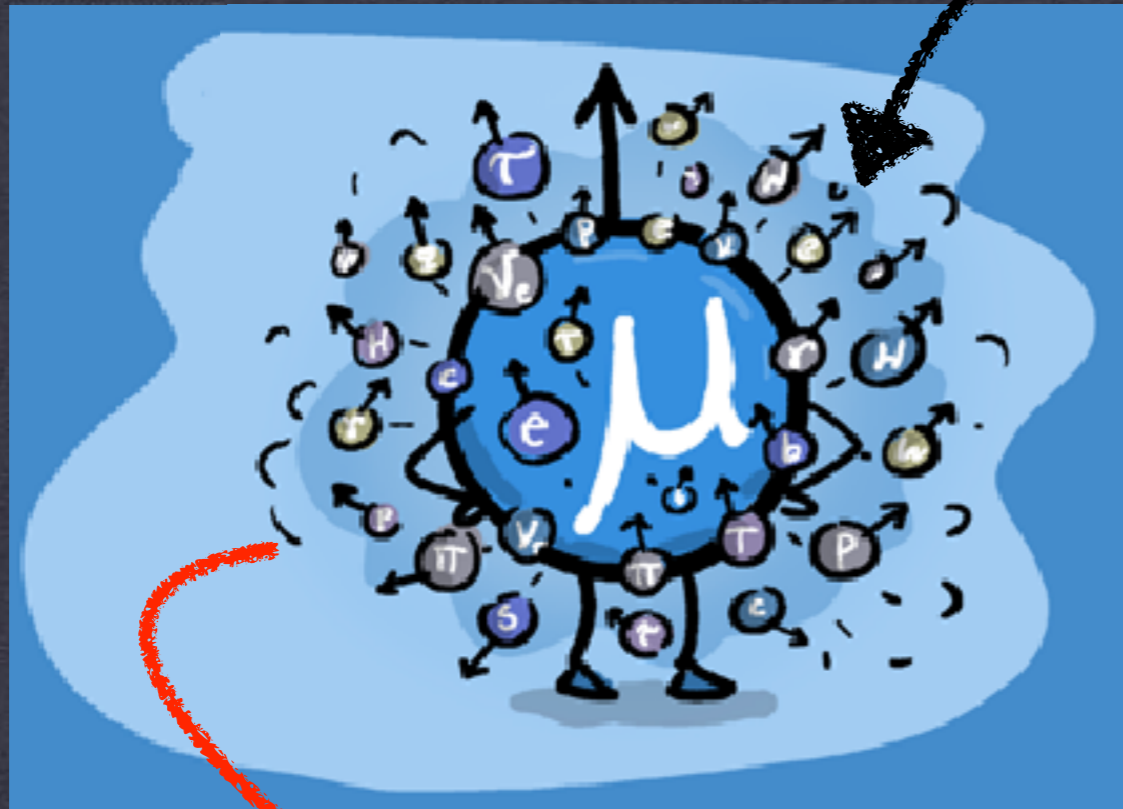
$$g_{\text{exp}} - g_{\text{SM}} / 10^{-11} = 502 \pm 118 (4.2 \sigma)$$

Wahrscheinlichkeit 1: 40 000, dass statistische Fluktuation vorliegt, neue Entdeckung $>5\sigma$

MAGNETISCHES MOMENT MYON WAS IST DA LOS ???



MAGNETISCHES MOMENT MYON WAS IST DA LOS ????



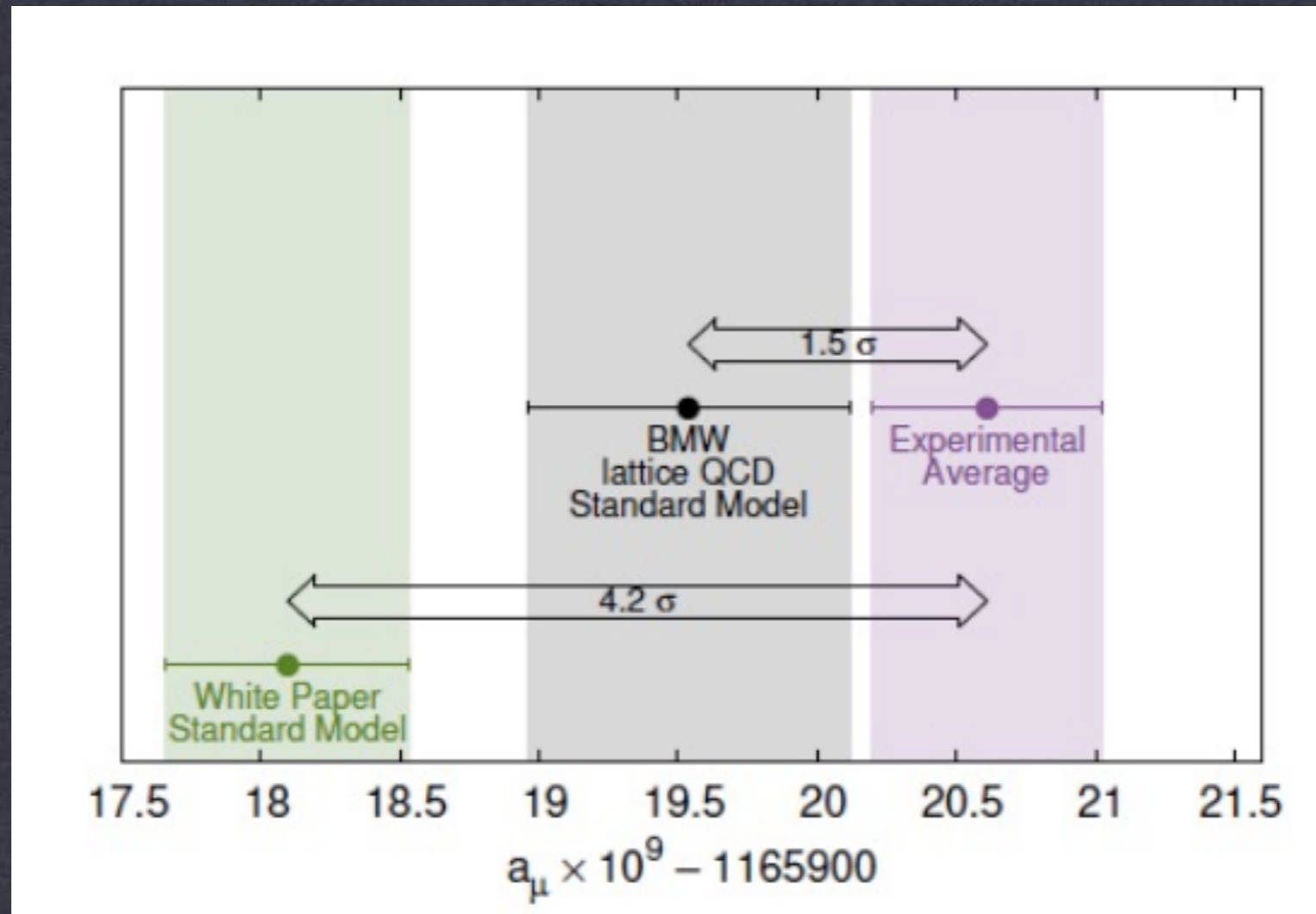
Katalog der Standardmodell-Teilchen
reicht nicht aus zur Erklärung von g_{exp}

**Teilchen jenseits des
Standardmodells ?!!!**

HARVEY MEYER

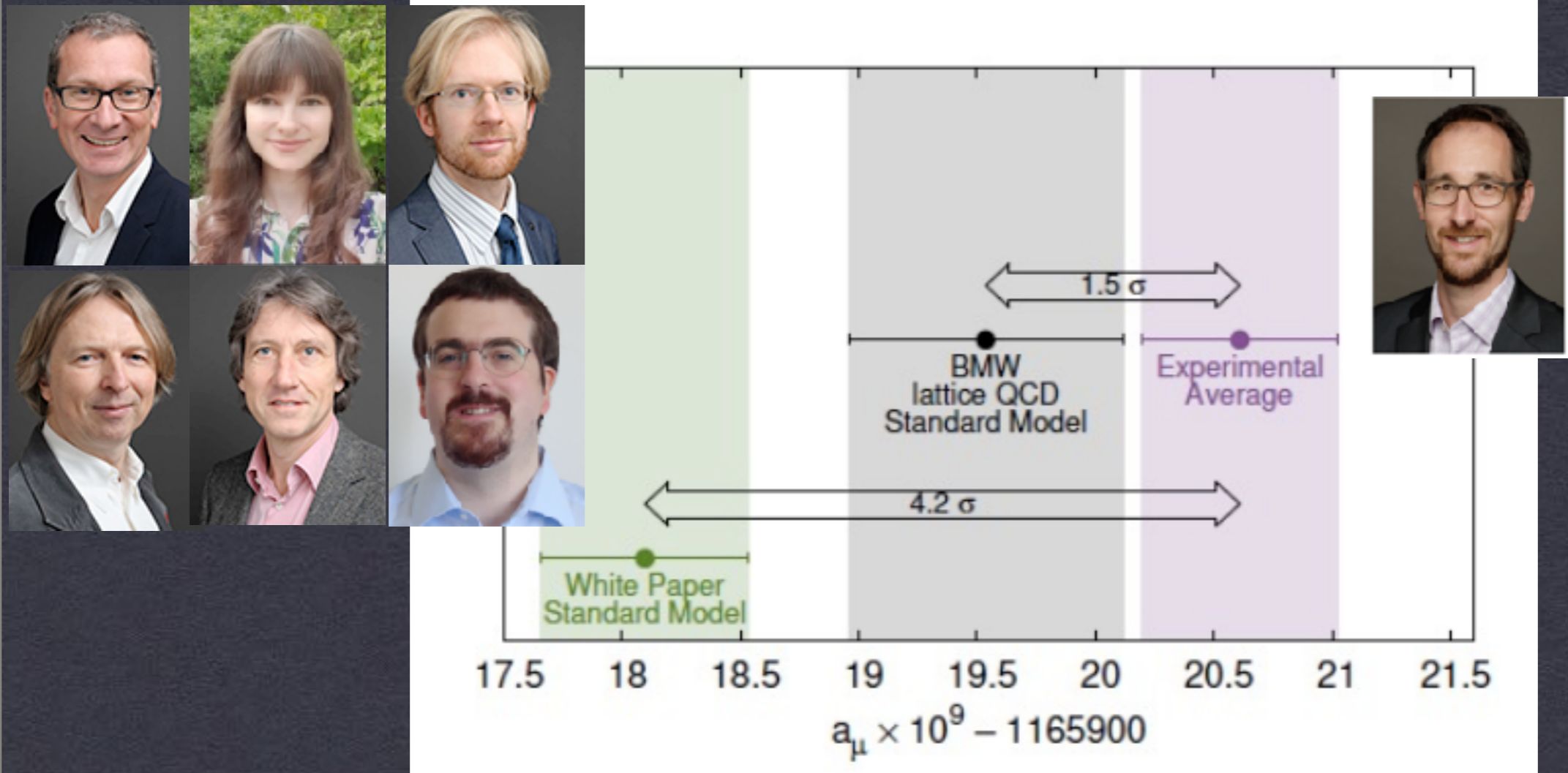
NEUE PHYSIK MIT DEM MYON?

verlangt Verständnis der starken Wechselwirkung
(Quark-Wechselwirkung)



NEUE PHYSIK MIT DEM MYON?

verlangt Verständnis der starken Wechselwirkung
(Quark-Wechselwirkung)



Klärung dieser Frage mit großer Anstrengung in Mainz angegangen
—> neue Daten von g-2-Exp., e+e- Exp, neue theoret. Berechnungen