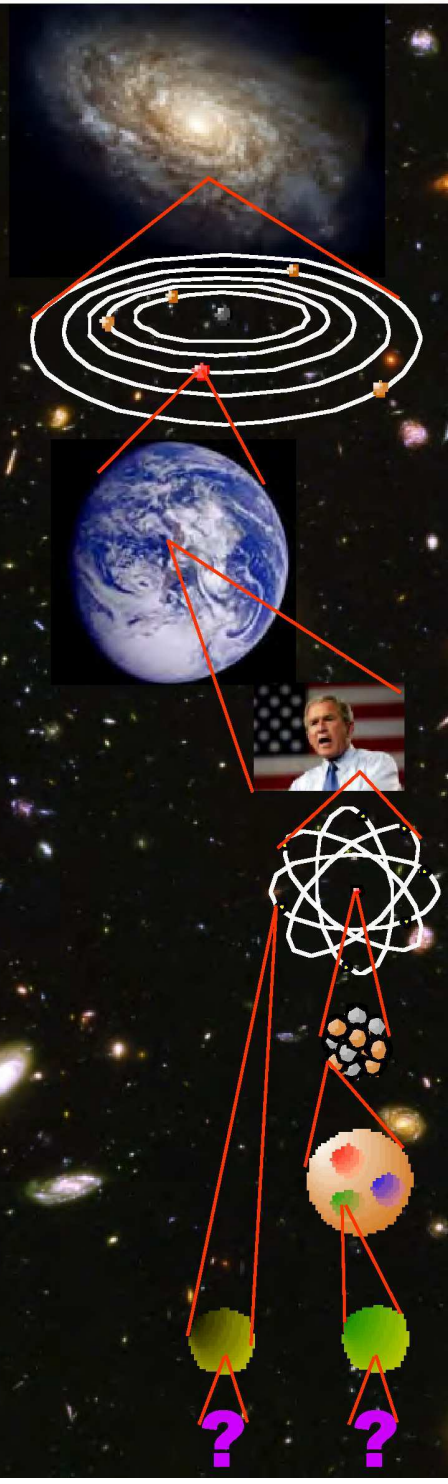
Expedition ins Innerste der Materie und zum Anfang des Universums

DPG Frühjahrstagung Teilchenphysik

München, März 2009

Wolfgang Hollik, Max-Planck-Institut für Physik, München

Dimensionen und Struktur der Materie



Universum	10^{26} m
Galaxie	10^{21} m
Sonnensystem	10^{13} m
Erde	10^{7} m
Mensch	10^{0} m
Atom	10^{-10} m
Atomkern	10^{-14} m
Nukleon	10^{-15} m
Quark; Lepton	$< 10^{-18}$ m
?????	???

Die Welt im Großen

wird beherrscht durch die Gravitation

Newtonsches Gravitationsgesetz

$$F(r) = -G_N \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} + \Lambda\, g_{\mu\nu} = 8\pi G_N\, T_{\mu\nu}$$

Die Welt im Kleinen

führt zur

Physik der Elementarteilchen

erforscht die

- ⋆ innerste Struktur der Materie
- ⋆ Eigenschaften der fundamentalen Kräfte

Ziel: Struktur der Materie bei kleinsten Abständen

Auffinden der grundlegenden Naturgesetze

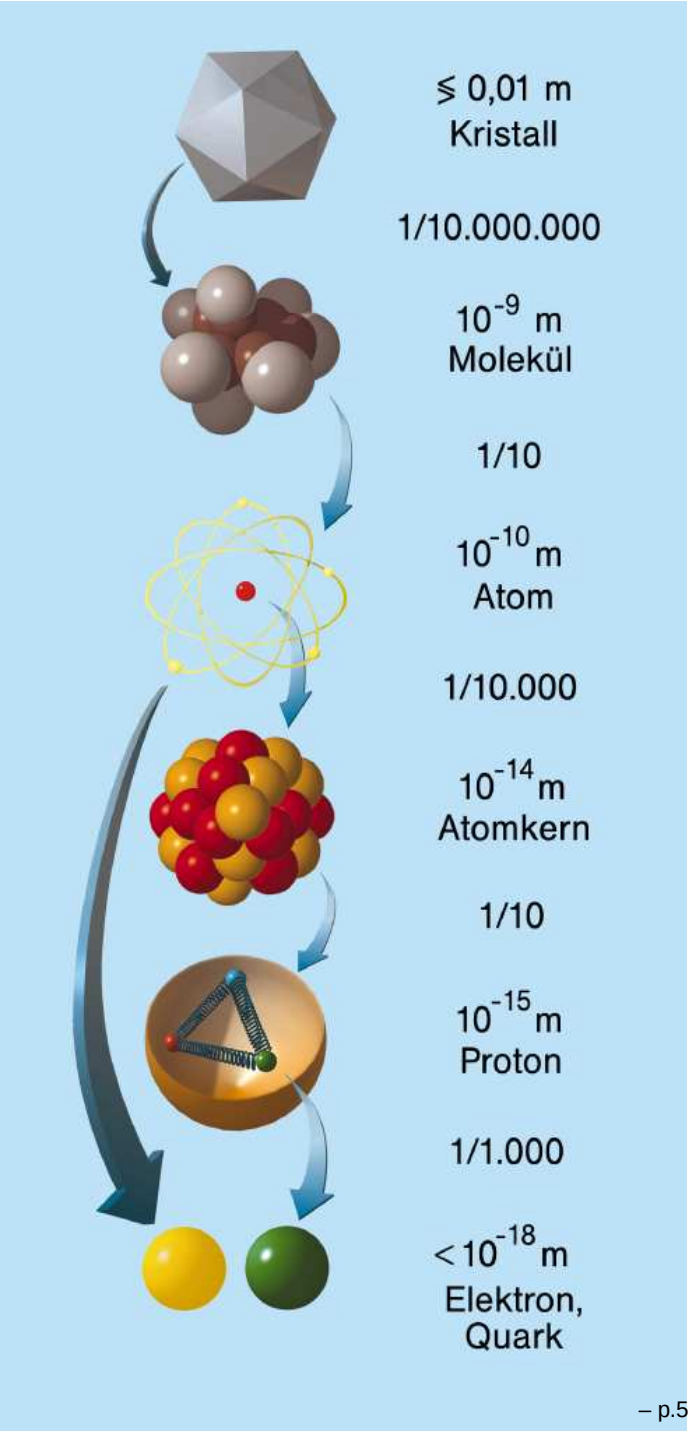
Dalton 1803 - 1808
Lehre von Atomen als
Grundbausteinen der Stoffe

Meyer/Mendelejev 1869-1871
Periodensystem der Elemente
chemische Verbindungen → Atome

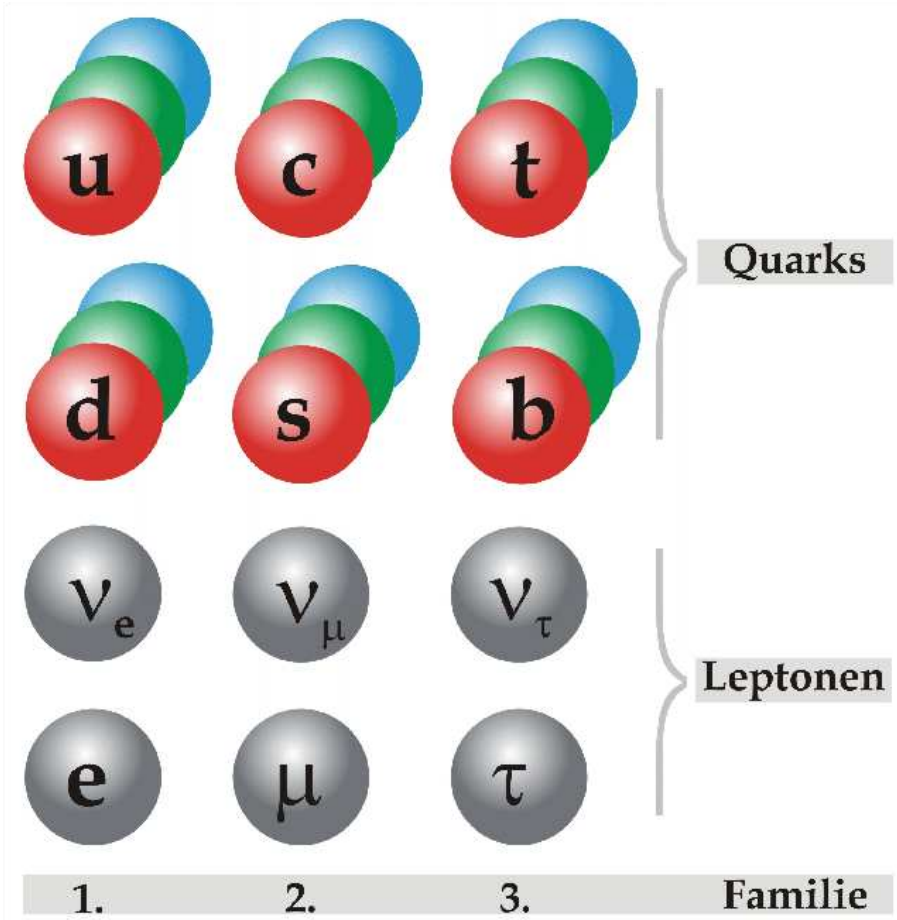
Rutherford (1871 - 1937)
Atome: Kern mit Elektronenhülle

Bothe, Chadwick, Joliot ca. 1932
Neutronen und Protonen im Kern
Kerne → 2 Bausteine

Gell-Mann, Zweig 1964
Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks



Grundbausteine der Materie

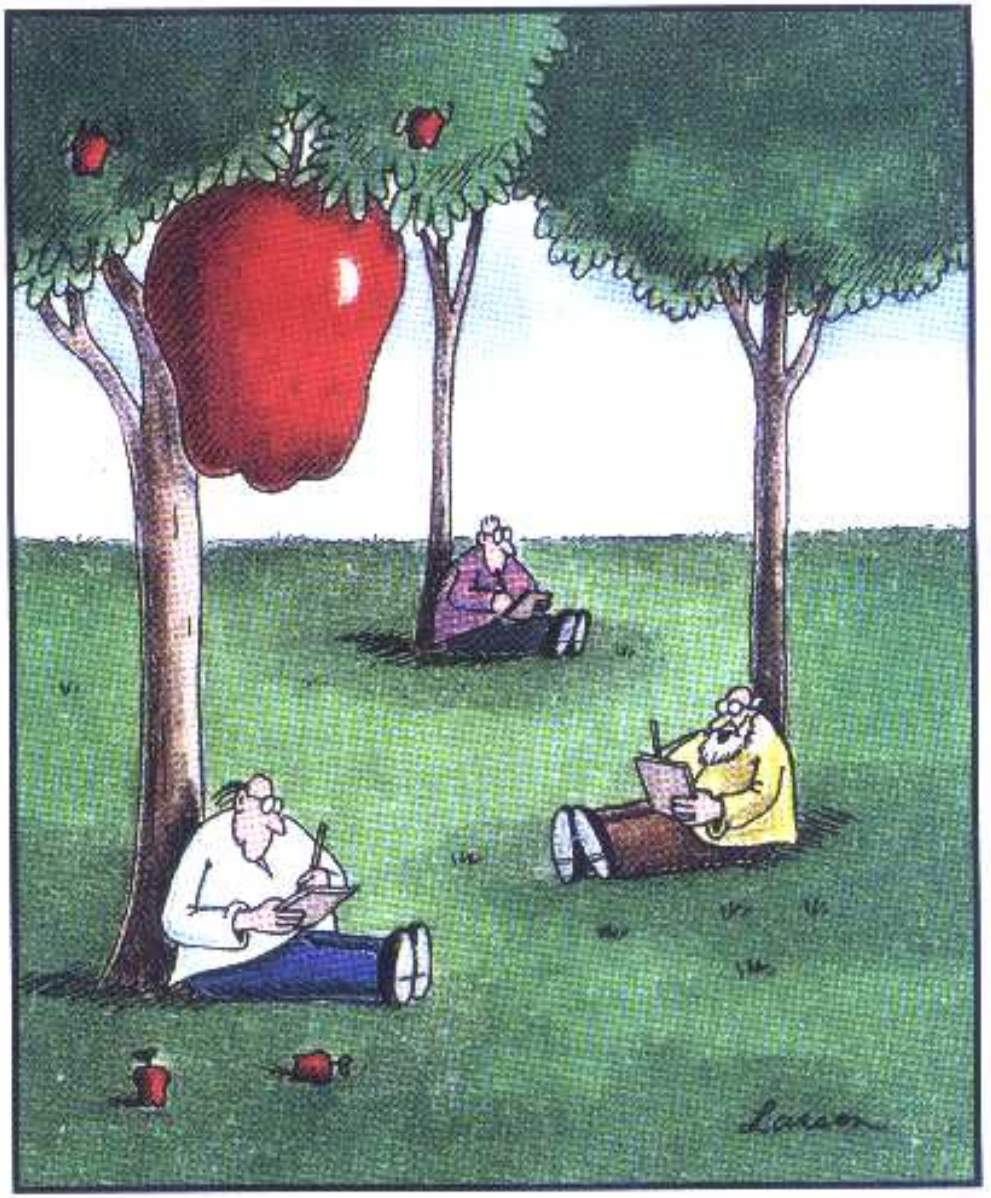


empirische Vielfalt der Kräfte

$\longrightarrow$ **4 fundamentale Wechselwirkungen**

- starke Wechselwirkung (Kernkraft)
- elektromagnetische Wechselwirkung (Licht)
- schwache Wechselwirkung (β-Zerfall)
- Gravitations-Wechselwirkung (Schwerkraft)

17. Jahrhundert: Schwerkraft



"Nothing yet. ... How about you, Newton?"

19. Jahrhundert

elektrische Kraft $+$ magnetische Kraft

$\longrightarrow$ Theorie des Elektromagnetismus (Maxwell)

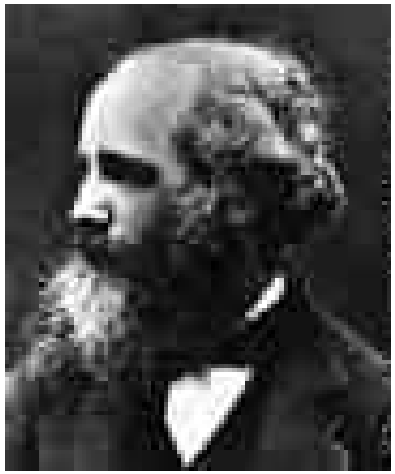
ELEKTRODYNAMIK

- $\star$ elektromagnetische Wellen als Vorhersage
- $\star$ experimenteller Nachweis (H. Hertz)
- $\star$ Licht als elektromagnetische Welle

$\longrightarrow$ Elektromagnetismus

$\longrightarrow$ elektromagnetische Wellen

J. C. Maxwell

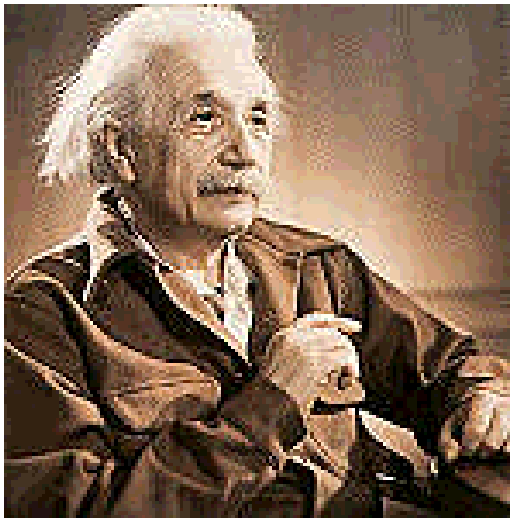


$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu$$

$$\partial_\mu \tilde{F}^{\mu\nu} = 0$$

$\longrightarrow$ Relativitätstheorie

Äquivalenz von Masse und Energie



A. Einstein

$$E = m\,c^2$$

1 GeV (Giga-Elektronenvolt)	$\simeq$ Masse eines Protons
1 MeV (Mega-Elektronenvolt)	1 GeV / 1000
1 TeV (Tera-Elektronenvolt)	1 GeV $\cdot$ 1000

Teilchen $\longleftrightarrow$ **Anti-Teilchen**

Masse m Masse m

Ladung Q Ladung $-Q$

P. A. M. Dirac

20. Jahrhundert: Quantentheorie

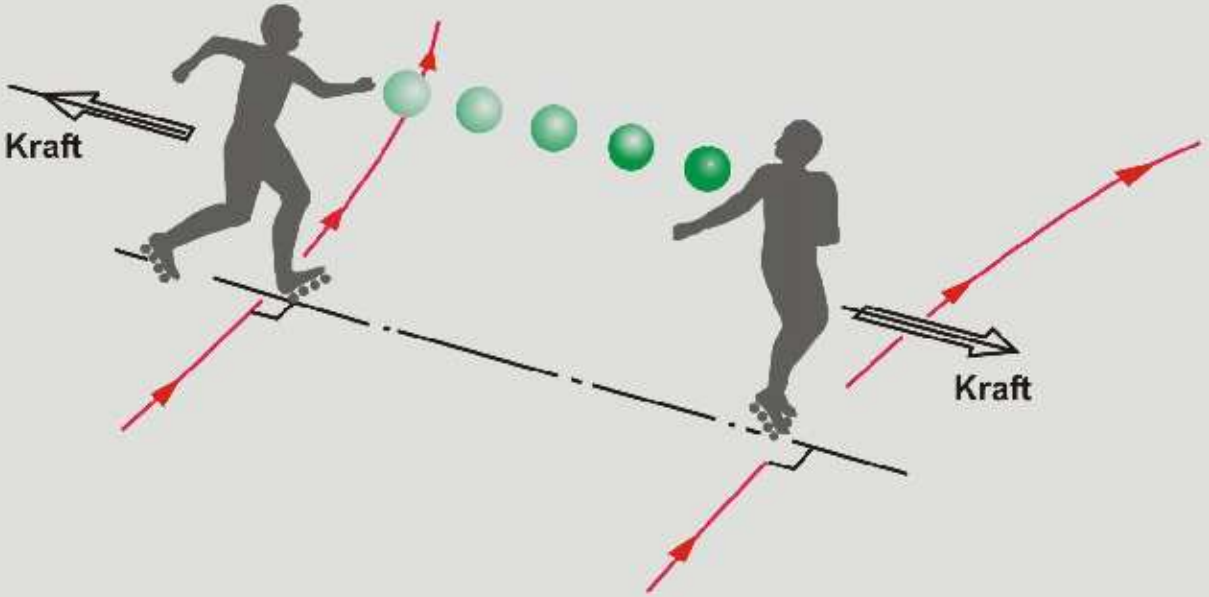
Kräfte zwischen Teilchen (Kraft-Felder)

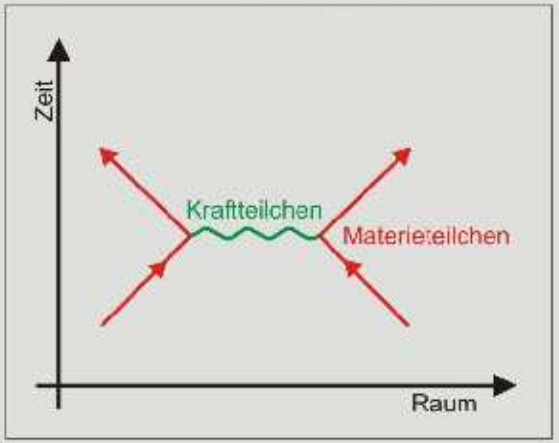
werden vermittelt durch

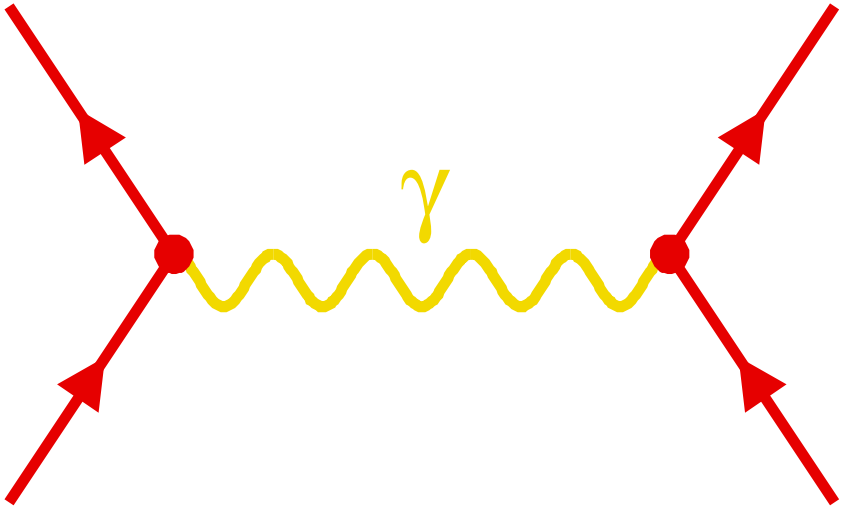
Feld-Quanten ("Bosonen")

Kräfte – Ursache allen Geschehens

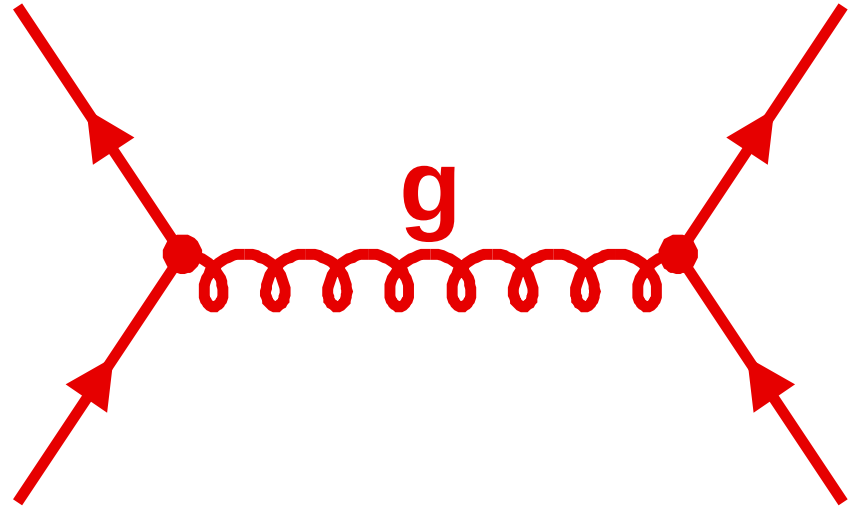
Zwei Körper üben eine Kraft aufeinander aus, indem sie Energie und Impuls austauschen.
Im Mikrokosmos wird der Austausch durch **„Kraftteilchen"** vermittelt.



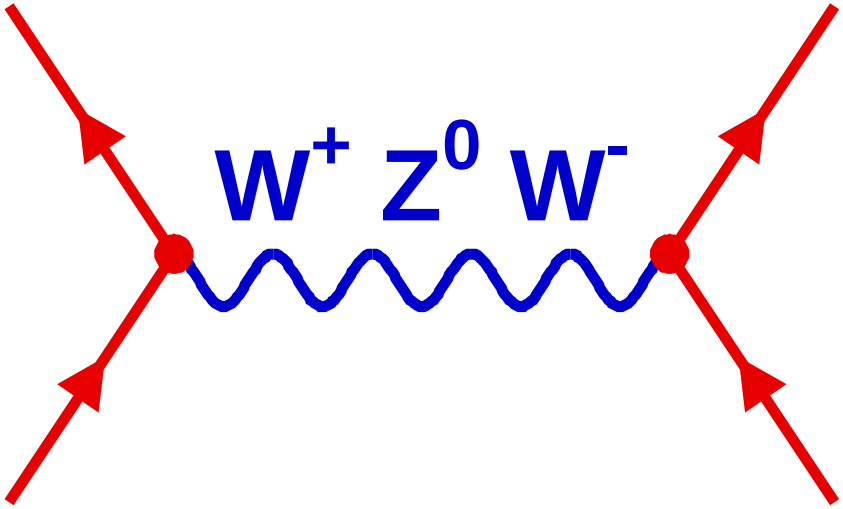




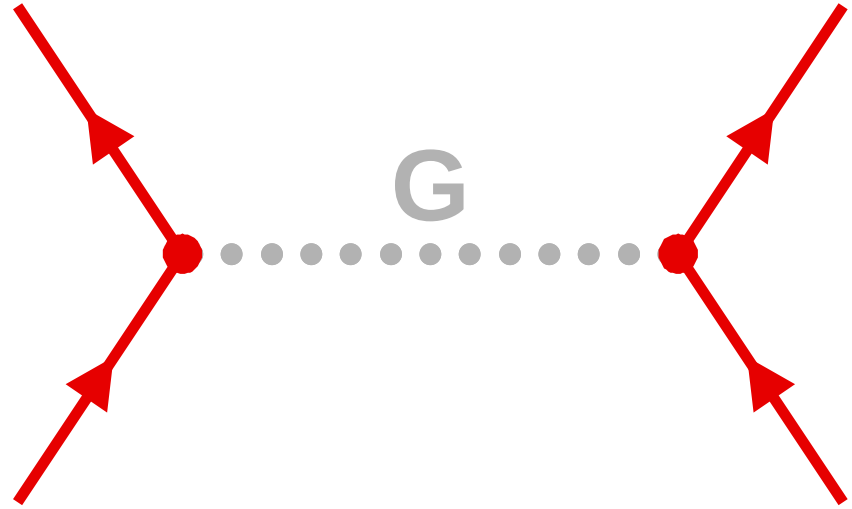
elektromagn. Kraft



starke Kraft



schwache Kraft



Gravitation

1960 - 1980:

Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung

Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung

- ⋆ Vorhersage der W und Z Bosonen
- ⋆ experimenteller Nachweis 1983 bei CERN

Nobelpreis Physik 1979

Glashow

Salam

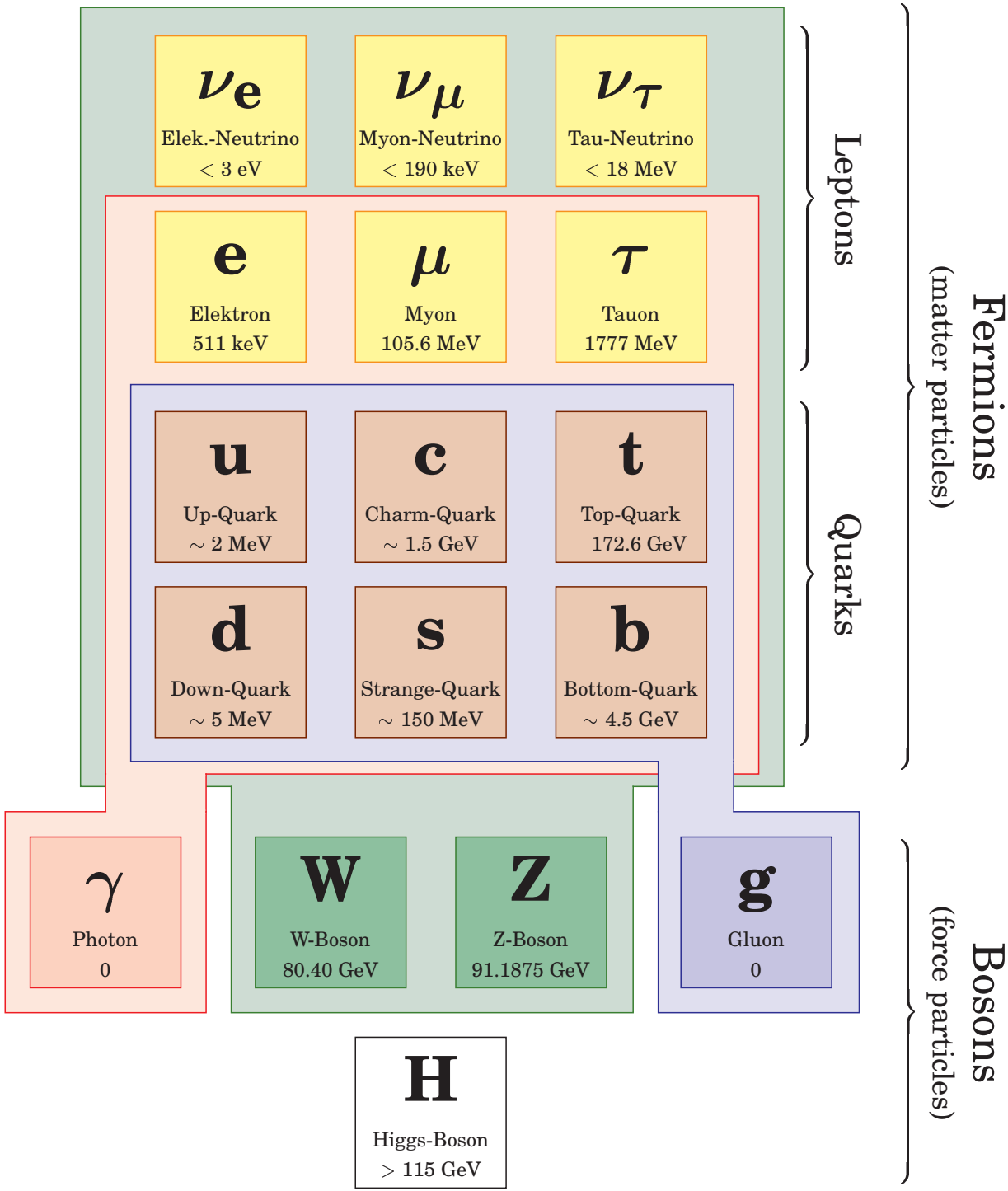
Weinberg

elektroschwache Theorie

$+$ Theorie der starken Wechselwirkung:

Standardmodell der Teilchenphysik

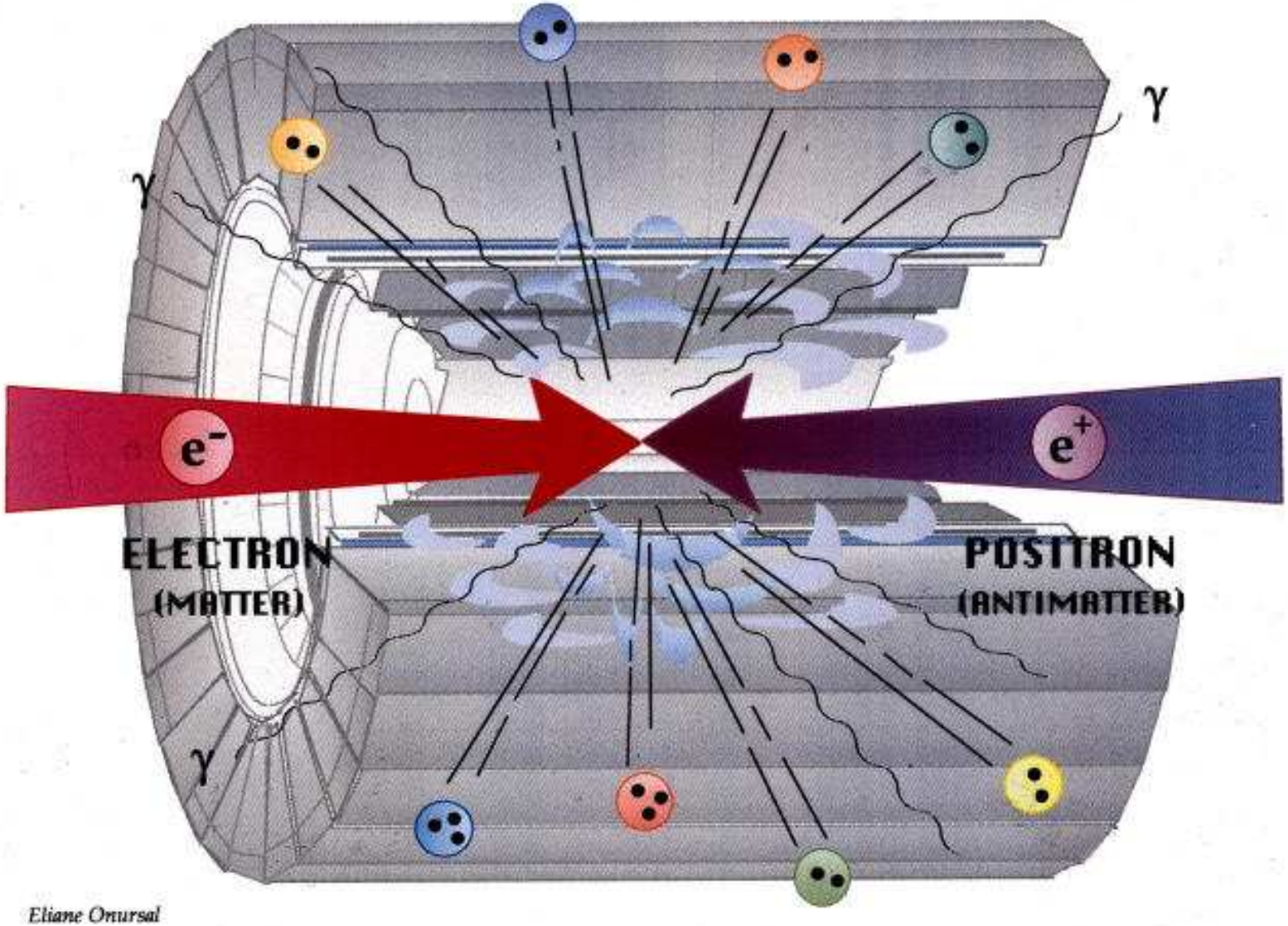
Fundamentale Konstituenten:	Leptonen und Quarks
Fundamentale Kräfte:	Austauschteilchen


ν_e
Elek.-Neutrino
< 3 eV
ν_μ
Myon-Neutrino
< 190 keV
ν_τ
Tau-Neutrino
< 18 MeV
e
Elektron
511 keV
μ
Myon
105.6 MeV
τ
Tauon
1777 MeV
u
Up-Quark
~ 2 MeV
c
Charm-Quark
~ 1.5 GeV
t
Top-Quark
172.6 GeV
d
Down-Quark
~ 5 MeV
s
Strange-Quark
~ 150 MeV
b
Bottom-Quark
~ 4.5 GeV
γ
Photon
0
W
W-Boson
80.40 GeV
Z
Z-Boson
91.1875 GeV
g
Gluon
0
H
Higgs-Boson
> 115 GeV
Leptons
Quarks
Fermions
(matter particles)
Bosons
(force particles)

Experimentelle Tests

Theorie	Experiment
Vorhersagen von Prozessen	Beschleuniger
• welche Teilchen?	
• wie häufig?	Detektoren
• in welcher Richtung?	
...	Nachweis der Teilchen

Untersuchungen bei kleinen Distanzen erfordern hohe Energien



Eliane Onursal

LEP, Genf

Elektron	$\rightarrow\leftarrow$	Positron
103 GeV	$\rightarrow\leftarrow$	103 GeV

HERA, Hamburg

Elektron	$\rightarrow\leftarrow$	Proton (Quarks)
30 GeV	$\rightarrow\leftarrow$	920 GeV

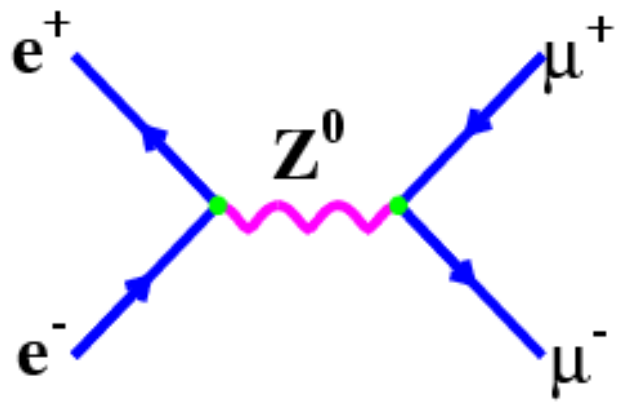
Tevatron, Chicago

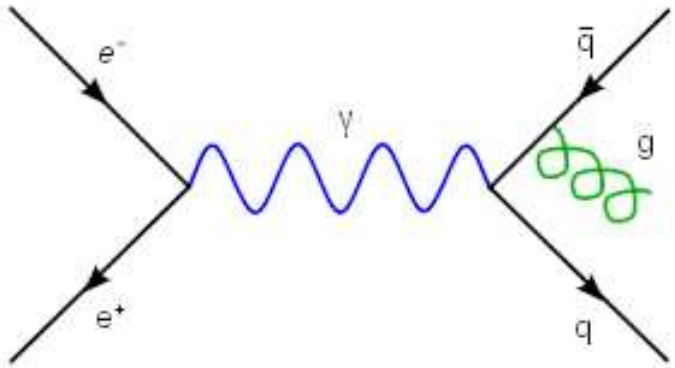
Proton (Quarks)	$\rightarrow\leftarrow$	Anti-Proton (Anti-Quarks)
1000 GeV	$\rightarrow\leftarrow$	1000 GeV

LEP bei CERN, Genf

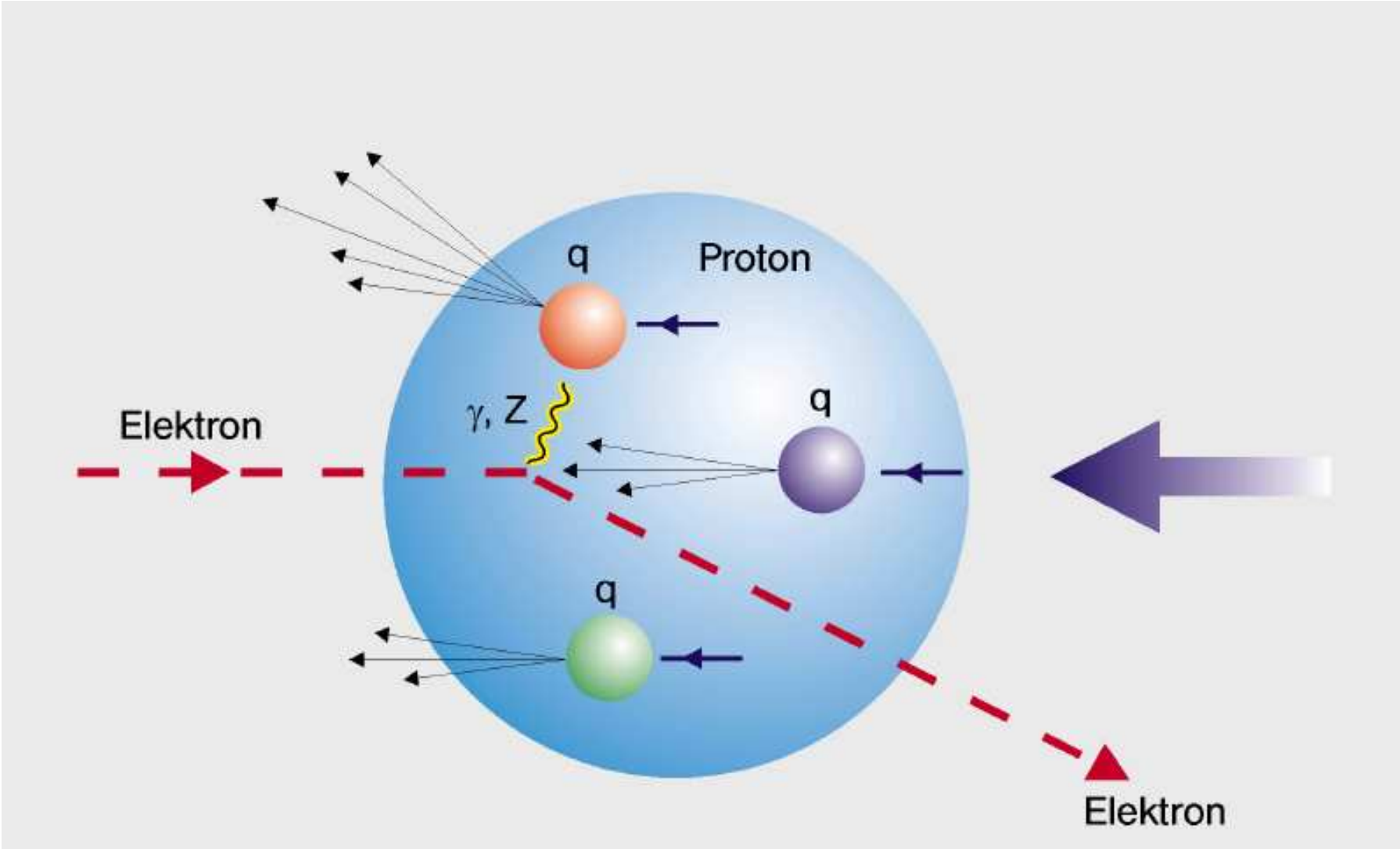
Elektron – Positron

Elektron-Positron-Kollisionen

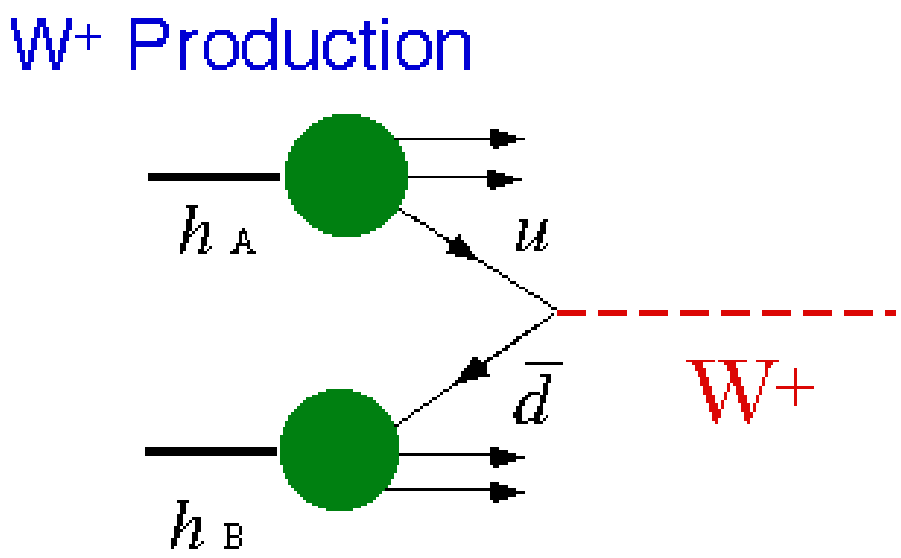


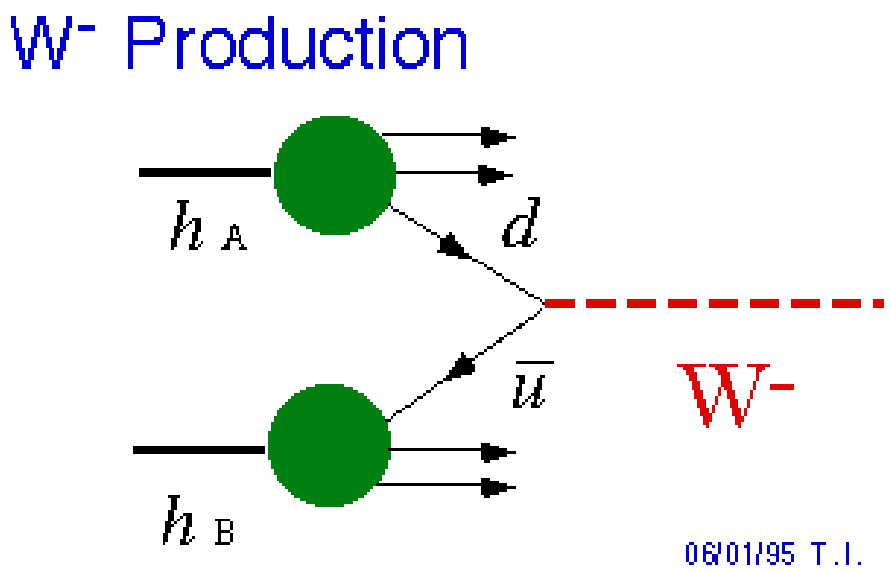


Elektron-Proton-Kollisionen



Proton-Antiproton-Kollisionen





offene Fragen

- Woher? Massen der Teilchen
- Warum? 3 Familien
- Wohin? Weitere Vereinheitlichung der Kräfte

• Woher kommen die Massen der Teilchen?

Antwort des Standardmodells:

Teilchen mit Masse haben eine Wechselwirkung mit einem zusätzlichen "Higgs-Feld"

ist auch vorhanden im leeren Raum
d.h. das Vakuum ist nicht leer ($\rightarrow$ dunkle Energie?)

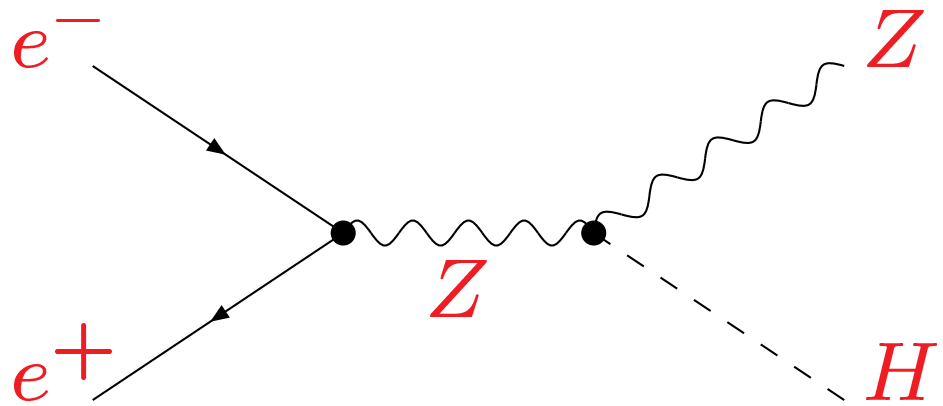
Teilchen haben eine spezielle Ladung, mit der sie vom Vakuum angezogen werden $\rightarrow$ Trägheit (= Masse)

Signal dieses Mechanismus:

- ⋆ Existenz eines "Higgs-Teilchens"
- ⋆ im Experiment überprüfbar
- ⋆ Masse > 115 GeV (LEP-Experimente)
- ⋆ Masse < 200 GeV wenn Standardmodell korrekt

$\rightarrow$ große experimentelle Herausforderung

Erzeugung von Higgs-Bosonen in der Elektron-Positron-Vernichtung



$$E_{\max} = 206 \text{ GeV}, \qquad M_Z = 91 \text{ GeV}$$

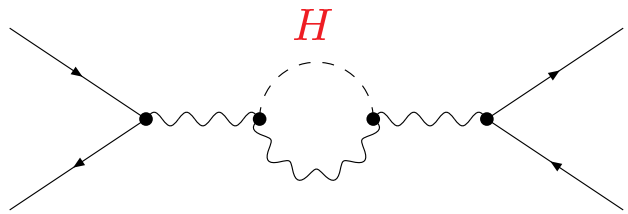
$$206 \text{ GeV} - 91 \text{ GeV} = 115 \text{ GeV}$$

nur möglich für Higgs-Masse kleiner als 115 GeV

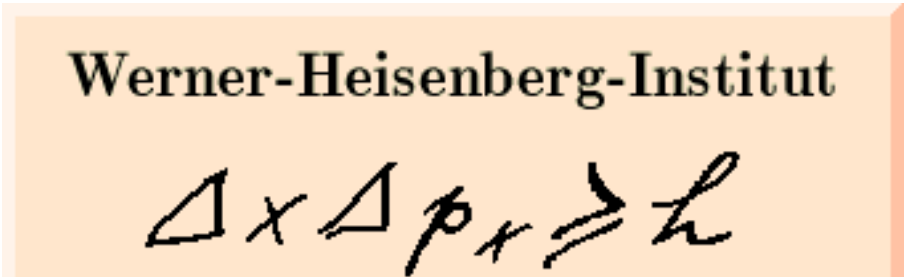
Quantenfluktuationen

Reaktionen bei hohen Energien

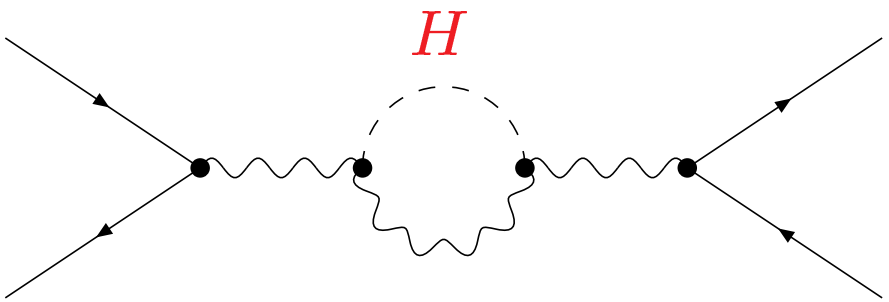
$\longrightarrow$ kleine Abstände, kurze Reaktionszeiten



$$\Delta x \cdot \Delta p \sim h, \qquad \Delta t \cdot \Delta E \sim h$$

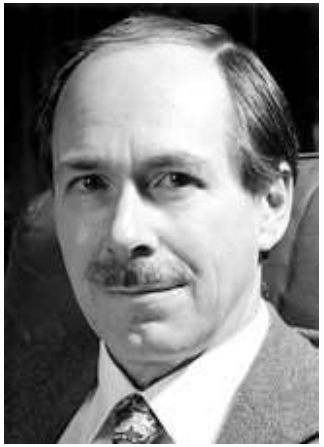


Quantenfluktuationen

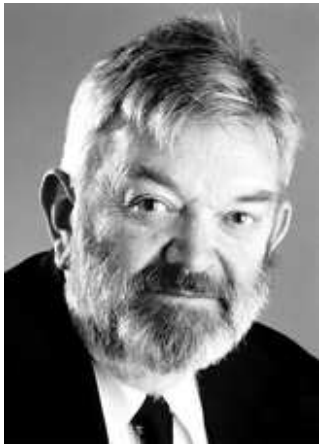


$\longrightarrow$ Sensitivität von Messgrößen auf die Higgs-Masse

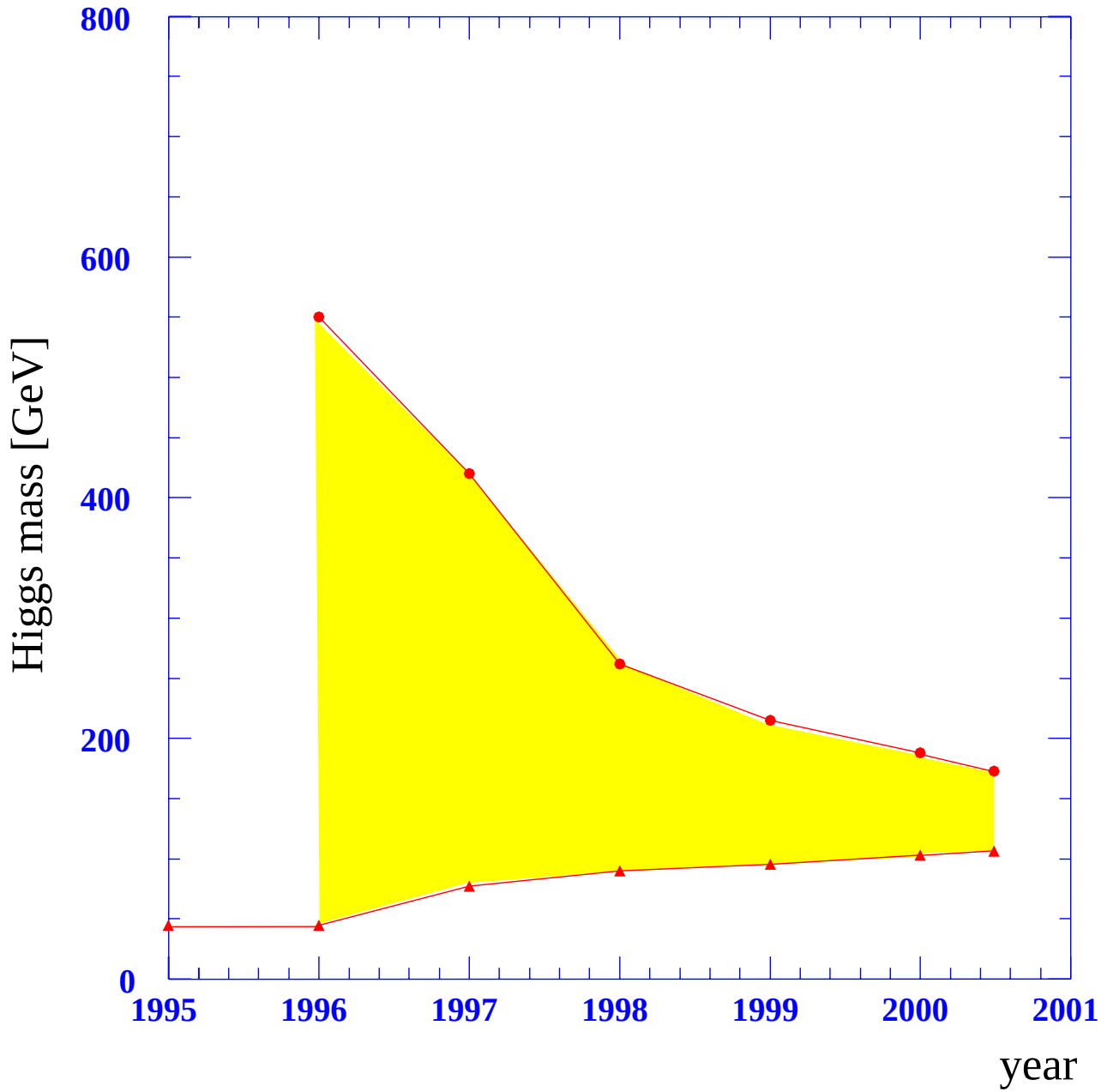
Nobelpreis Physik 1999



’t Hooft

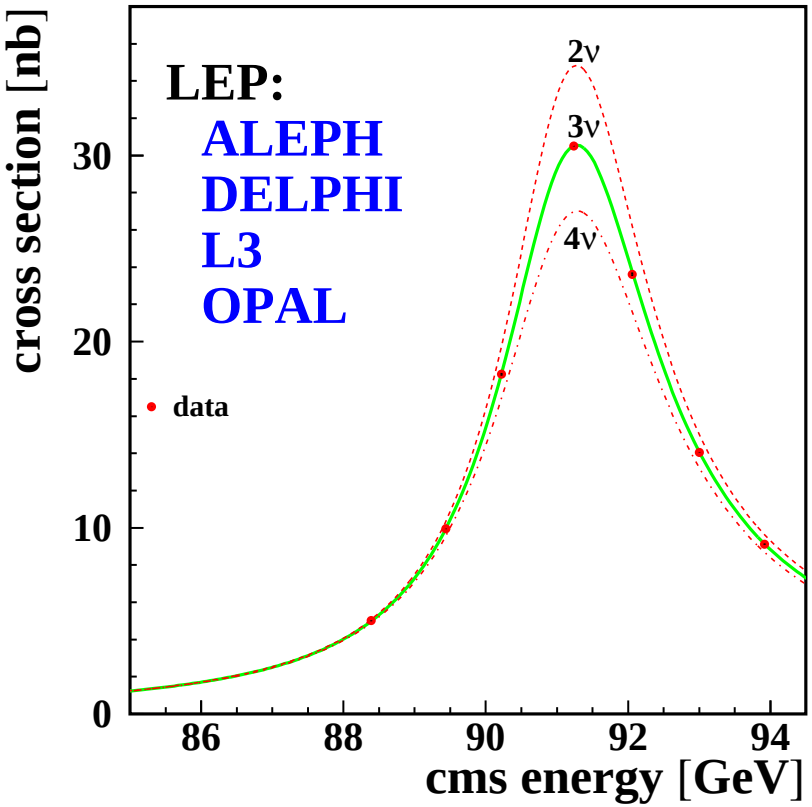


Veltman


800
600
400
200
0
Higgs mass [GeV]
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
year

• Warum 3 Familien?

LEP: Anzahl der Familien = 3



gemessen: $e^+e^- \longrightarrow Z^0 \longrightarrow \ell^+\ell^-,\ q\bar{q}$

3 Familien erlauben Verletzung der CP-Symmetrie

CP: Teilchen $\rightarrow$ Antiteilchen und Spiegelung

Nobelpreis Physik 2008

Kobayashi

Maskawa

Nambu

- CP-Symmetrie ist gebrochen durch die schwache Wechselwirkung (experimentell beobachtet)
- notwendig für die Entwicklung des Universums
  Materie > Antimaterie
- Baryon-Asymmetrie des Universums
  Teilchen : Antiteilchen = 1 000 000 001 : 1 000 000 000
  im sehr frühen Universum
- Stärke der CP-Verletzung im Standardmodell nicht ausreichend für die Baryon-Asymmetrie

• Gibt es eine gemeinsame Urkraft?

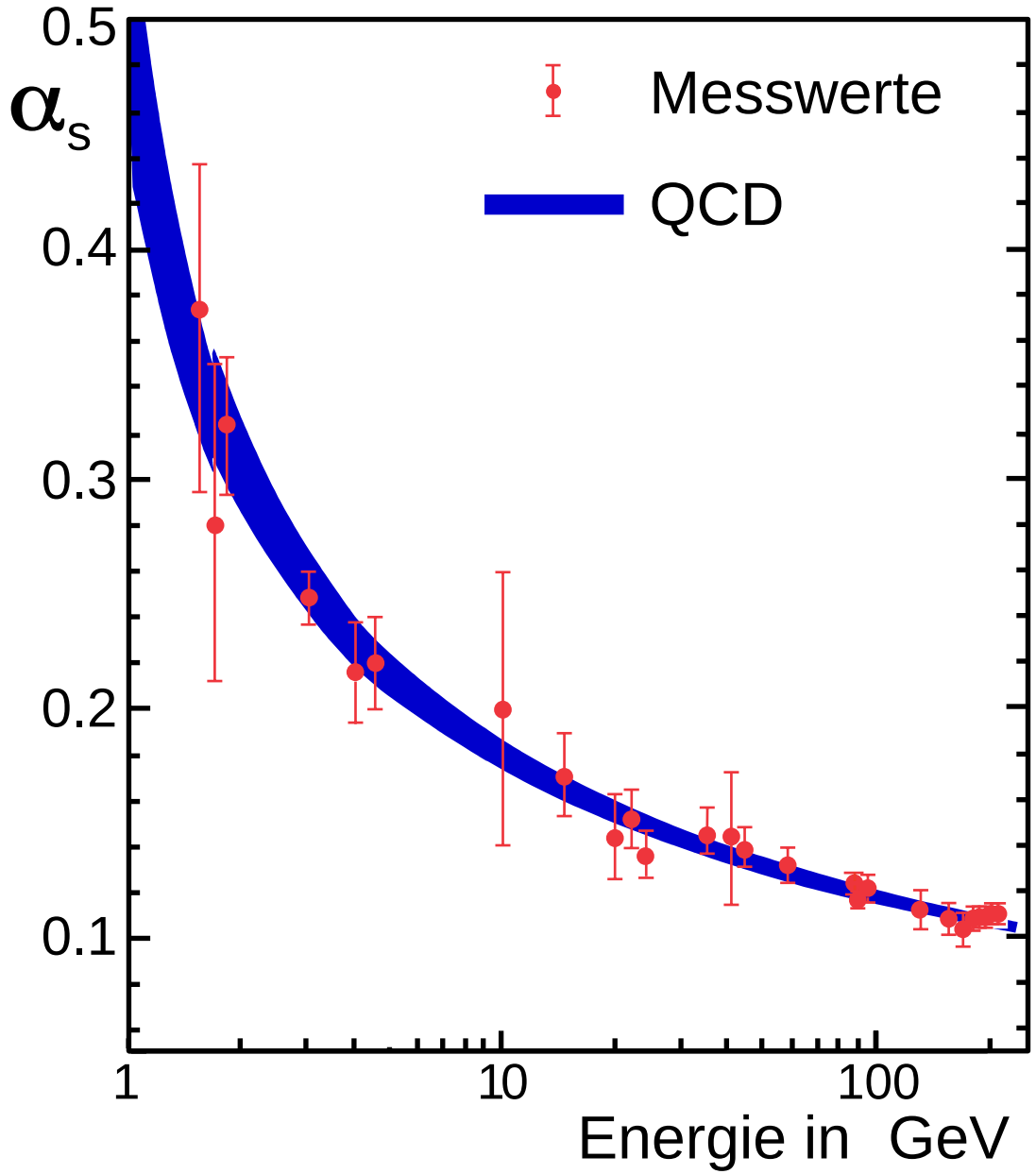
weitere Vereinigung der fundamentalen Kräfte
$\rightarrow$ GROSSE VEREINHEITLICHTE THEORIE
(Grand Unified Theory, GUT)

$$\boxed{\text{elektroschwach} + \text{stark}}$$

Fernziel:
Universalvereinigung aller Kräfte einschließlich der Gravitation

$\star$ Hinweis für GUT: Stärke der Wechselwirkungen ändern sich mit der Energie

Beispiel: Starke Wechselwirkung



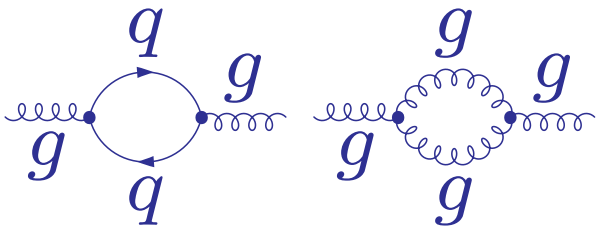
Nobelpreis Physik 2004: Asymptotische Freiheit

David Gross

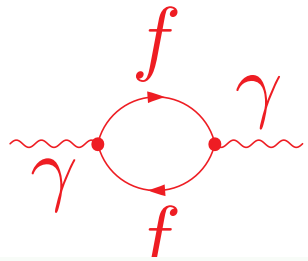
David Politzer

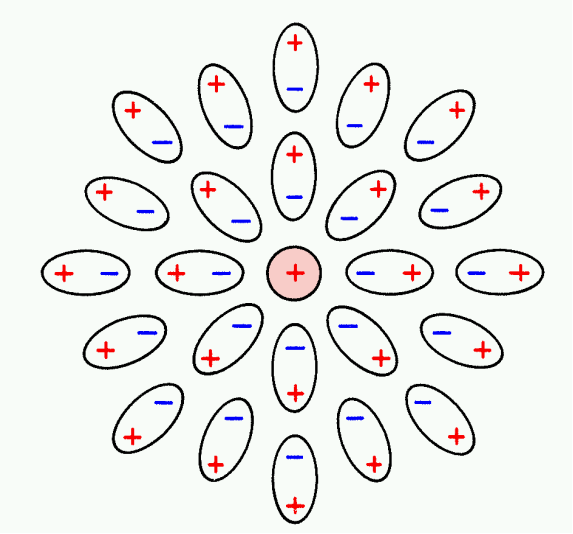
Frank Wilczek

- QCD



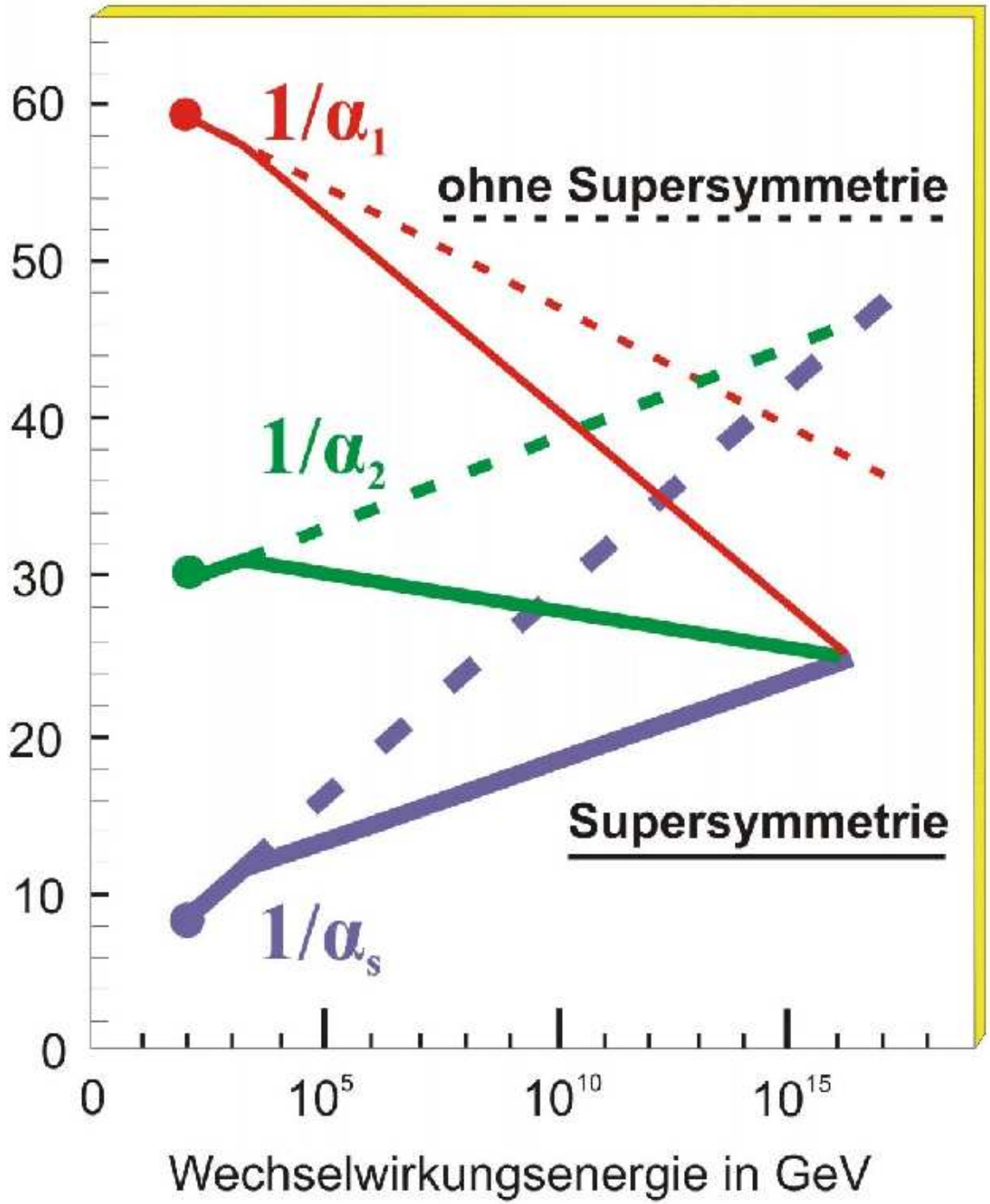
- QED





Ladung abgeschirmt durch virtuelle e^+e^- Paare

$\longrightarrow$ **em Ladung wächst mit zunehmender Energie**


60
50
40
30
20
10
0
$1/\alpha_1$
ohne Supersymmetrie
$1/\alpha_2$
Supersymmetrie
$1/\alpha_s$
0
10^5
10^{10}
10^{15}
Wechselwirkungsenergie in GeV

jedoch:

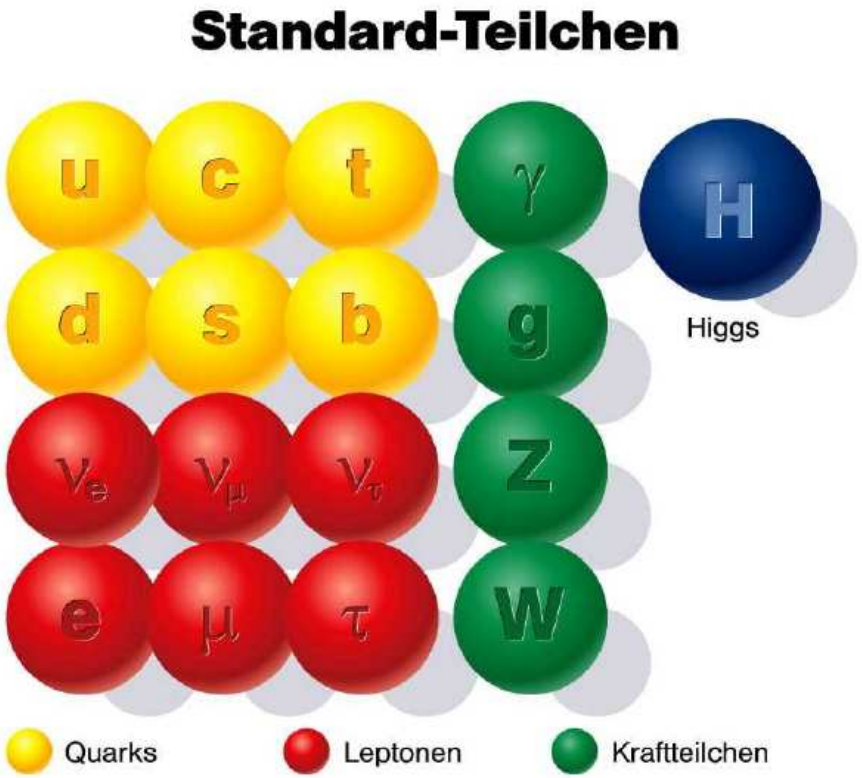
bei Extrapolation zu hohen Energien $\longrightarrow$
• **kein** gemeinsamer Schnittpunkt

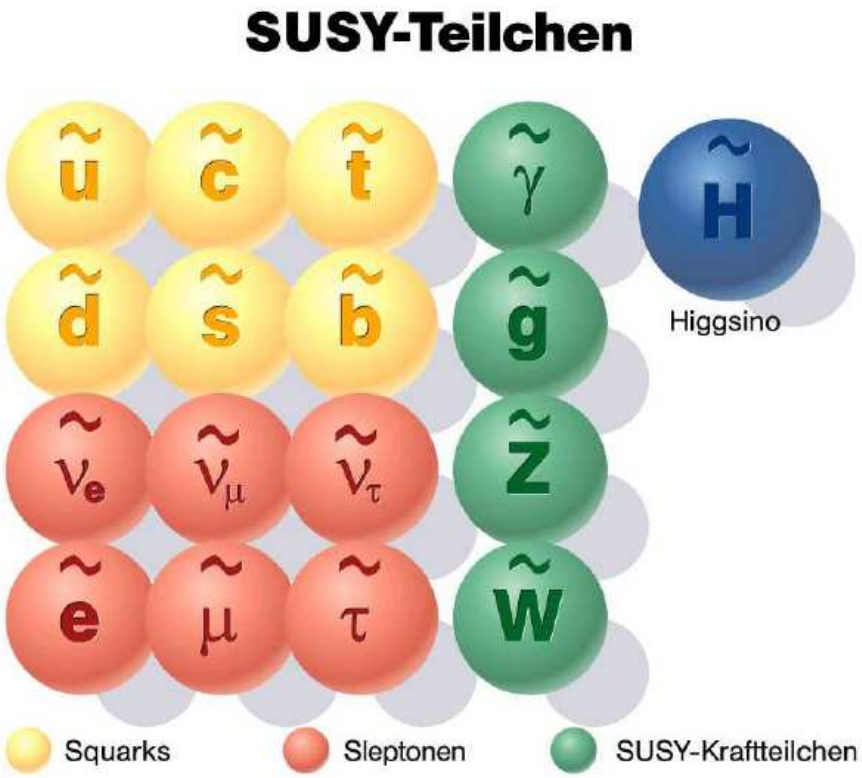
neue Idee: **Supersymmetrie**

SUSY = eine Symmetrie zwischen Fermionen
und Bosonen

jedes bekannte Teilchen hat ein supersymmetrisches Partnerteilchen

- gleiche Ladung
- Spin um jeweils 1/2 verschieden
- große Masse





leichtestes SUSY Teilchen: **Dunkle Materie** (?)

beobachtet
berechnet
Rotations-
geschwindigkeit
Abstand vom Zentrum

Die Welt im Großen

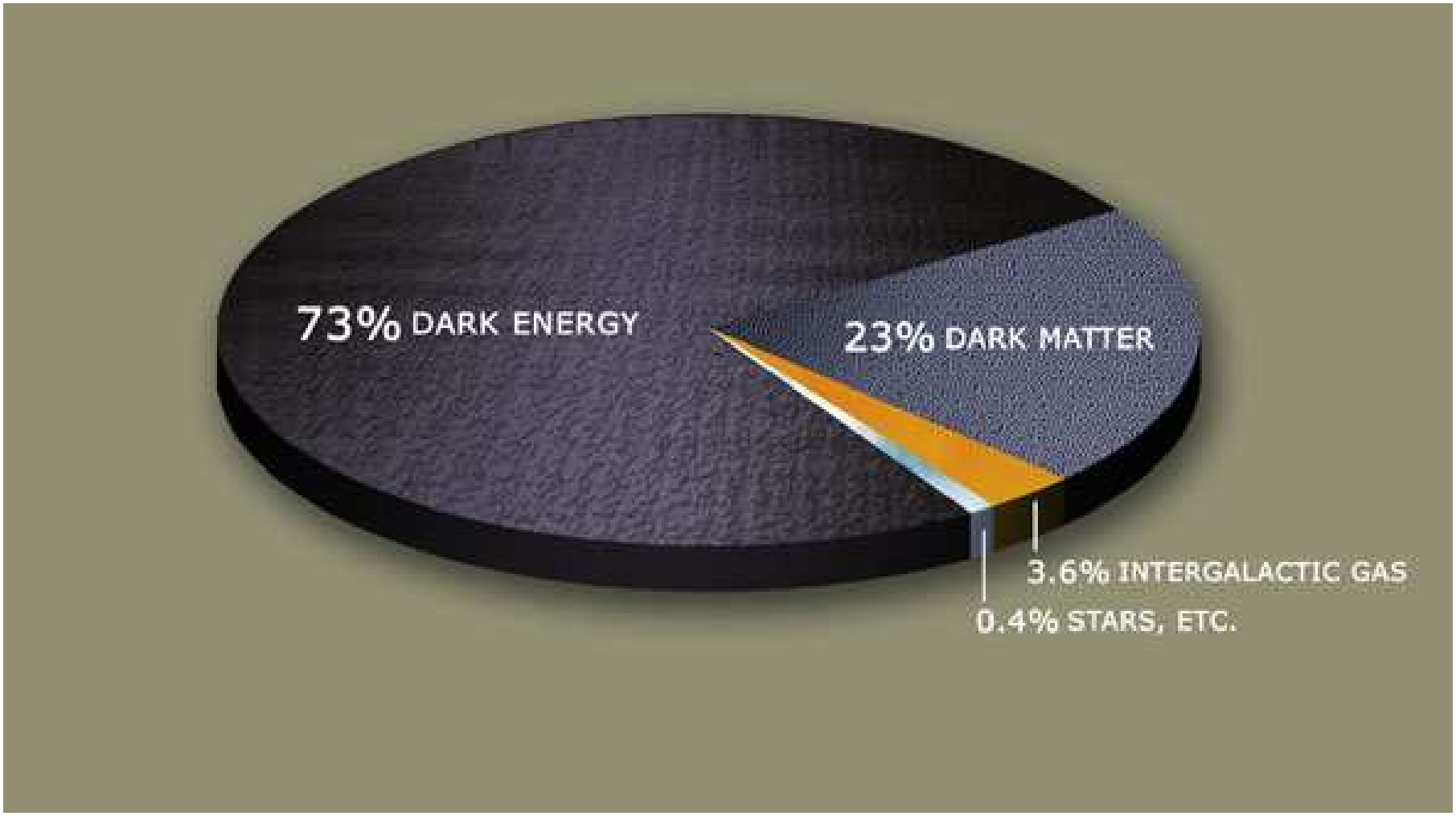
wird beherrscht durch die Gravitation

Allgemeine Relativitätstheorie Einsteins

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} + \Lambda\, g_{\mu\nu} = 8\pi G_N\, T_{\mu\nu}$$

$T_{\mu\nu}$ sichtbare und dunkle Materie

Λ dunkle Energie


73% DARK ENERGY
23% DARK MATTER
3.6% INTERGALACTIC GAS
0.4% STARS, ETC.

Die Suche nach schweren Objekten

- Higgs-Teilchen
- SUSY Teilchen
- ...

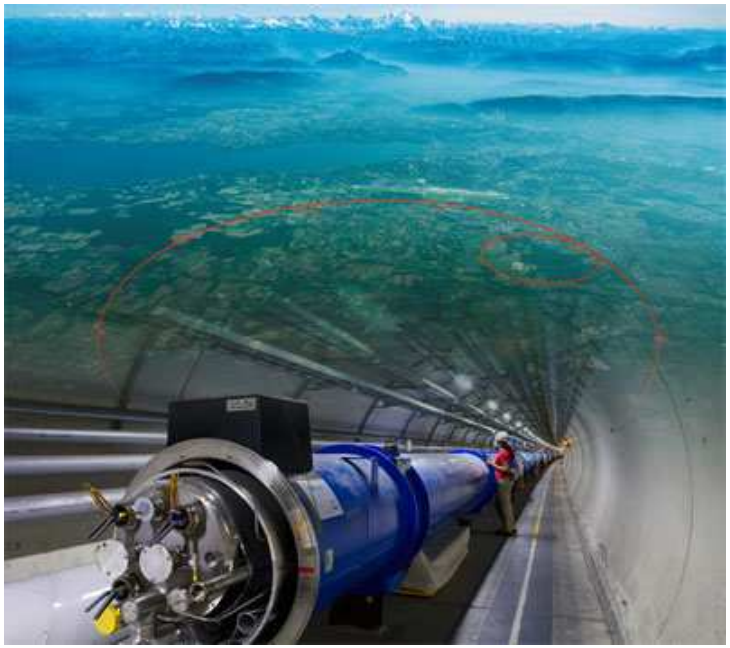
erfordert höhere Energien als bisher erreicht.

Zukünftige Collider

2008/2009:

Large Hadron Collider

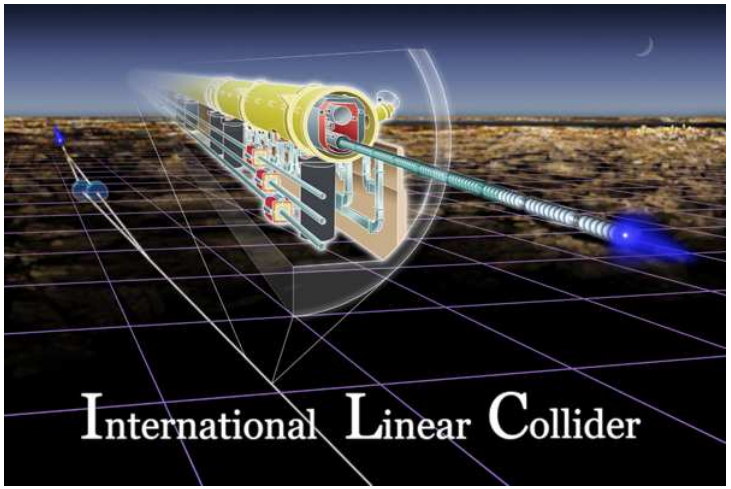
Proton – Proton



7 000 GeV + 7 000 GeV

Future:

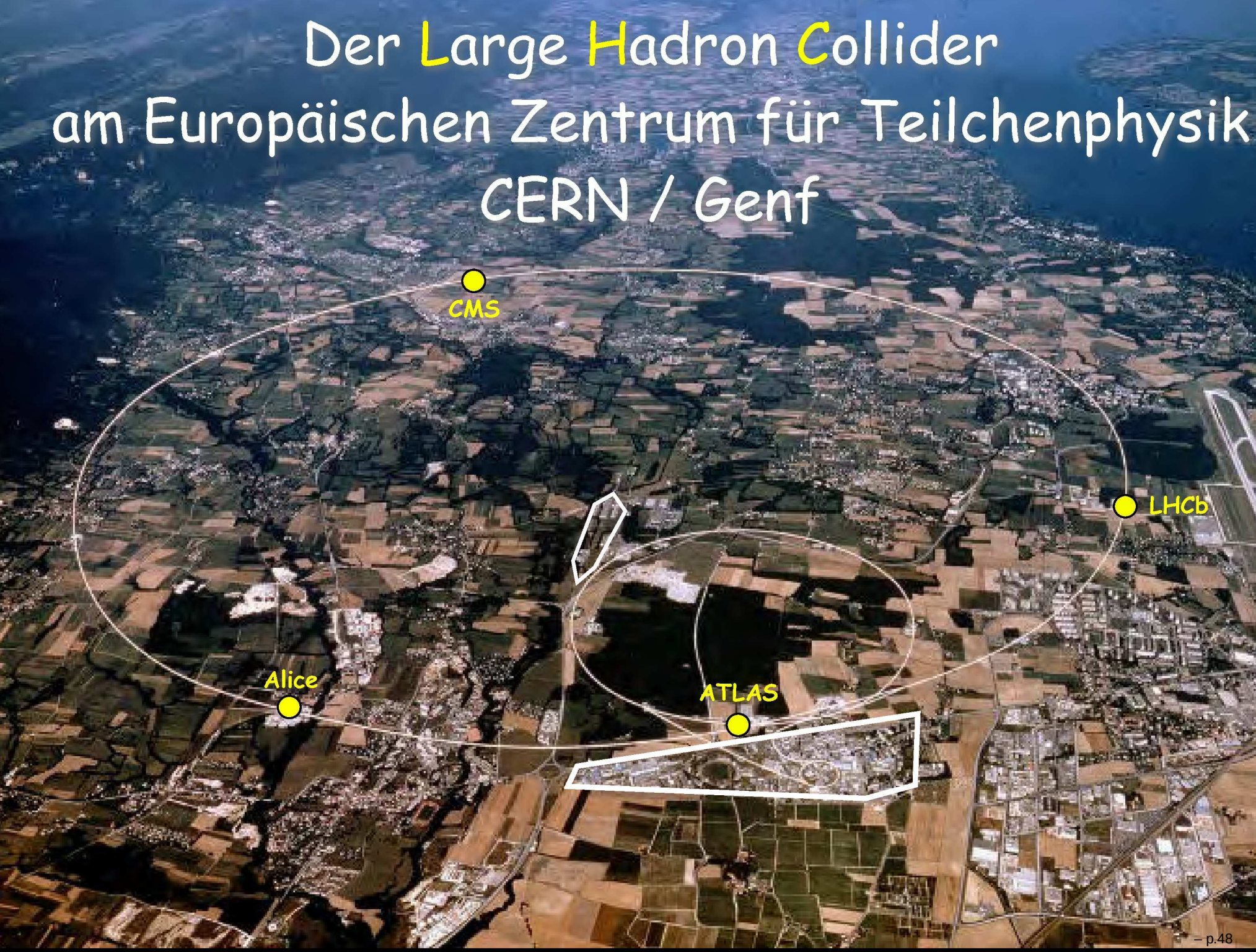
e^+e^- **Linear Collider**



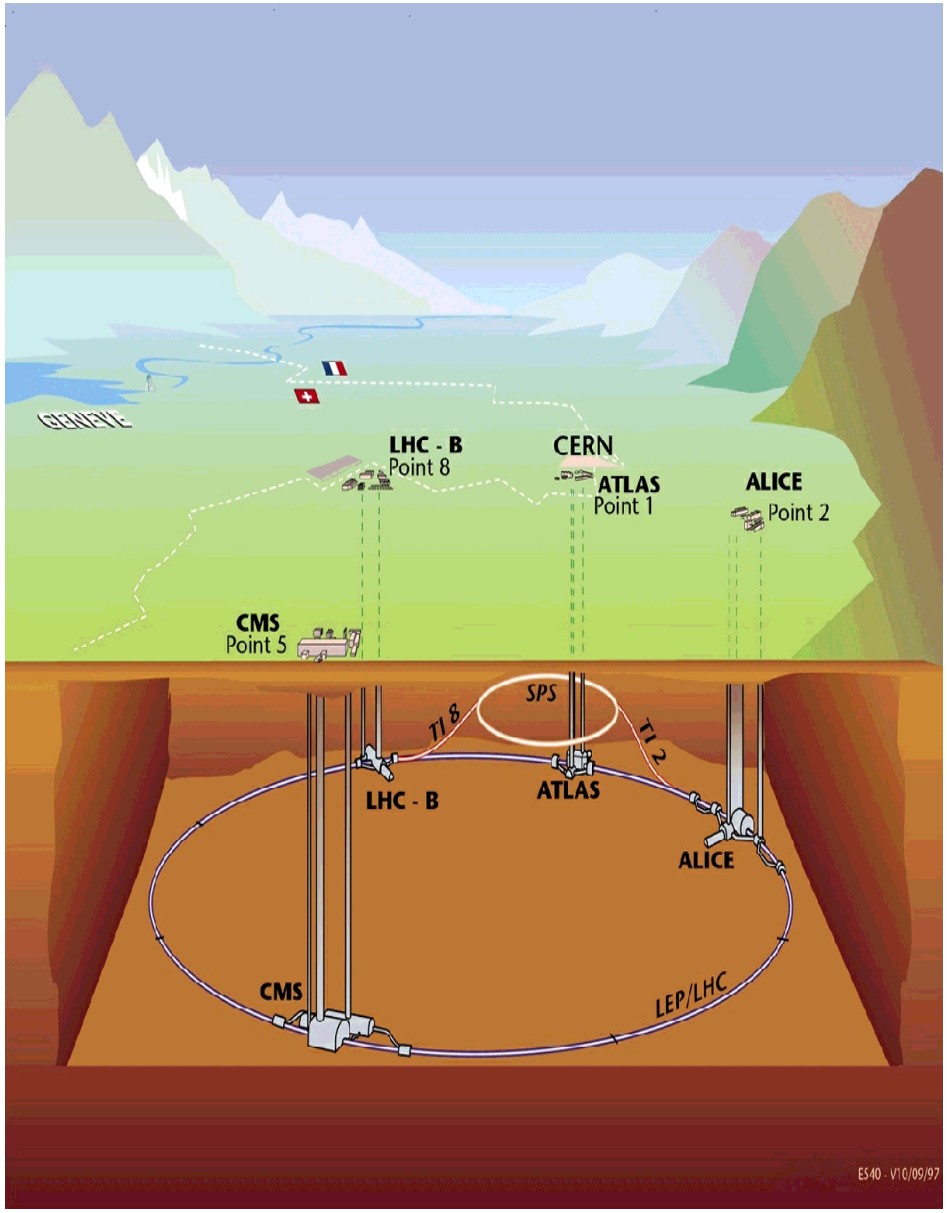
250 GeV + 250 GeV

RESEARCH INSTITUTE
UNANSWERED QUESTIONS
UNQUESTIONED ANSWERS

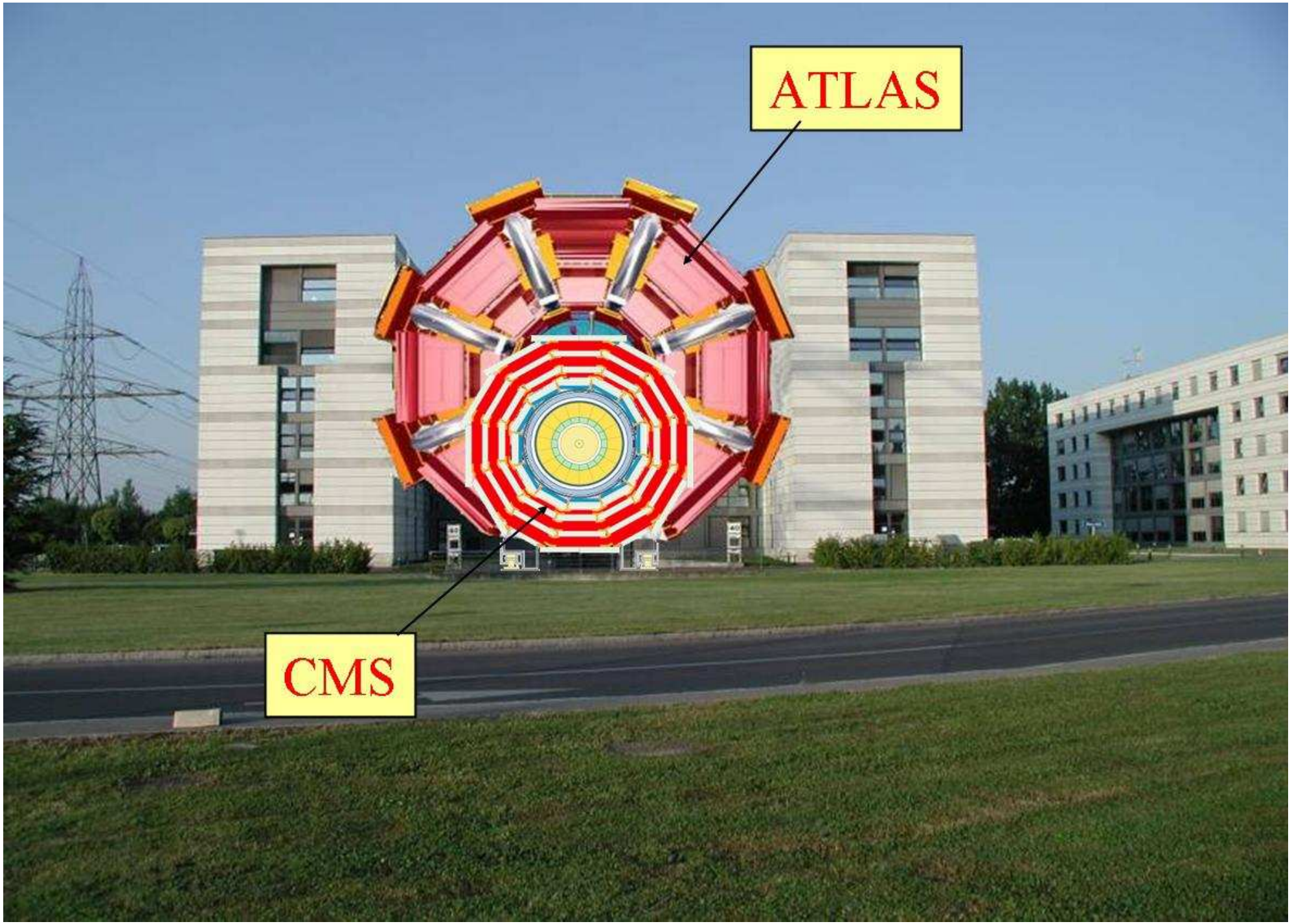
Der Large Hadron Collider am Europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN / Genf

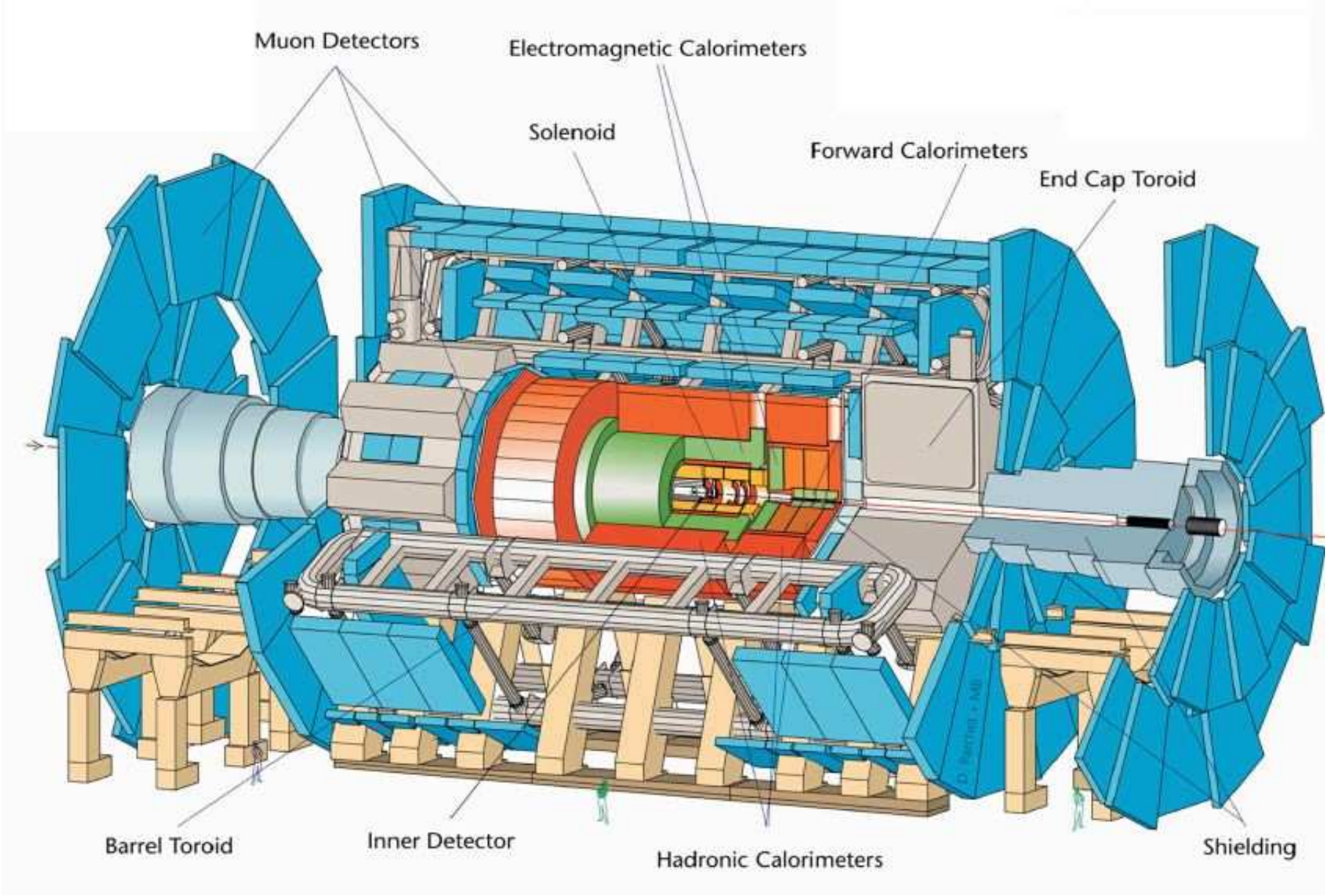


Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN, Genf



Proton – Proton Kollisionen im LEP Tunnel

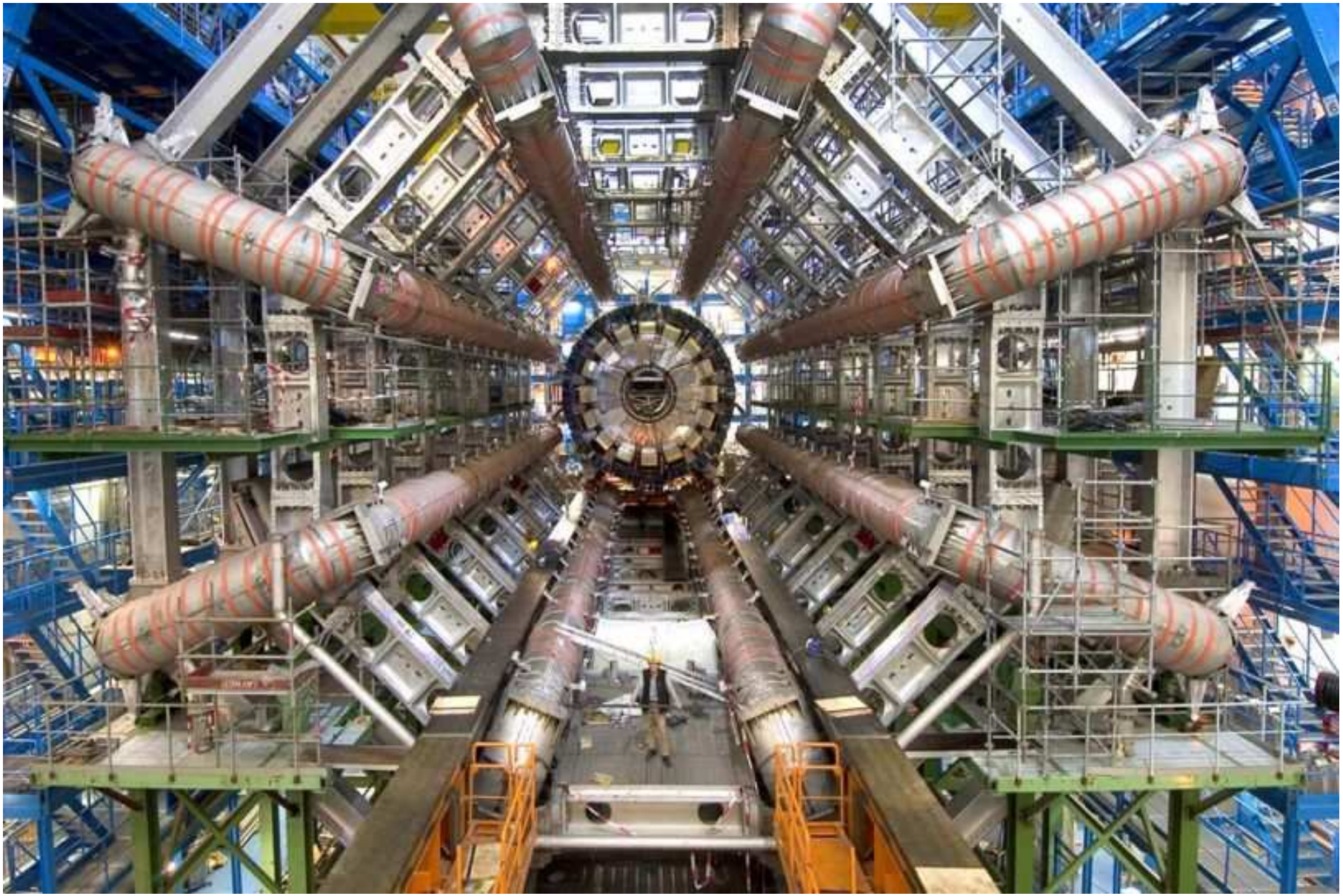

ATLAS
CMS

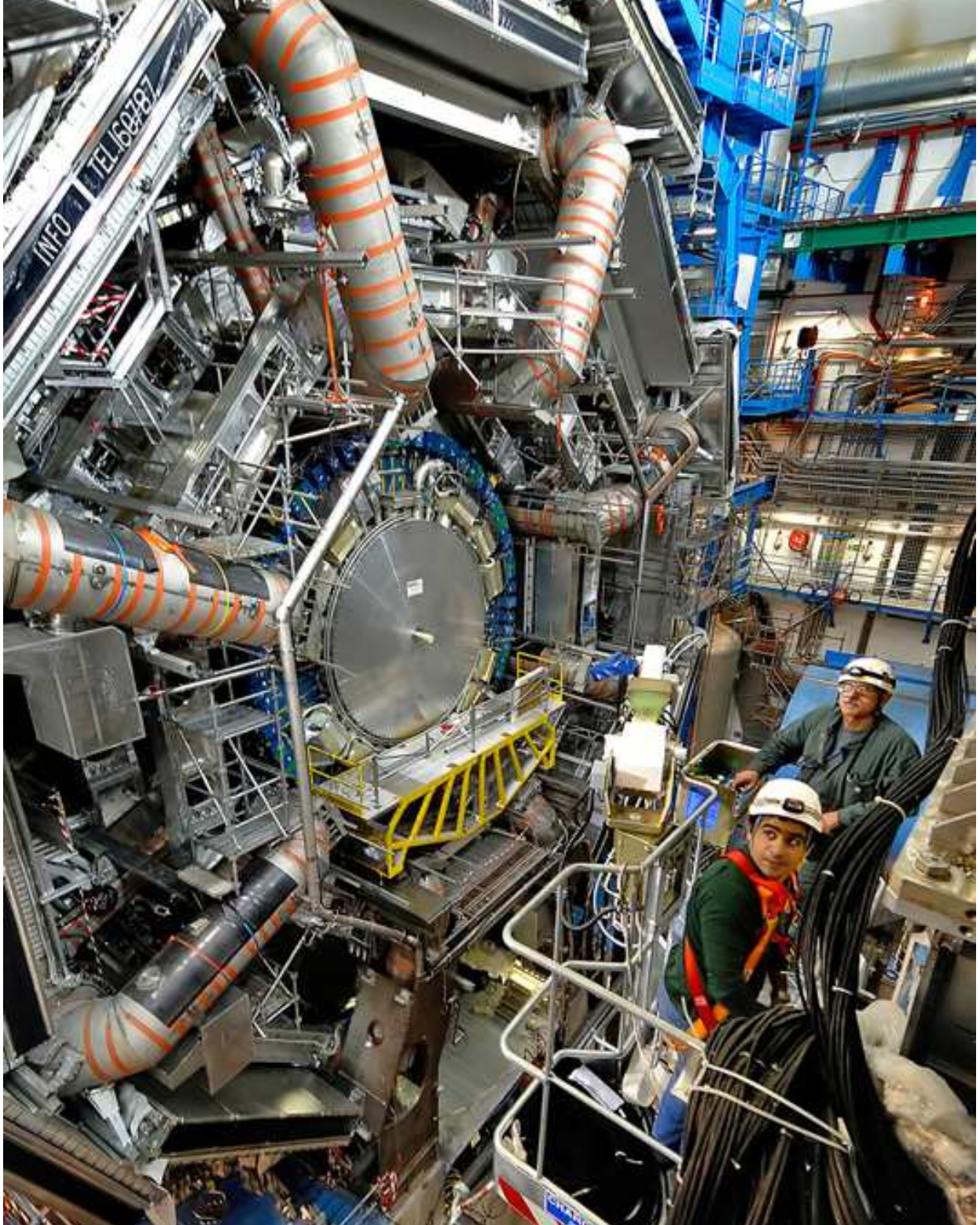


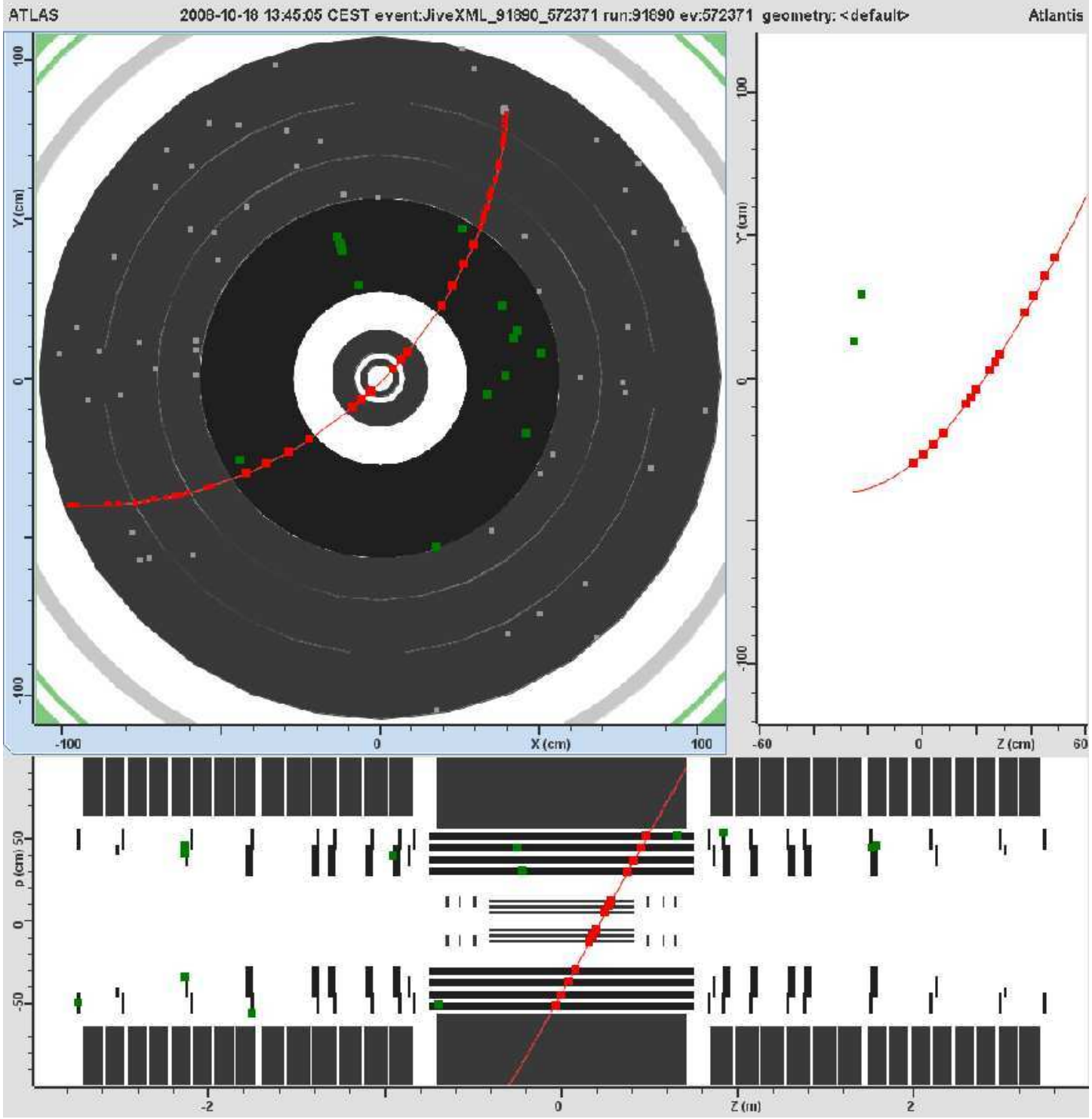
ATLAS

lokale Beteiligung: LMU und MPP

Der ATLAS Detektor am LHC



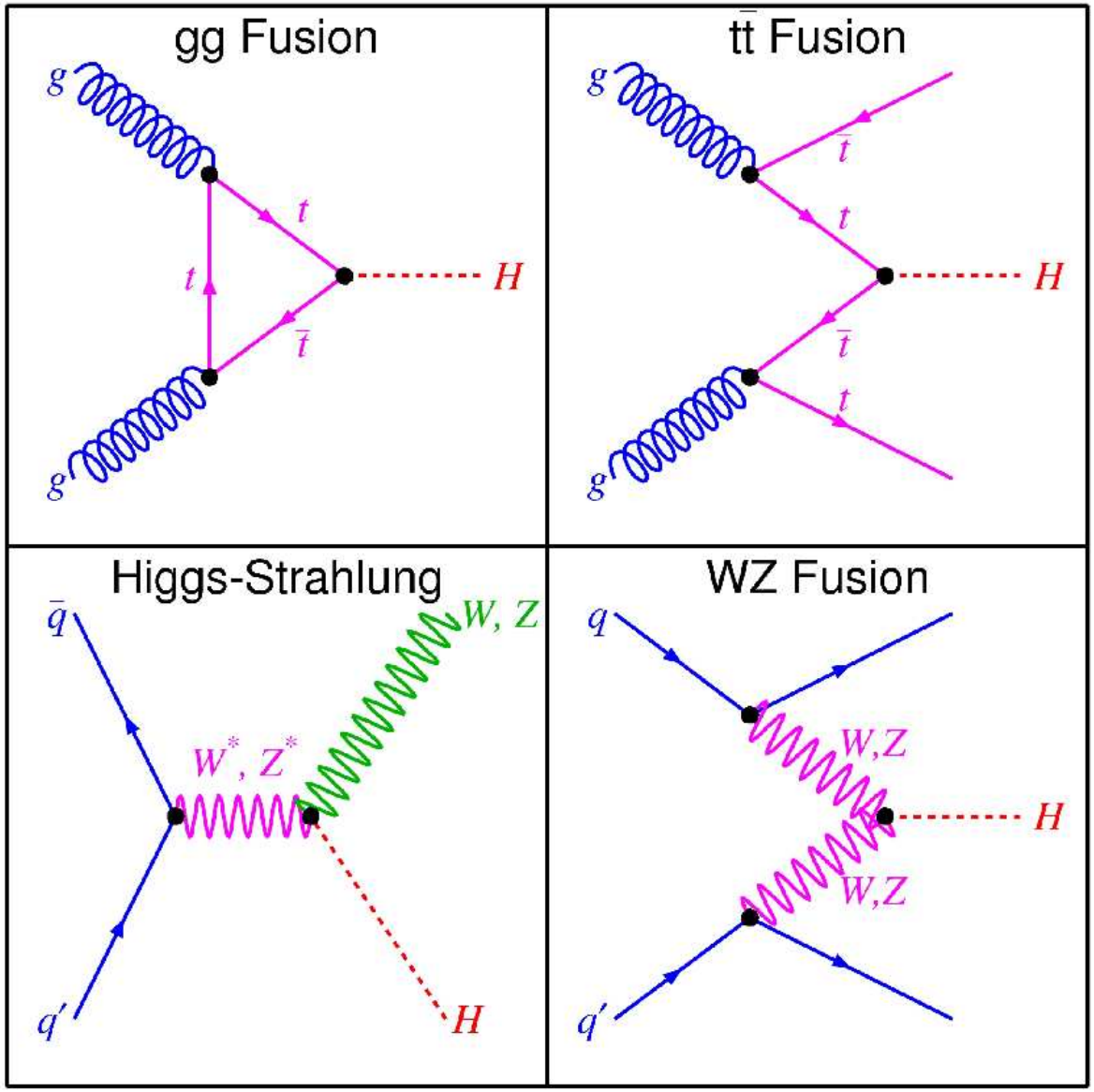

INFO
TEL 68787

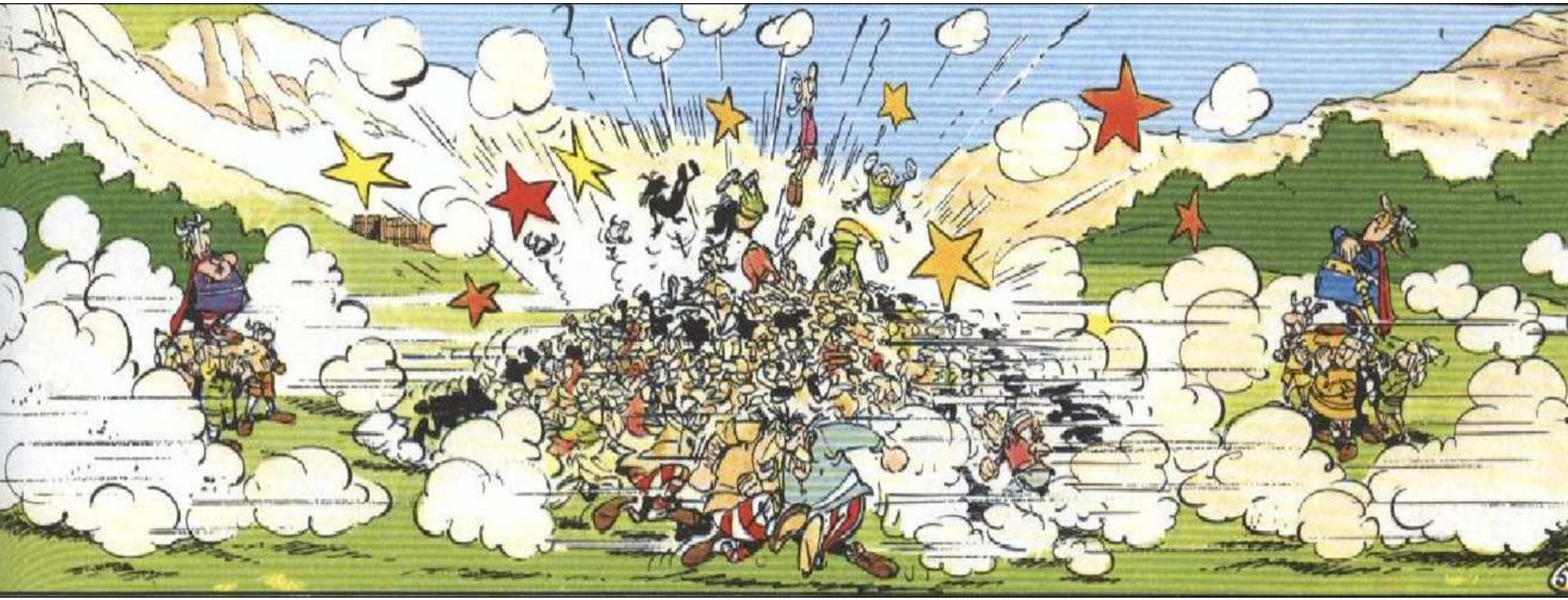

ATLAS
2008-10-18 13:45:05 CEST event:JiveXML_91690_572371 run:91690 ev:572371 geometry: <default>
Atlantis
Y (cm)
X (cm)
Z (cm)
p (cm)
Z (m)

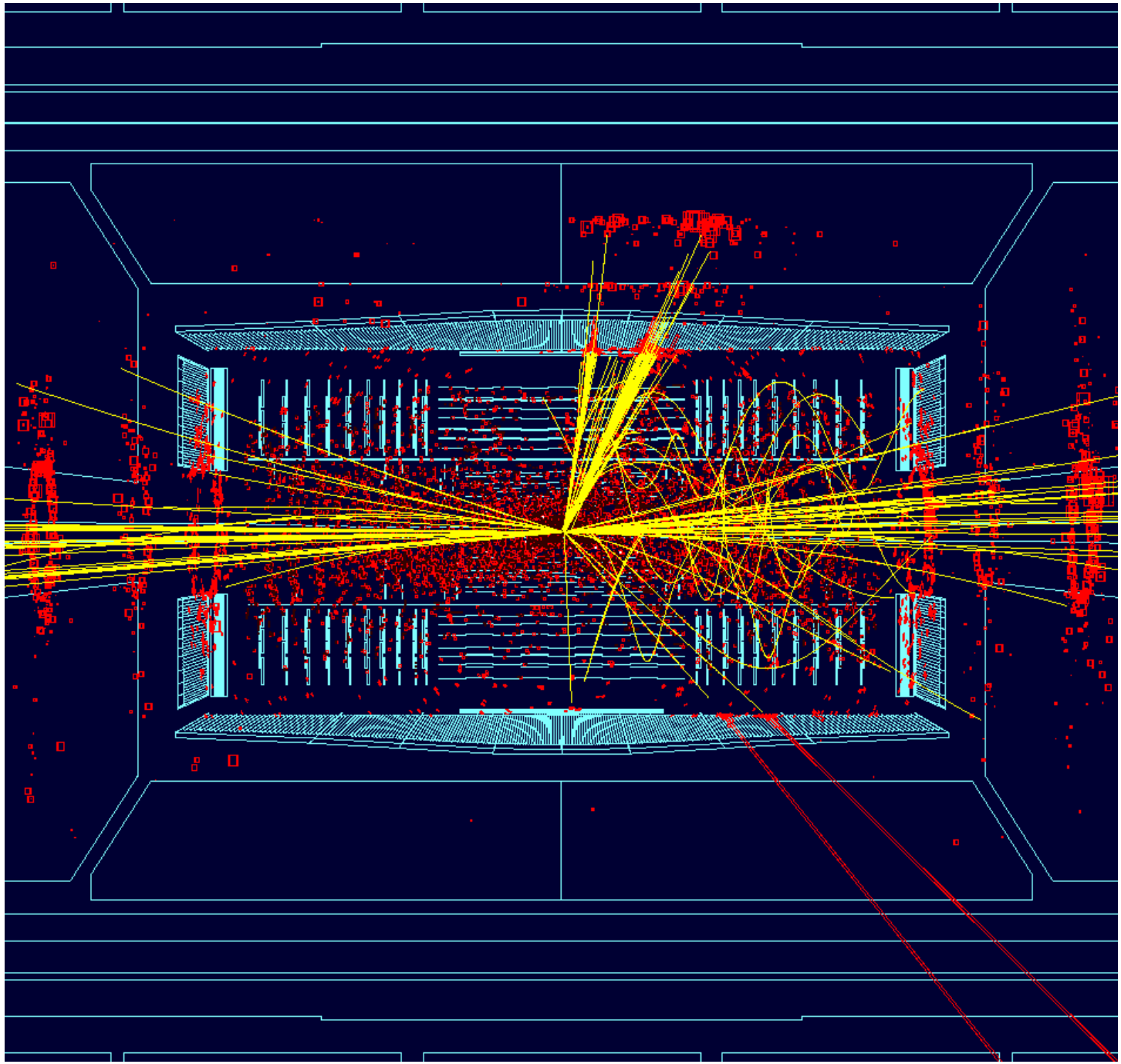
LHC Tunnel

29 April 2008

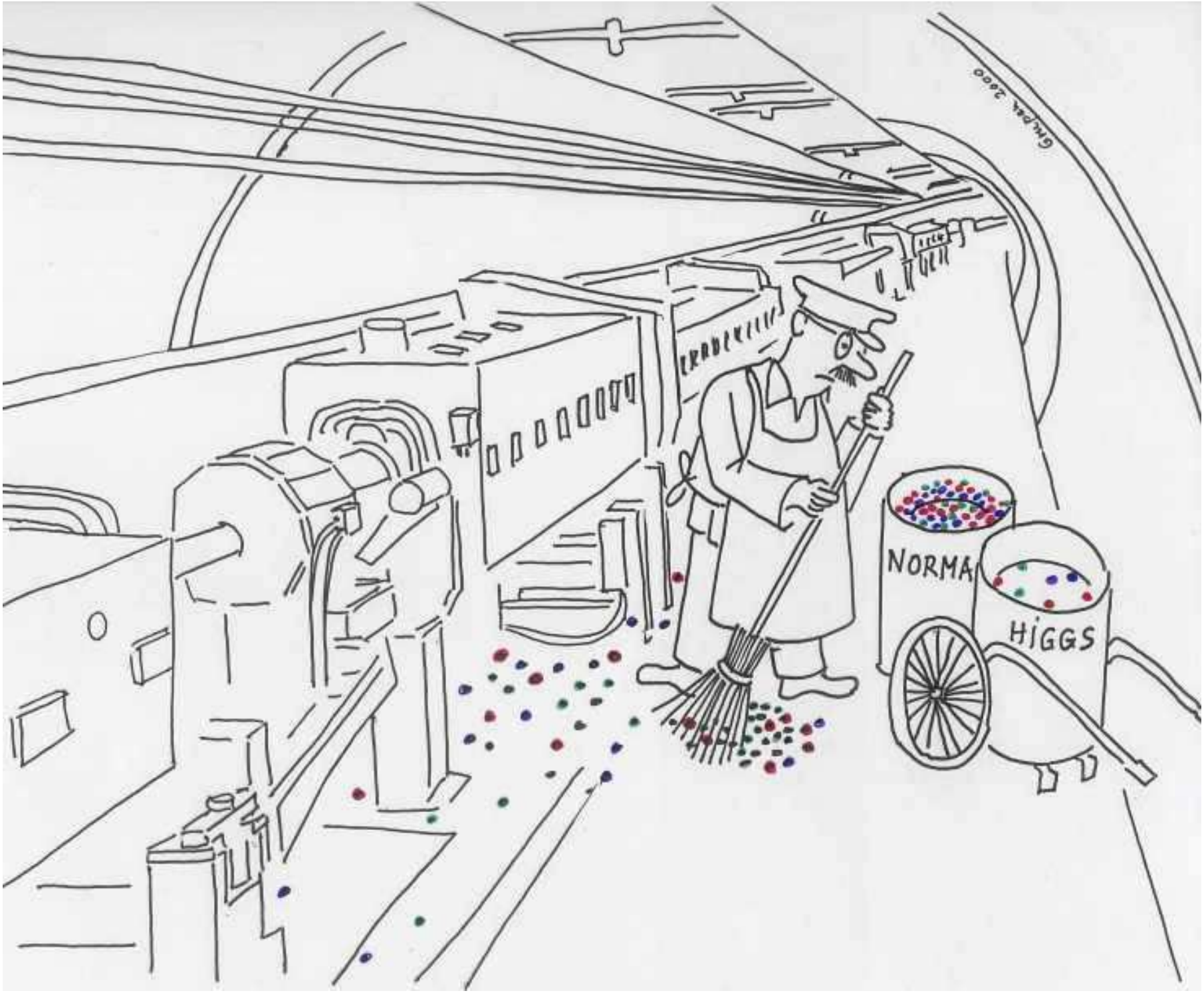
Higgs-Erzeugung am LHC

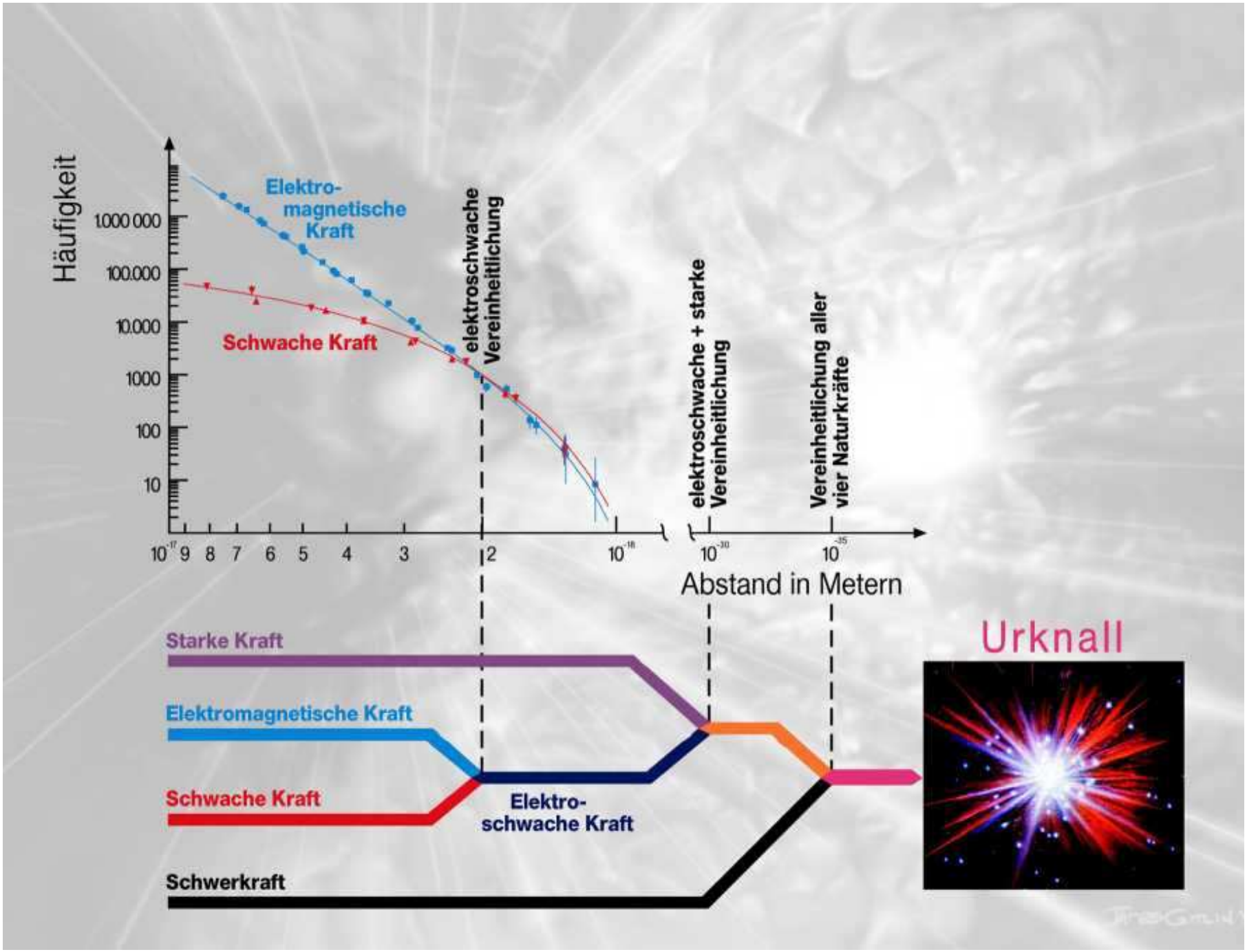






Higgsboson im CMS Detektor (Simulation)


NORMA
HIGGS


Häufigkeit
1000 000
100.000
10.000
1000
100
10
Elektro-
magnetische
Kraft
Schwache Kraft
elektroschwache
Vereinheitlichung
elektroschwache + starke
Vereinheitlichung
Vereinheitlichung aller
vier Naturkräfte
10^-17 9 8 7 6 5 4 3 2 10^-18 10^-30 10^-35
Abstand in Metern
Starke Kraft
Elektromagnetische Kraft
Schwache Kraft
Elektro-
schwache Kraft
Schwerkraft
Urknall

Ansätze zur Einbindung der Gravitation

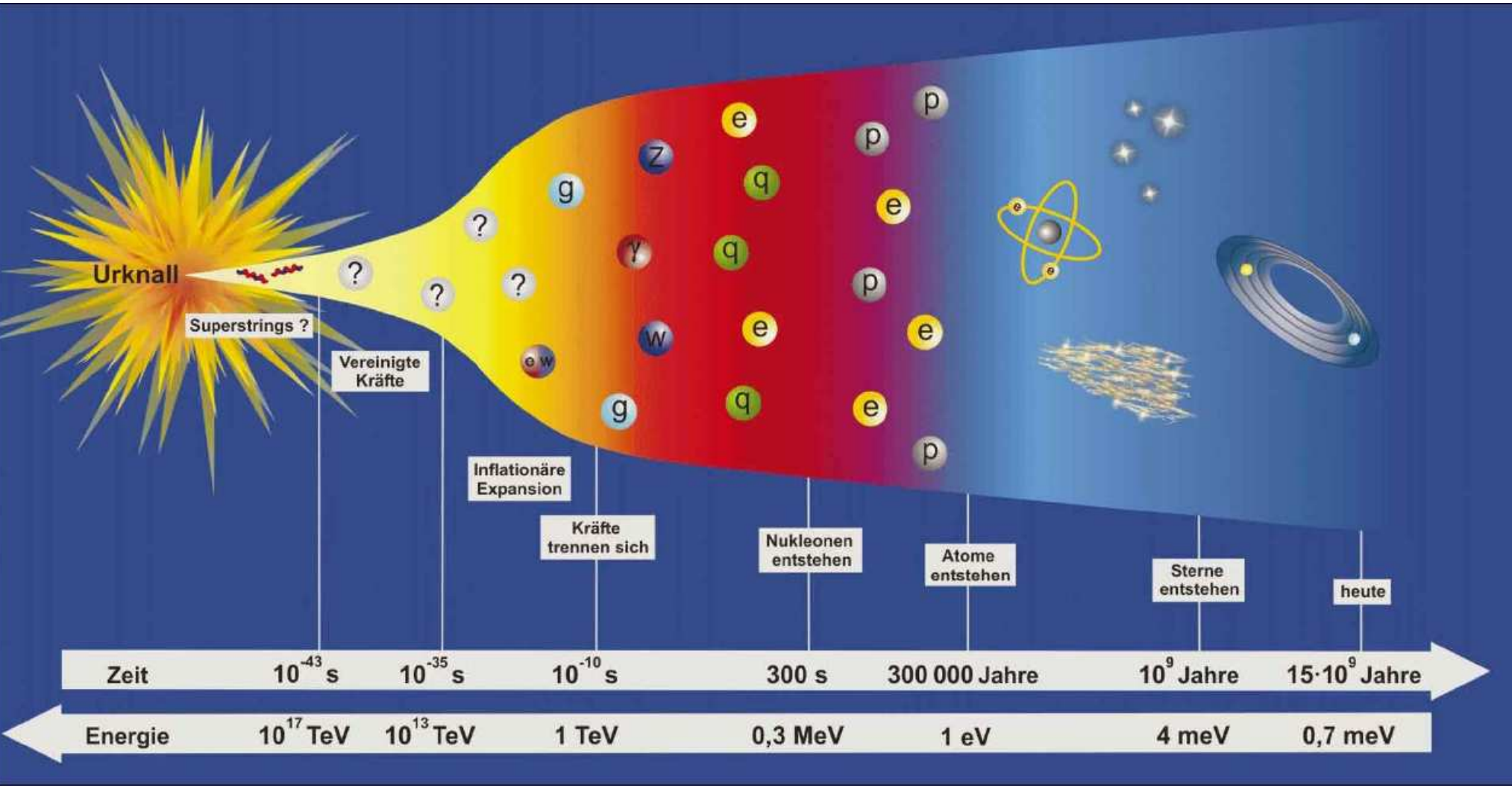
zur Zeit noch sehr spekulativ

- extra Raumdimensionen
  - Gravitationsgesetz modifiziert bei kleinen Abständen
  - Gravitonen in höheren Dimensionen
- Stringtheorie
  - punktförmige Teilchen $\rightarrow$ ausgedehnte Gebilde
- nicht-kommutative Geometrie
  bei kleinen Abständen

Untersuchung der Materie bei hohen Energien

bedeutet auch:

Blick zurück in frühe Phasen des Universums


Urknall
Superstrings ?
Vereinigte Kräfte
Inflationäre Expansion
Kräfte trennen sich
Nukleonen entstehen
Atome entstehen
Sterne entstehen
heute
Zeit
10^{-43} s
10^{-35} s
10^{-10} s
300 s
300 000 Jahre
10^{9} Jahre
$15 \cdot 10^{9}$ Jahre
Energie
10^{17} TeV
10^{13} TeV
1 TeV
0,3 MeV
1 eV
4 meV
0,7 meV