

# Reise zum Beginn des Universums



**Kiwanis Club**

Leonding, 4. Nov. 2014

**Claudia-Elisabeth Wulz**  
Institut für Hochenergiephysik  
Österreichische Akademie der Wissenschaften  
CERN

**Wann und wie ist das Universum entstanden?  
Wie wird es sich weiterentwickeln?**



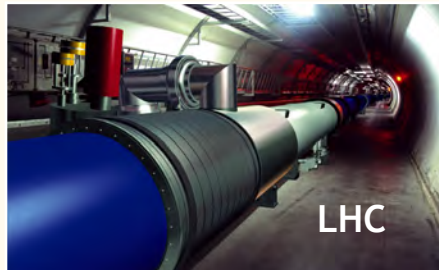
*Wie trägt CERN bei?  
Was bringt uns diese Forschung?*

**Woraus besteht es?  
Welche Kräfte wirken zwischen seinen Bestandteilen?**

# Anlagen zur Beantwortung dieser Fragen

## Teilchenbeschleuniger

z.B. LHC, RHIC, KEK-B



## Undergrundlaboratorien und -experimente

z.B. Gran Sasso, Kamiokande, IceCube

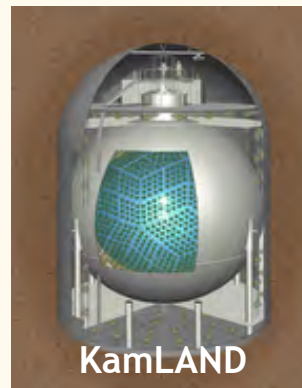
## Experimente mit kosmischen Strahlen

z.B. Auger



## Experimente an Kernreaktoren oder mit radioaktiven Quellen

z.B. KamLAND, Double-CHOOZ, Katrin, Atominstut



## Raumsonden

z.B. FERMI, Hubble, Planck



## Terrestrische Teleskope

z.B. ALMA, VLT

## Wie und wann ist das Universum entstanden?

Es entstand aus extrem heißen, dichten Zustand, vor 13,8 Milliarden Jahren.

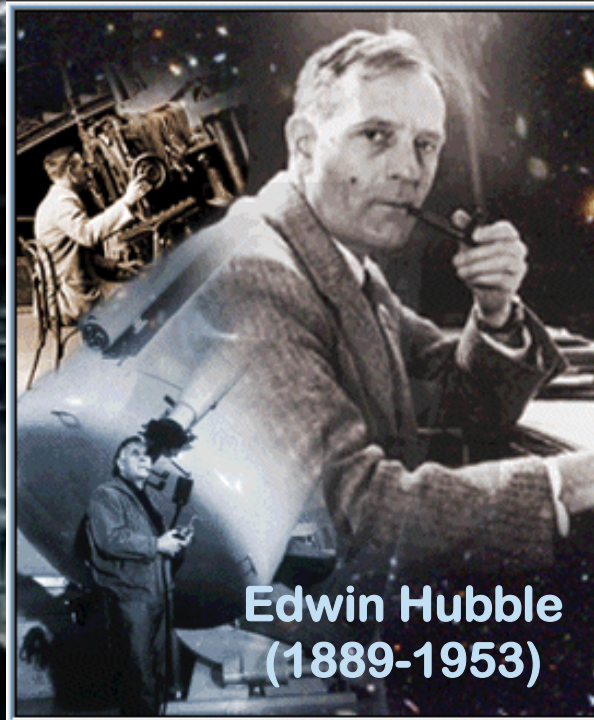
Seither dehnt es sich aus und kühlt sich ab.



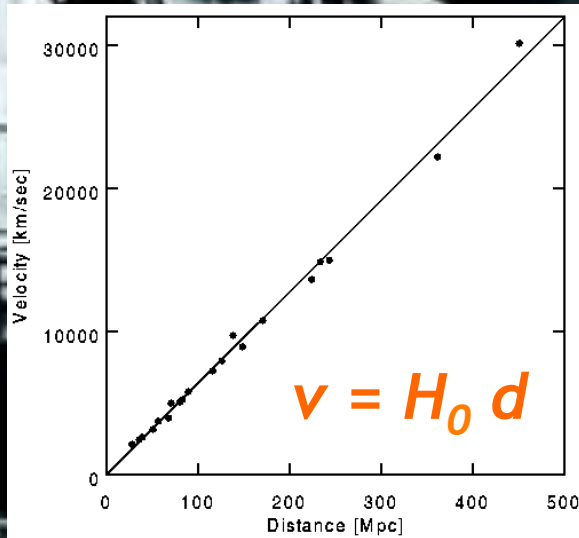
## Woher wissen wir das?

Ursprünglich aus Beobachtungen von Galaxien

Heute auch aus Messungen in Astrophysik (z.B. kosmische Hintergrundstrahlung) und Teilchenphysik (z.B. LHC)



Edwin Hubble  
(1889-1953)



## Das Universum dehnt sich aus!

- Galaxien bewegen sich voneinander weg
- Entferntere Galaxien bewegen sich schneller
- $H_0 \sim 68 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$
- $H_0$  ... Hubbleparameter (« Hubblekonstante »)

# Urknall

## Synthese von:

Allgemeiner Relativitätstheorie (Einstein)  
Expandierendes Universum als Lösung der Einsteingleichungen  
(Lemaître, Friedmann)  
Beobachtung des sich ausdehnenden Universums (Hubble)

## Schlussfolgerung:

Das Universum begann in einem Punkt

**Big Bang**



Albert Einstein,  
Georges Lemaître

Fred Hoyle



## Was sind die Bestandteile des Universums?

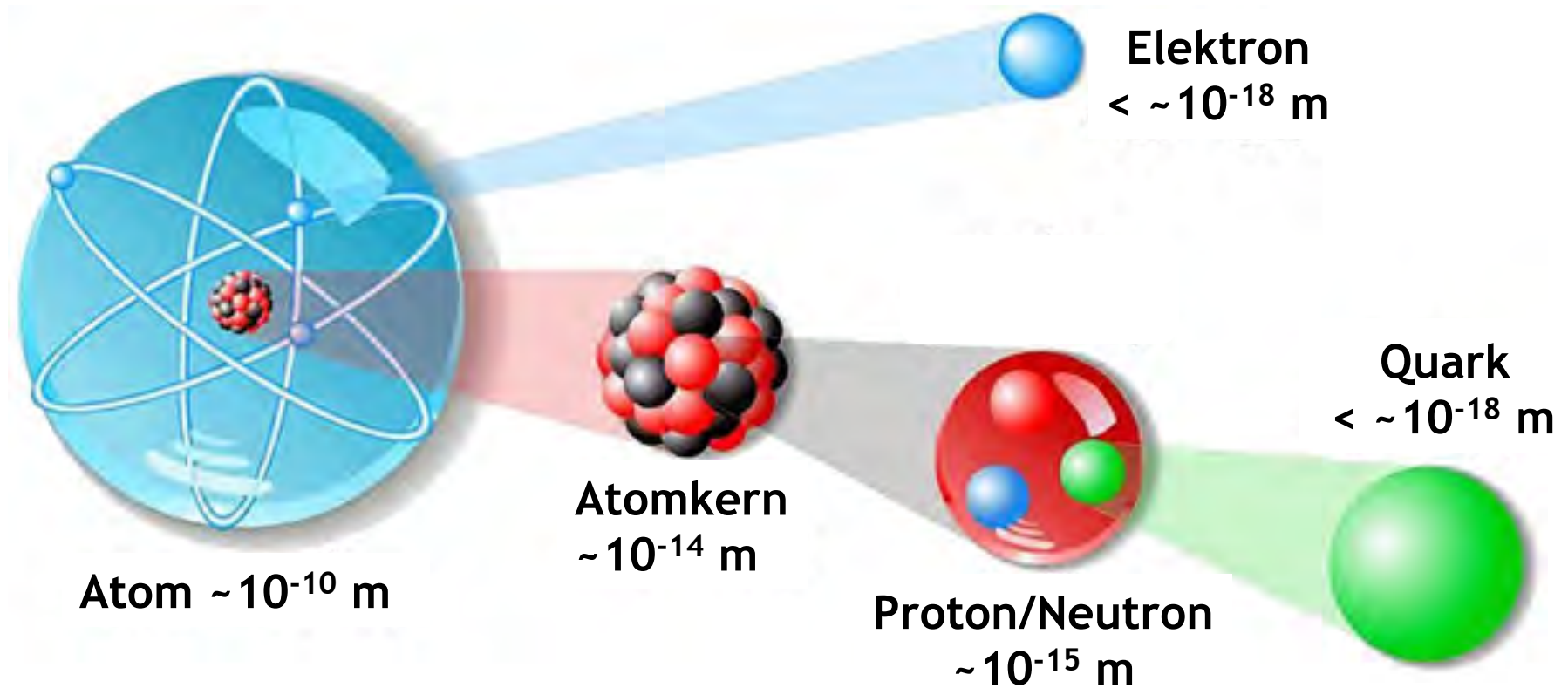
Normale Materie (Atome): Quarks, Leptonen  
Dunkle Materie  
Dunkle Energie

## Welche Kräfte herrschen im Universum?

Schwerkraft  
Elektromagnetische Kraft  
Starke Kraft (Kernkraft)  
Schwache Kraft

Kräfte werden durch Austausch von Teilchen (Bosonen) vermittelt.

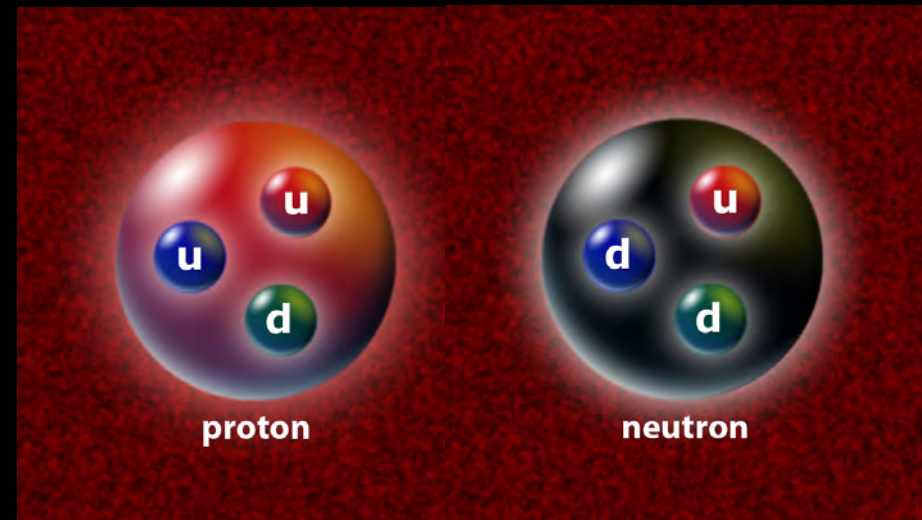
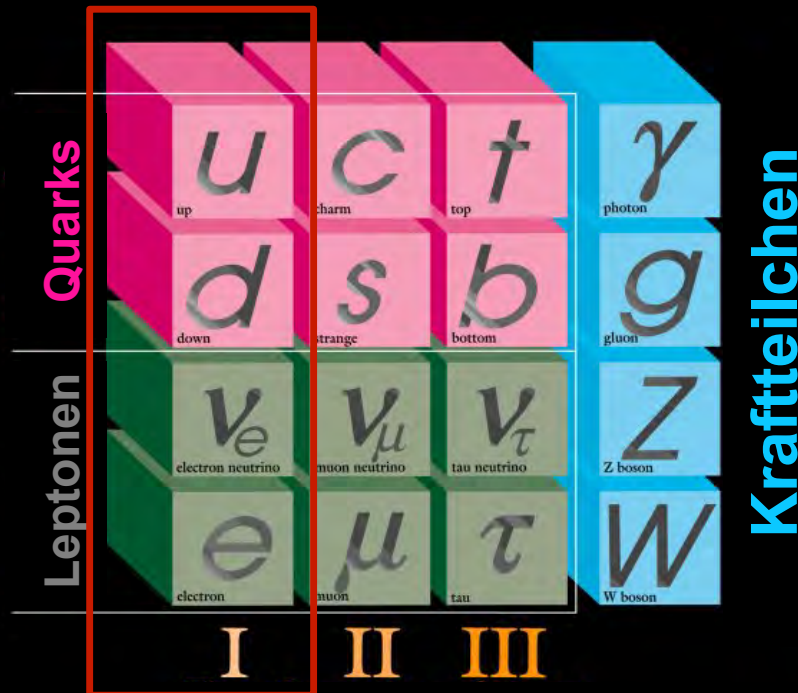
# Aufbau der Materie





# Aufbau der Materie

Nur die 1. Generation von Quarks und Leptonen spielt Rolle beim Aufbau normaler Materie. Die anderen existierten nur kurz nach dem Urknall. Heute treten sie nur in der kosmischen Strahlung auf oder werden in Beschleunigern erzeugt.



## 3 Generationen von Materieteilchen

# MARIO'S TIME MACHINE™



Der LHC ist eine Zeitmaschine,  
genau so wie Teleskope oder  
Raumsonden!

LICENSED BY:  
**Nintendo** THE SOFTWARE TOOLWORKS

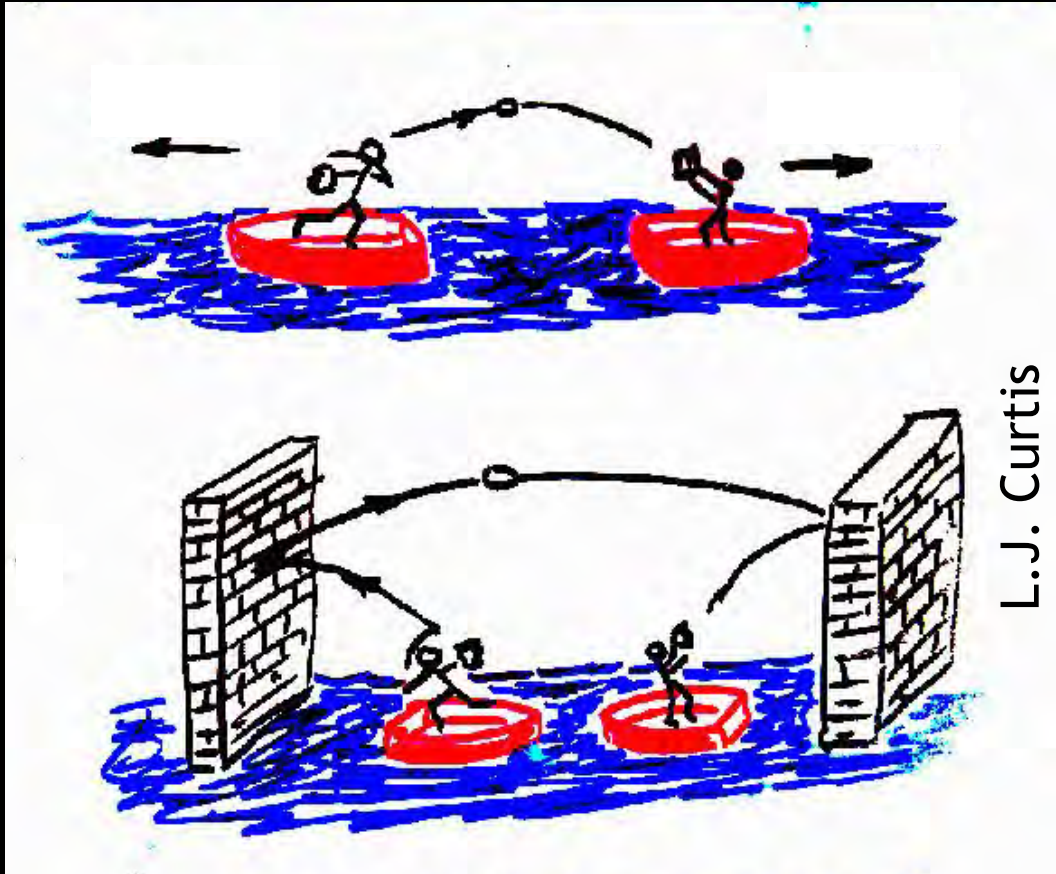
**C.-E. Wulz**

# Die fundamentalen Kräfte

KRAFT	RELATIVE STÄRKE	REICHWEITE	VERMITTLER
Stark	1	$10^{-15}$ m	Gluonen
Schwach	$10^{-6}$	$10^{-18}$ m	W, Z
Elektromagnetisch	$10^{-2}$	unendlich	Photon
Schwerkraft	$10^{-38}$	unendlich	Graviton



# Kraftteilchen



## Eichbosonen



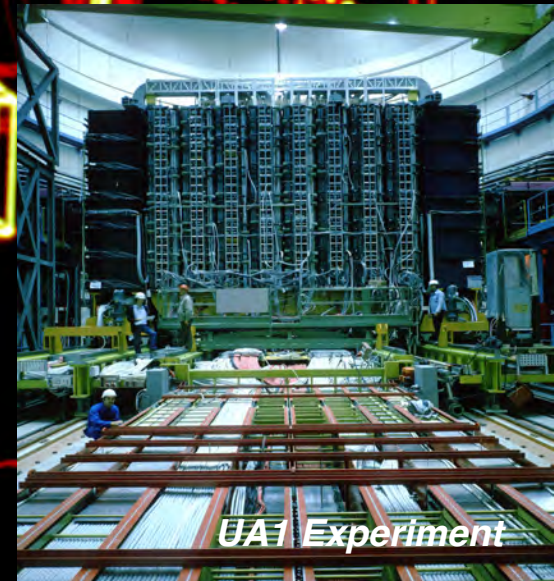
Teilchenaustausch ist für Kraft verantwortlich.

# Entdeckung der W und Z am CERN

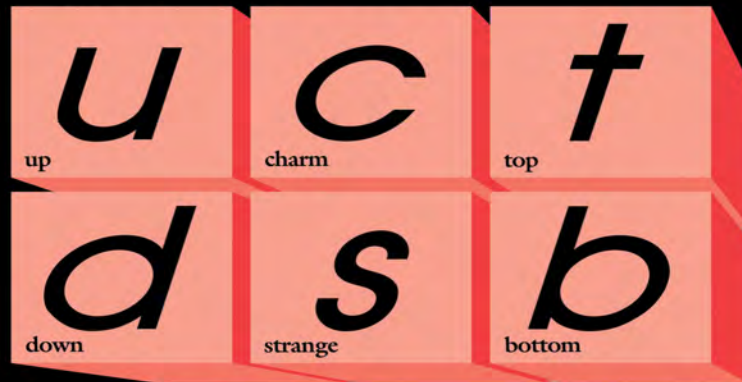
## Zerfall eines Z-Teilchens in 2 Elektronen



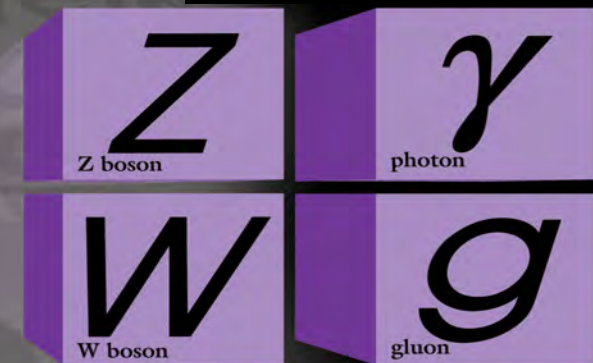
Carlo Rubbia



# Quarks



# Kraftteilchen



# Leptonen

# Standardmodell

# Erzeugung von Masse durch Higgs-Mechanismus

$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger D^\mu \phi - V(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

- Ohne Higgs-Mechanismus wären alle Teilchen des Standardmodells **masselos**, wenn man Invarianz (Symmetrie) verlangt.
- Masse entsteht erst durch die Wechselwirkung mit dem **Higgs-Feld**. Teilchen mit Masse werden in diesem Feld „gebremst“.
- Das gesamte Universum ist von diesem Higgs-Feld durchdrungen. Weil es überall im Universum ist, merkt man davon nichts.
- „Schwingungen“ (lokale Verdichtungen) dieses Higgs-Feldes erscheinen als **Higgs-Teilchen**, dessen Nachweis am LHC am CERN gelungen ist.
- Durch das Higgs-Feld bekommt das Universum erst **Substanz!**

Peter Higgs,  $\mu < 0, \mu > 0$



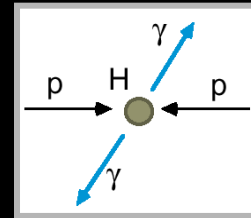
# LHC und die Experimente





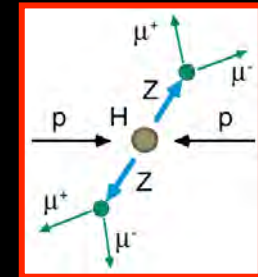
# Wie sucht man nach dem Higgs-Teilchen?

Da das Higgs-Teilchen extrem kurzlebig ist, zerfällt es im Detektor, und zwar in bekannte Teilchen wie Photonen ( $\gamma$ ), Z, W, Taus ( $\tau$ ), b-Quarks, etc. Diese Zerfallskanäle hat man bis jetzt vornehmlich untersucht:



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e \text{ oder } 4\mu \text{ oder } 2e+2\mu$$



$$H \rightarrow WW \rightarrow 2e2\nu \text{ oder } 2\mu2\nu$$

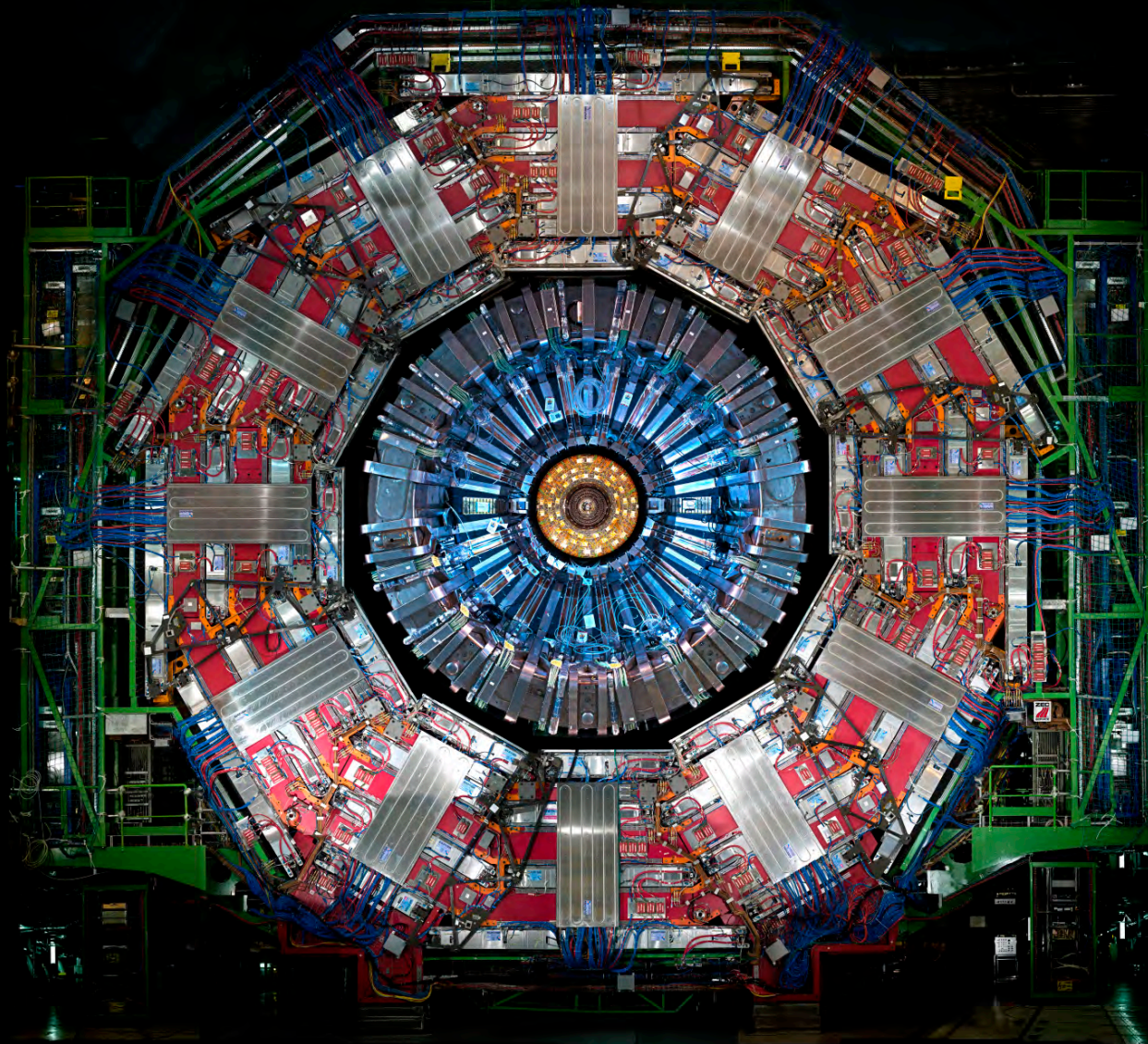
$$H \rightarrow bb$$

$$H \rightarrow \tau\tau$$

Andere Teilchen können im Detektor wie ein Higgs-Boson aussehen und somit ein "Signal" vortäuschen  $\rightarrow$  **Untergrund**.

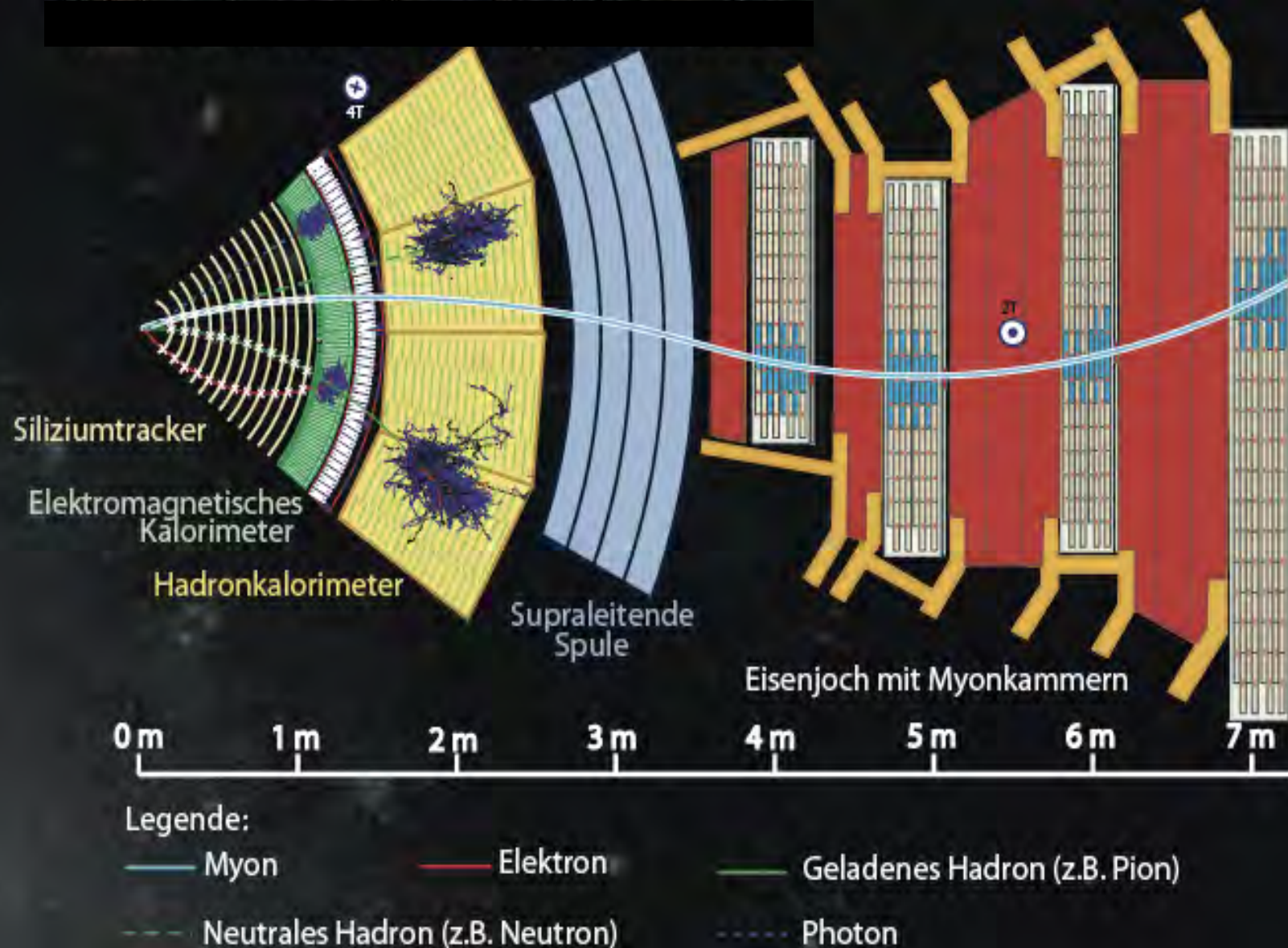


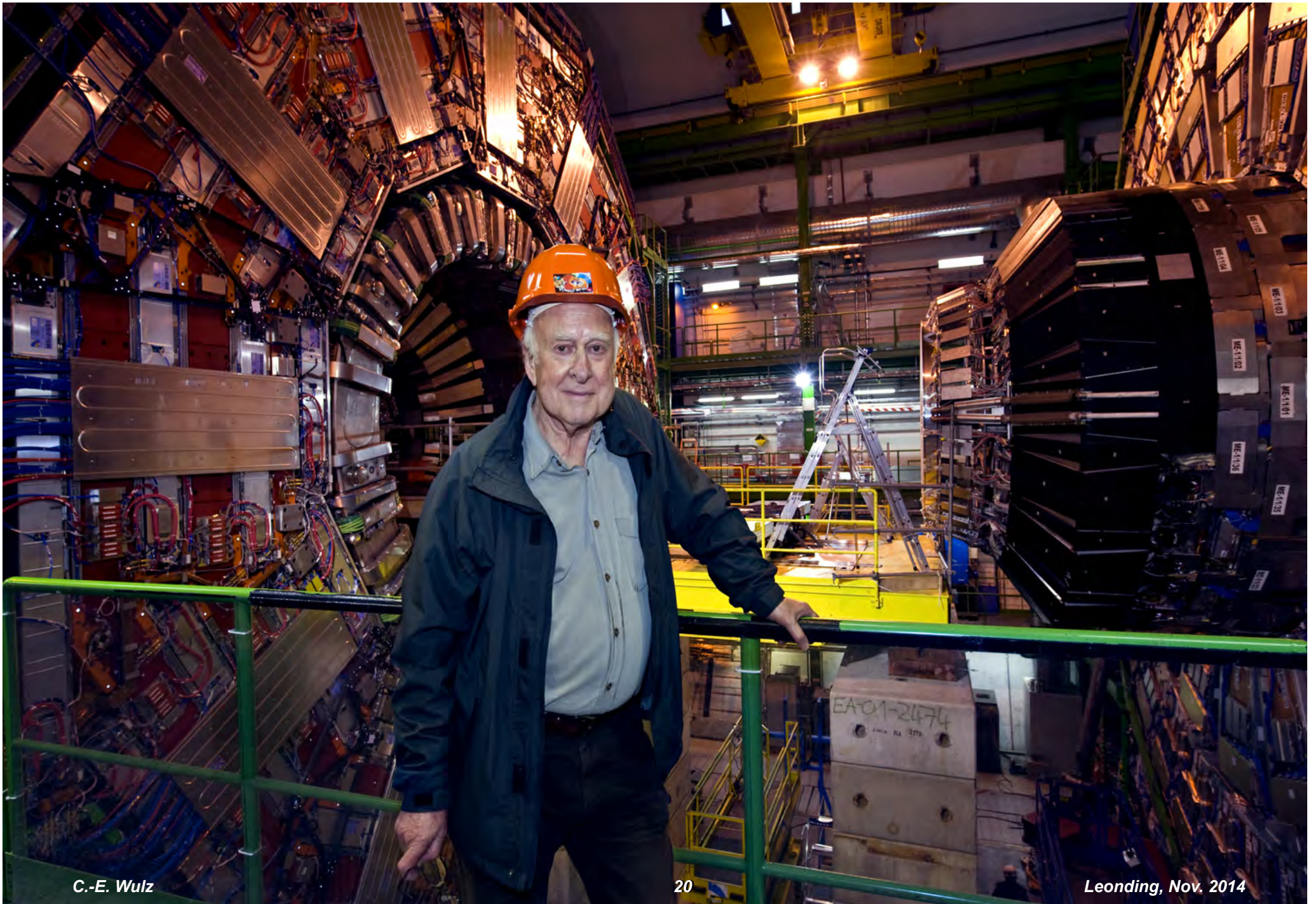
# CMS-Experiment





# CMS-Experiment

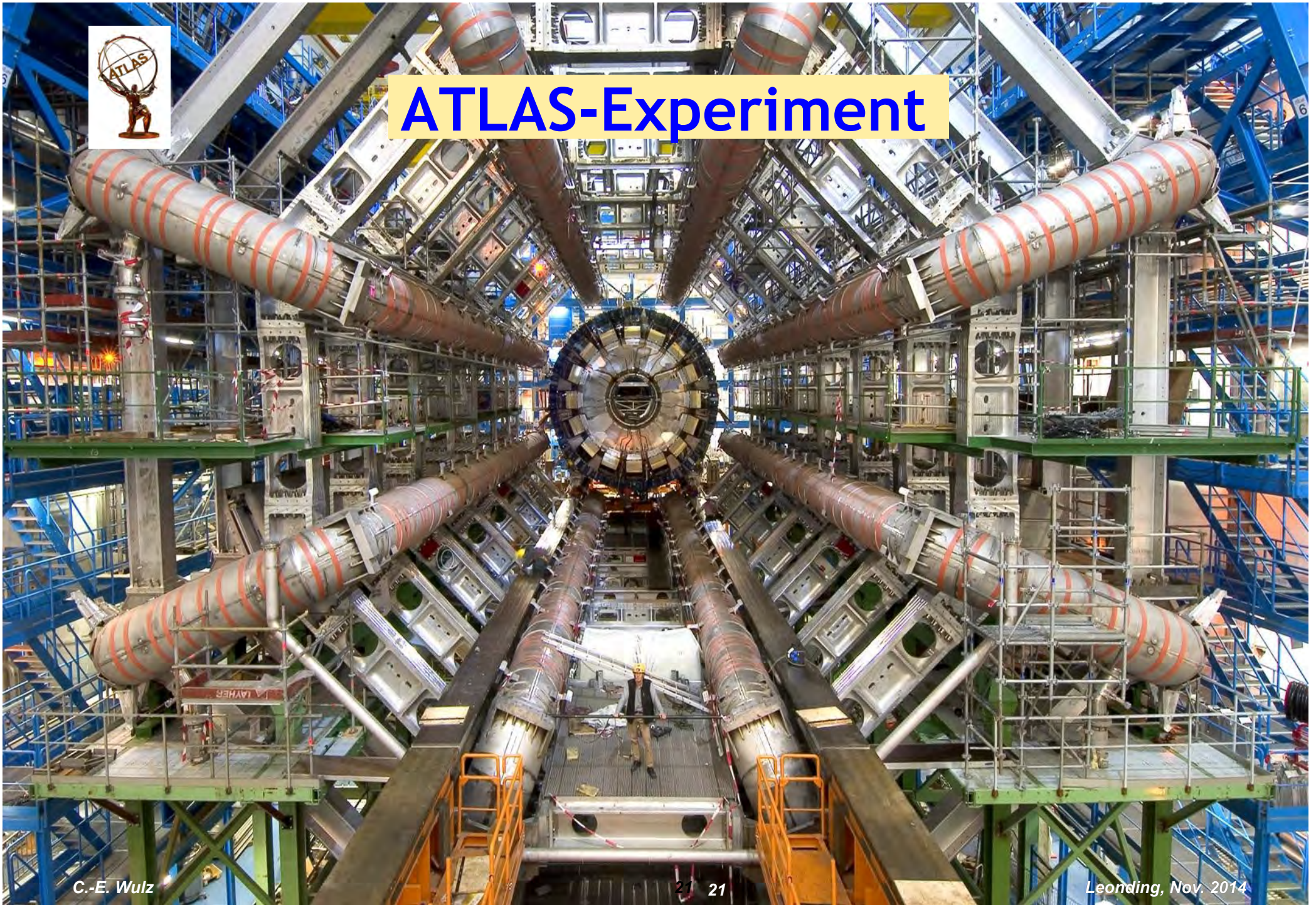




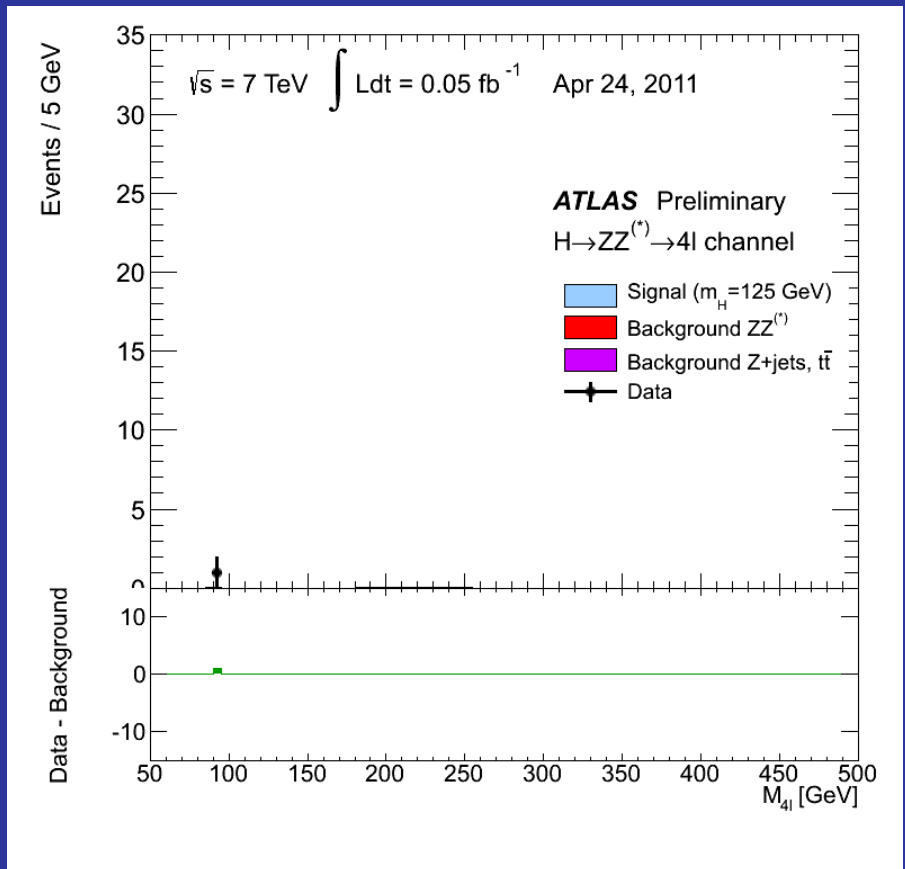
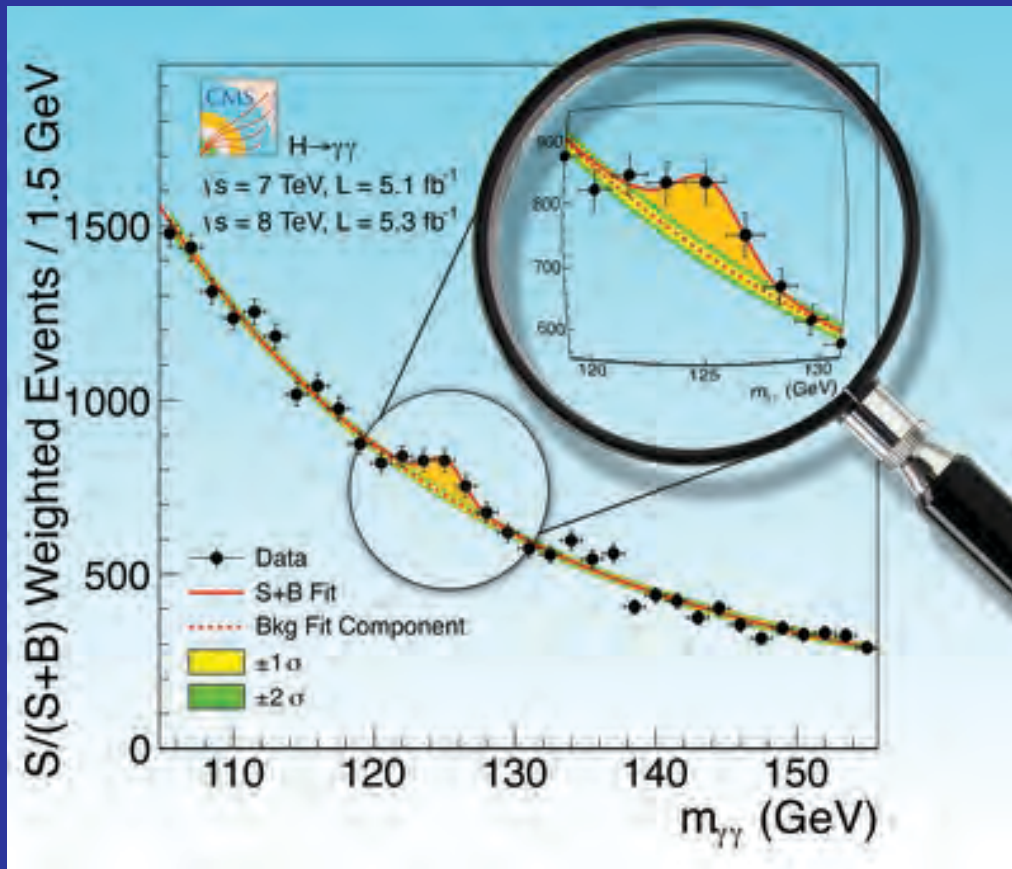
C.-E. Wulz

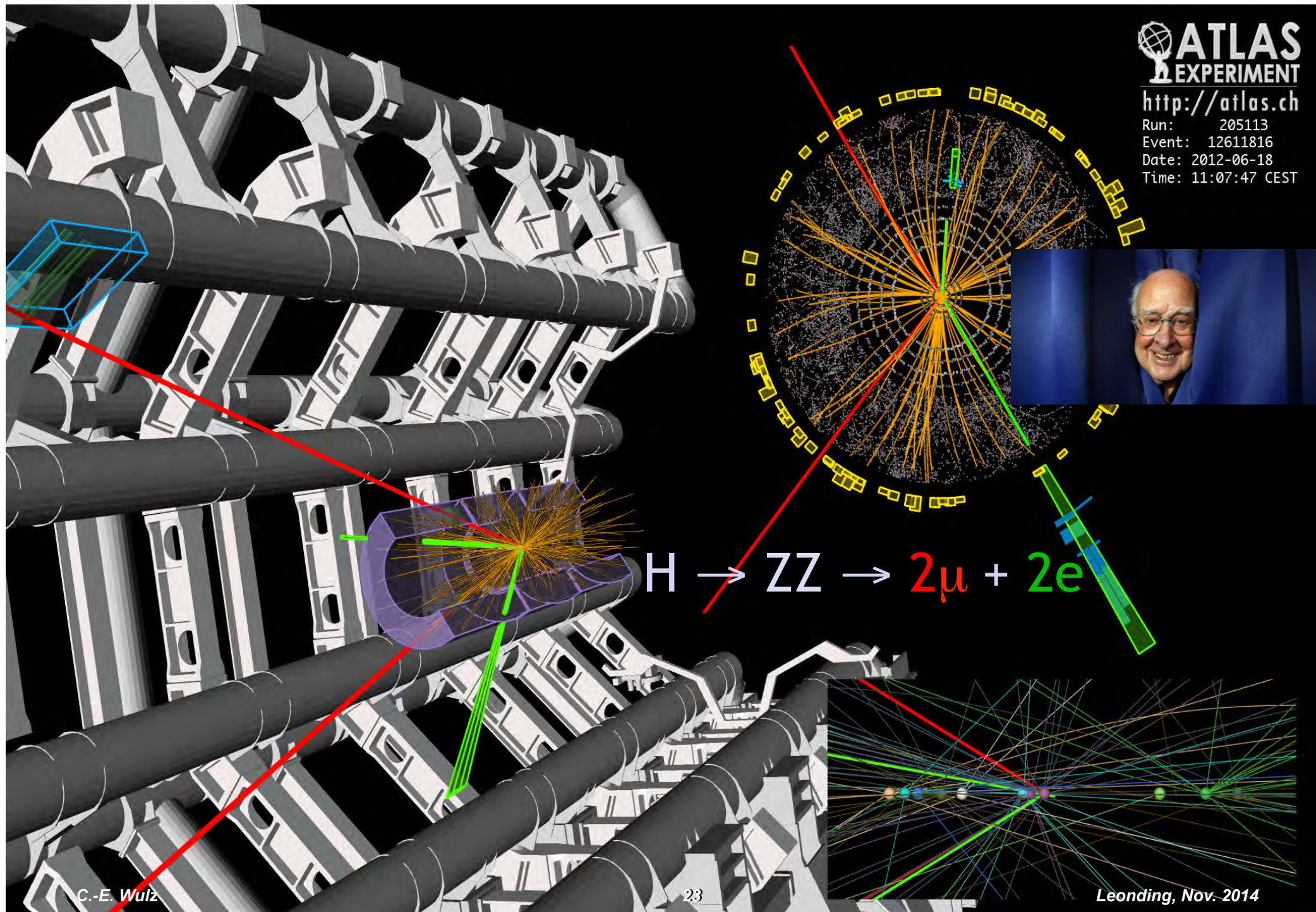


# ATLAS-Experiment



# Masse des Higgs-Bosons ( $\approx 125$ GeV )







10. Dez. 2013  
Stockholm



“for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.”





# Ungelöste (und ein gelöstes) Rätsel

✓ ? Warum hat das Universum Substanz? -> Higgs-Teilchen

• Woraus besteht das Universum? -> Wir kennen nur 5% (Atome), Rest ist dunkle Materie und dunkle Energie.

• Wie muss das Standardmodell der Teilchenphysik erweitert werden? -> Supersymmetrie, Stringtheorie, zusätzliche Raumdimensionen? Gibt es eine "Weltformel"?



# Dunkle Materie

Ein Vergleich der **Rotationsgeschwindigkeiten** von Sternen nahe dem Zentrum von Spiralgalaxien und weiter außen liegenden Sternen ergibt, daß die Geschwindigkeiten weiter außen nicht mit den Gesetzen der Mechanik kompatibel sind.



Fritz Zwicky

Auch müssten aufgrund der hohen **Temperatur** viele Sterne auseinander fallen, wenn nicht zusätzlich zur sichtbaren Masse noch Masse aus dunkler Materie vorhanden wäre.



Vera Rubin



## Erster direkter Nachweis der dunklen Materie

Die normale Materie (rot, emittiert Röntgenlicht) wurde abgebremst, während die dunkle Materie (blau, durch Gravitationslinseneffekt bestimmt) bei der Kollision der beiden Galaxienhaufen sich ungehindert weiterbewegen konnte.

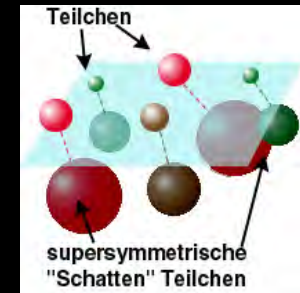


Kollision von zwei Galaxienhaufen im Bullet Cluster (2006)

## Was ist die dunkle Materie ?

WIMPS (weakly interacting massive particles),  
MACHOS (massive astrophysical compact halo  
objects), ... ?

Supersymmetrie sagt ein Teilchen voraus, das  
ein WIMP sein könnte: das leichteste **Neutralino**



MACHOS sind astronomische Objekte aus normaler  
Materie wie:

**Braune und weiße Zwerge** (z.B. Supernovae Ia)

**Neutronensterne** (Kollaps nach Supernova-Explosion)

**Schwarze Löcher**

... **Verbindung von Astrophysik und Teilchenphysik!**



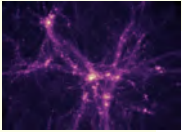
# AMS auf der ISS



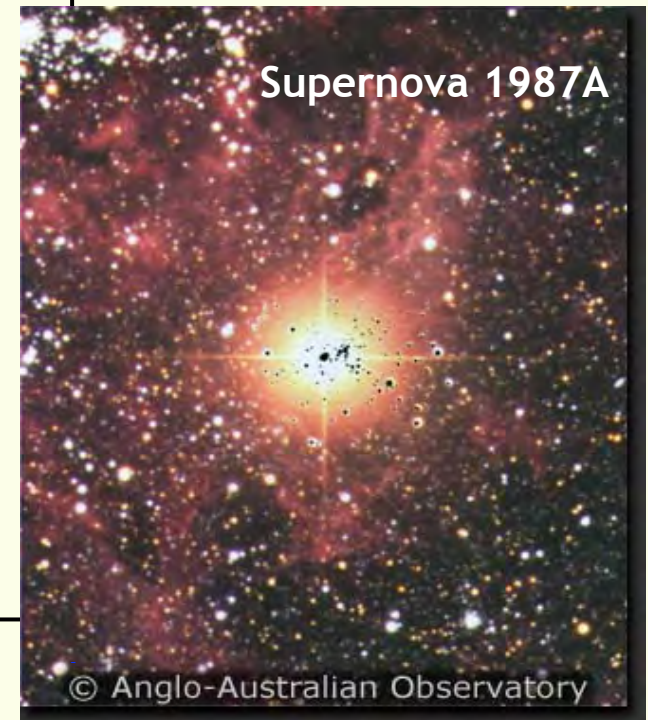
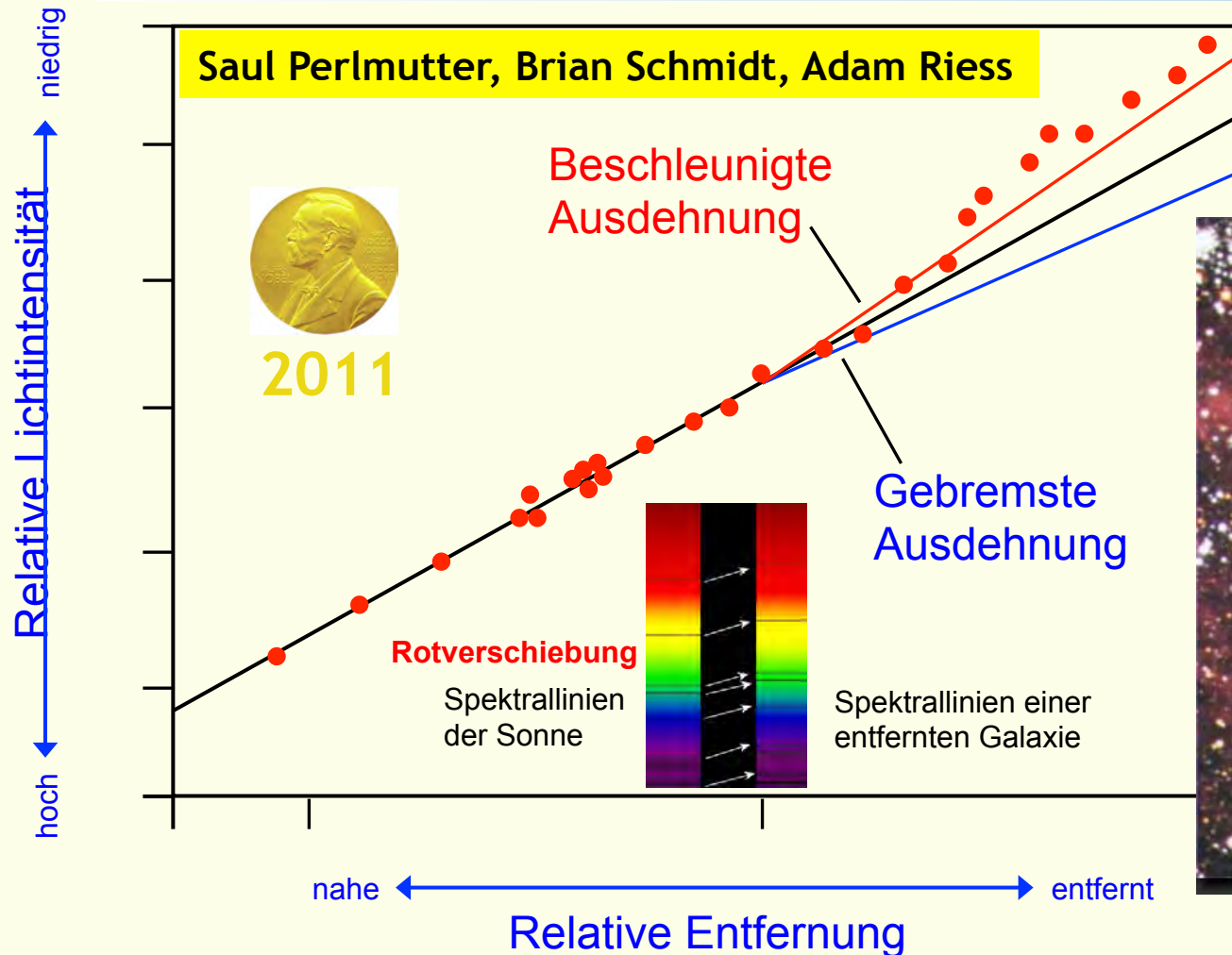
C.-E. Wulz

29

29  
Leonding, Nov. 2014



# Entdeckung der dunklen Energie (1998)

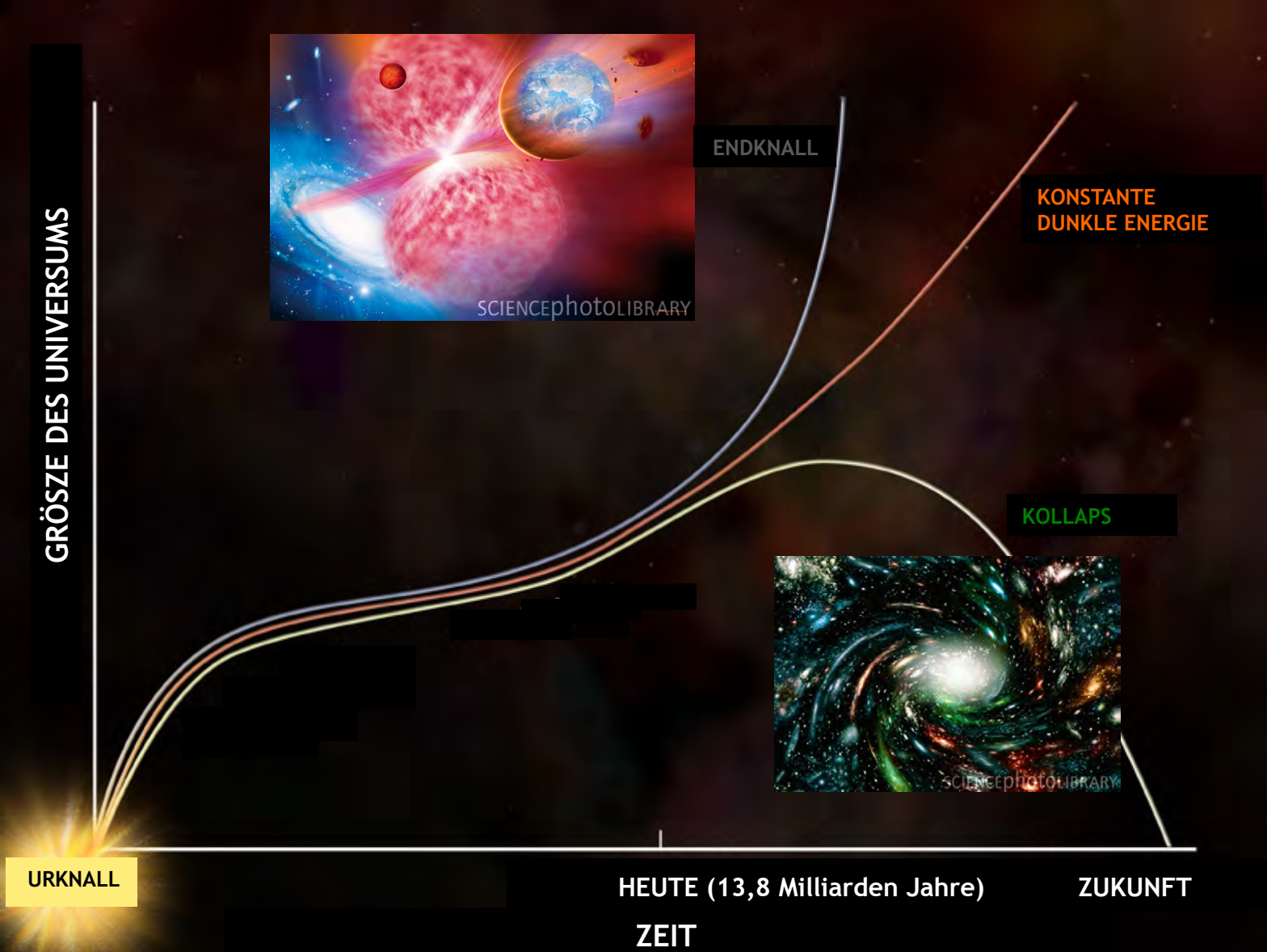


**Beobachtungen von Supernovae ergaben, dass eine mysteriöse Kraft - dunkle Energie - das Universum immer schneller auseinander treibt!**

# DARK ENERGY SURVEY

Cerro Tololo, Chile

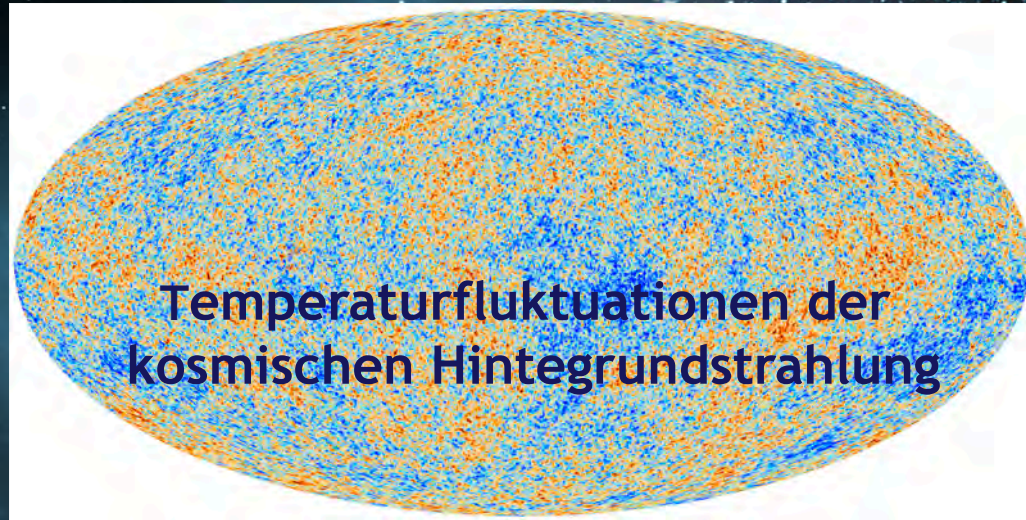
# Entwicklung des Universums



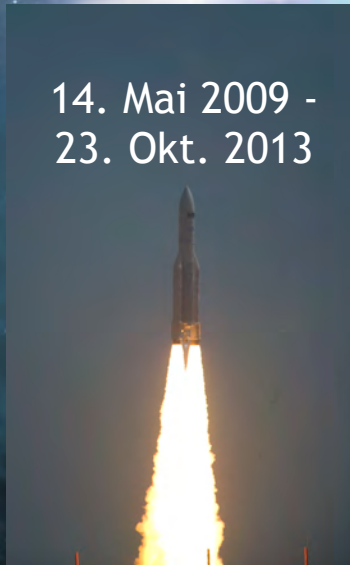




# Planck-Satellit

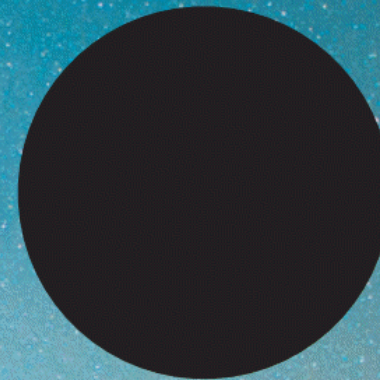


14. Mai 2009 -  
23. Okt. 2013

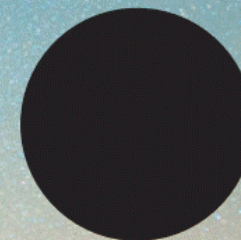


# ■ Bausteine des Universums

Dunkle Energie 68,3%



Dunkle Materie 26,8%



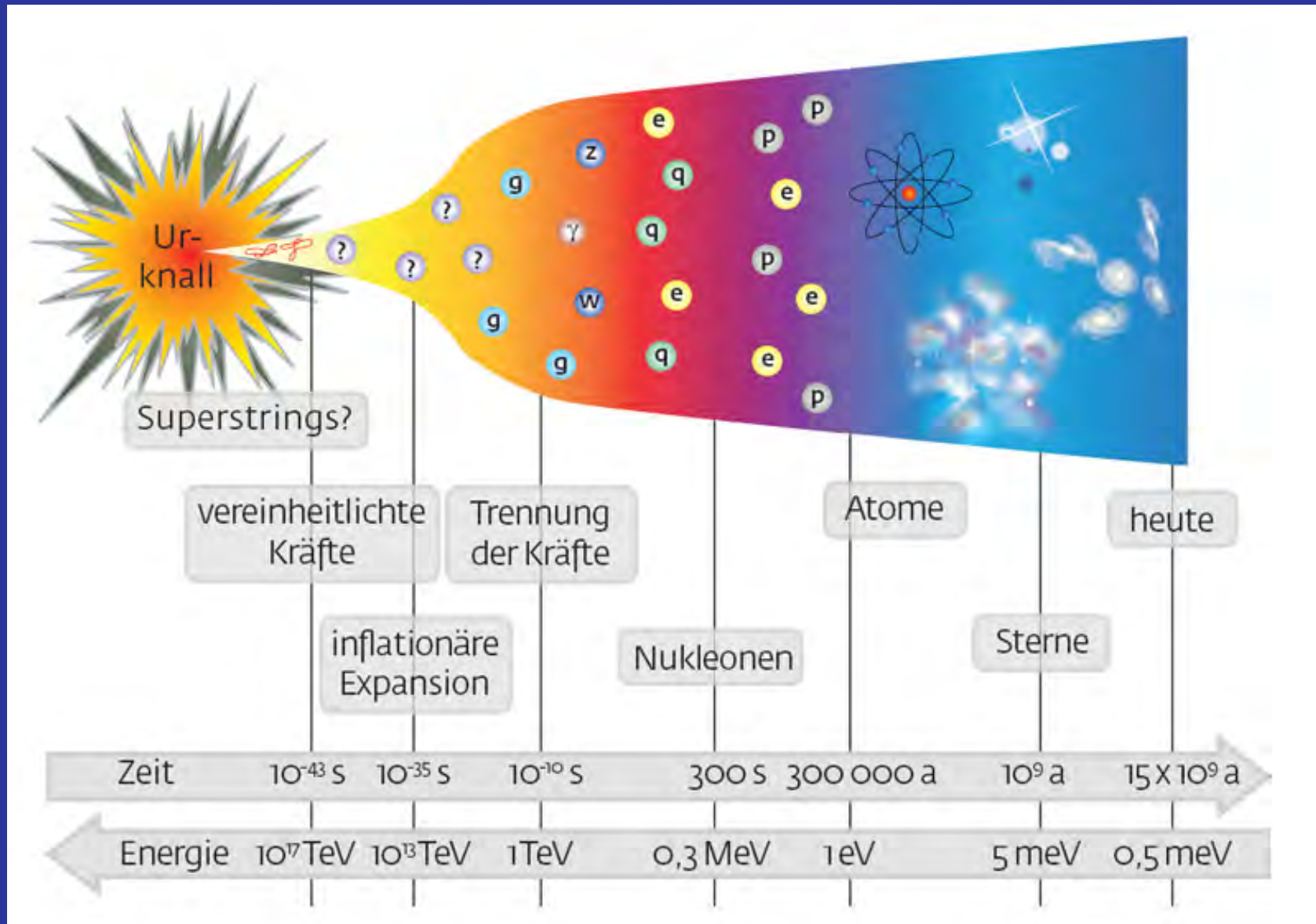
Sichtbare Materie 4,9%



BZ-GRAFIK/DRE

QUELLE: GEO

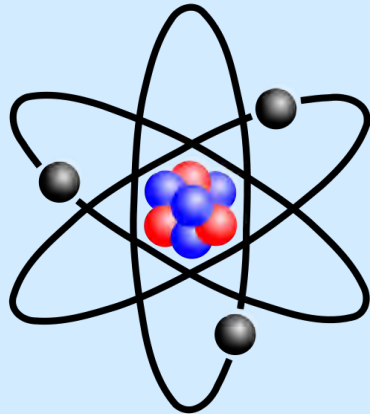
# Geschichte des Universums





# Quantentheorie

Die Teilchenphysik folgt den Gesetzen der **Quantentheorie**.  
Diese hat viele Anwendungen (z.B. Laser, Quantencomputer?)



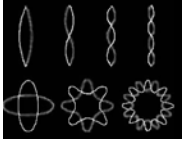
Klassisches Bild: Elektronen bewegen sich auf **festen Bahnen** um den Atomkern, und sie können alle möglichen Energien haben.



Quantentheoretisches Bild: Elektronen haben bestimmte **Aufenthaltswahrscheinlichkeiten**, sie können nur bestimmte (diskrete) Energiewerte haben.

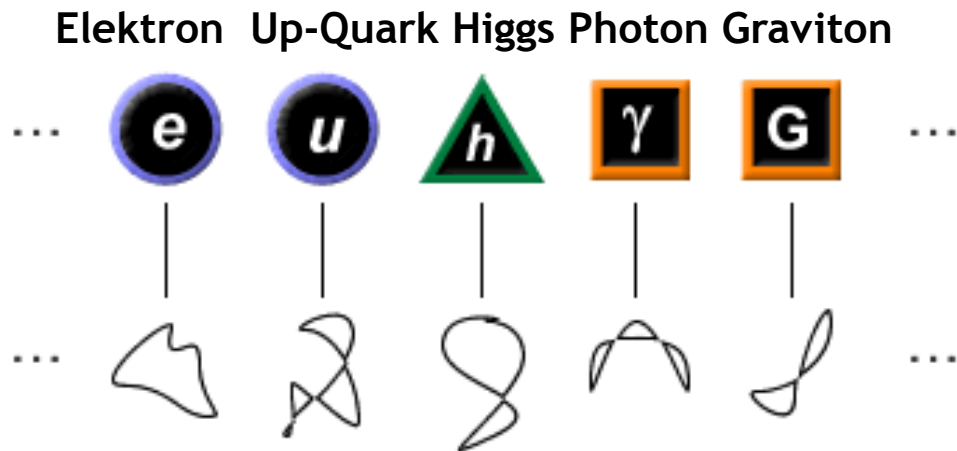
**Jedoch:**

**Die Gravitation passt nicht in die quantenmechanische Welt!**



# Stringtheorie

Die **Stringtheorie** vereint alle Teilchen und alle Kräfte (auch die Gravitation) in einem einzigen Objekttyp, dem **String**. Wie Saiten können Strings verschieden vibrieren.



Kurz nach dem Urknall war die Materie auf kleinstem Raum vereint und die Kräfte waren alle gleich. Stringtheorie ist nötig, wenn wir wissen wollen, was bei ca.  $10^{-43}$  s nach dem Urknall geschah.

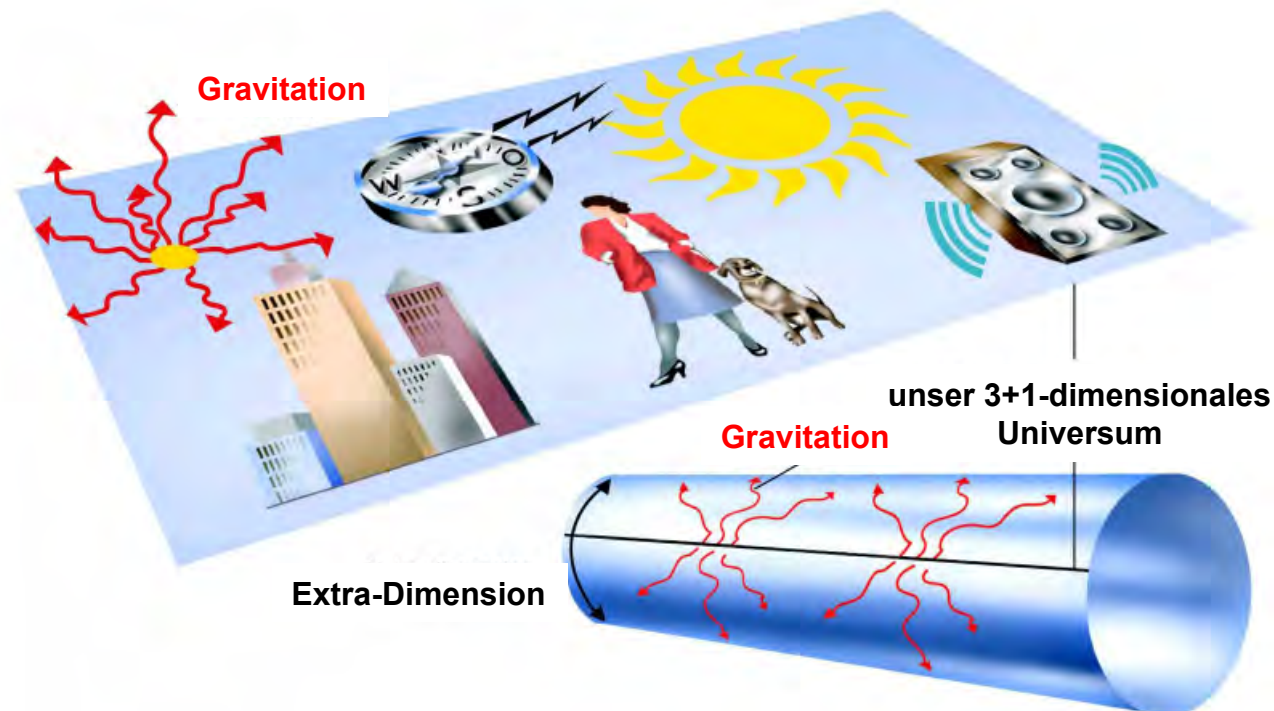


# Gravitation und Extradimensionen

Gravitation scheint  $10^{-38}$  mal so schwach im Vergleich zur starken Wechselwirkung -> schwer vereinbar mit anderen Kräften!

Mögliches Modell:

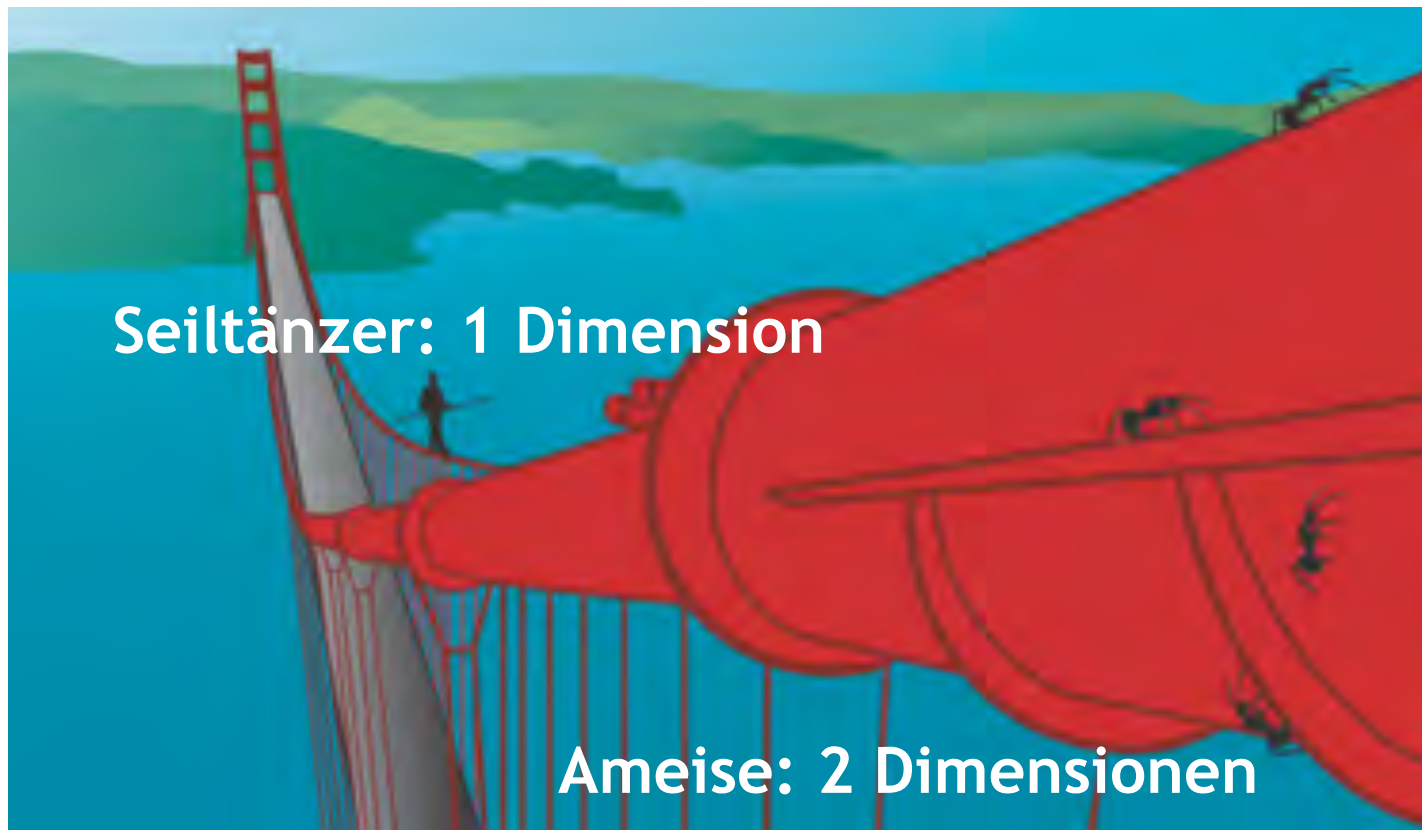
- Bekannte Teilchen leben im 3+1-dimensionalen Universum (Brane)
- **Gravitation lebt in einem höherdimensionalen Universum (Bulk)**
- Extra-Dimensionen sind aufgerollt mit Radius R





## Extradimensionen

Unser bekanntes Universum: 3 Raumdimensionen + 1 Zeitdimension  
Stringtheorie: mindestens 9 + 1 Dimensionen



**2. Dimension: aufgerollt**

# Schwarze Löcher

Wenn die Gravitation bei kleinen Distanzen stark wird, kann der LHC auch (Mini-) Schwarze Löcher ( $\emptyset 10^{-18}\text{m}$ ) produzieren!

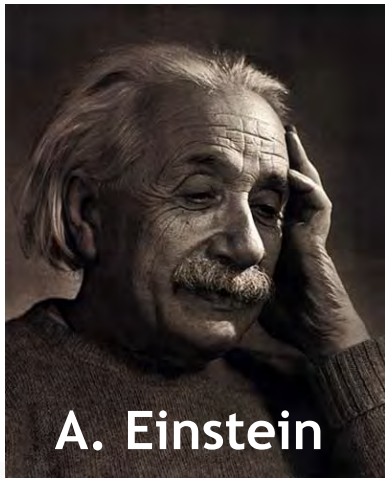
Sie sollten jedoch durch quantenmechanische Effekte sehr schnell ( $\sim 10^{-35}\text{ s}$ ) verdampfen (Hawking-Strahlung), unter Erzeugung aller möglichen Standardmodellteilchen.  
Bisher wurden jedoch keine Schwarzen Löcher gefunden.





# Grundlagenforschung

Sie war stets eine Voraussetzung für technischen Fortschritt!

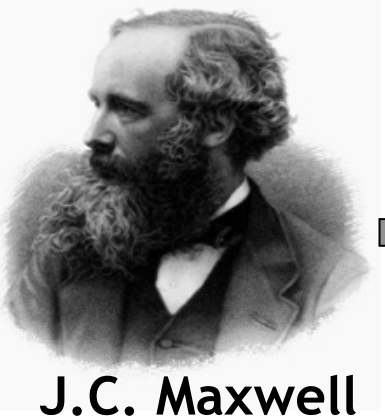


A. Einstein

→ Relativitätstheorie →



100% Grundlagenforschung



J.C. Maxwell

→ Elektromagnetismus →





# Medizinische Anwendungen der Teilchenphysik

## Beschleuniger

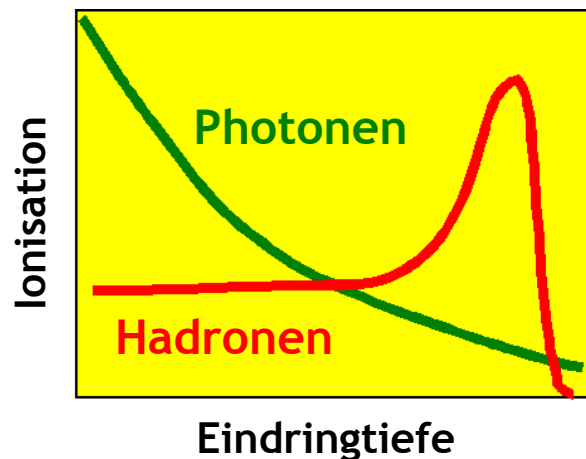


Entwicklung in physikalischen Labors, Nutzung in medizinischen Einrichtungen. Etwa 9000 der 17000 Beschleuniger auf der Welt werden für die Medizin genutzt.

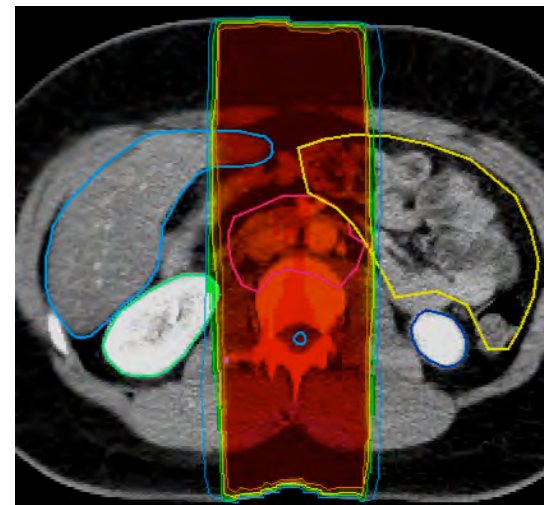
**Ionentherapiezentrum Heidelberg**

# Ionentherapie

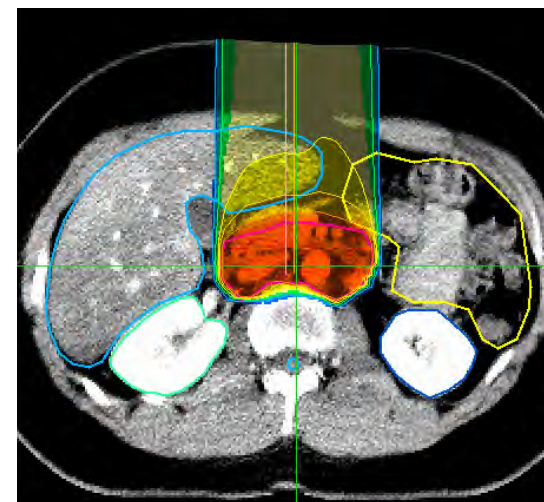
- Vorteile gegenüber Bestrahlung mit Elektronen oder Photonen (Röntgenstrahlung)
- Hadronen (z.B. Protonen, Kohlenstoffionen) schädigen gezielt Tumorgewebe und verschonen gesundes Gewebe vor dem Tumor (z.B. Rückenmark)



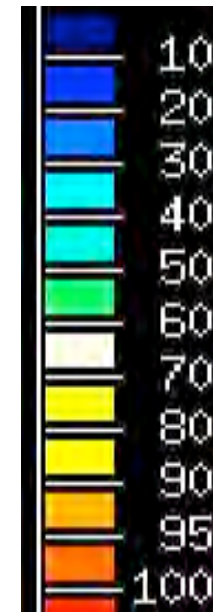
Photonen

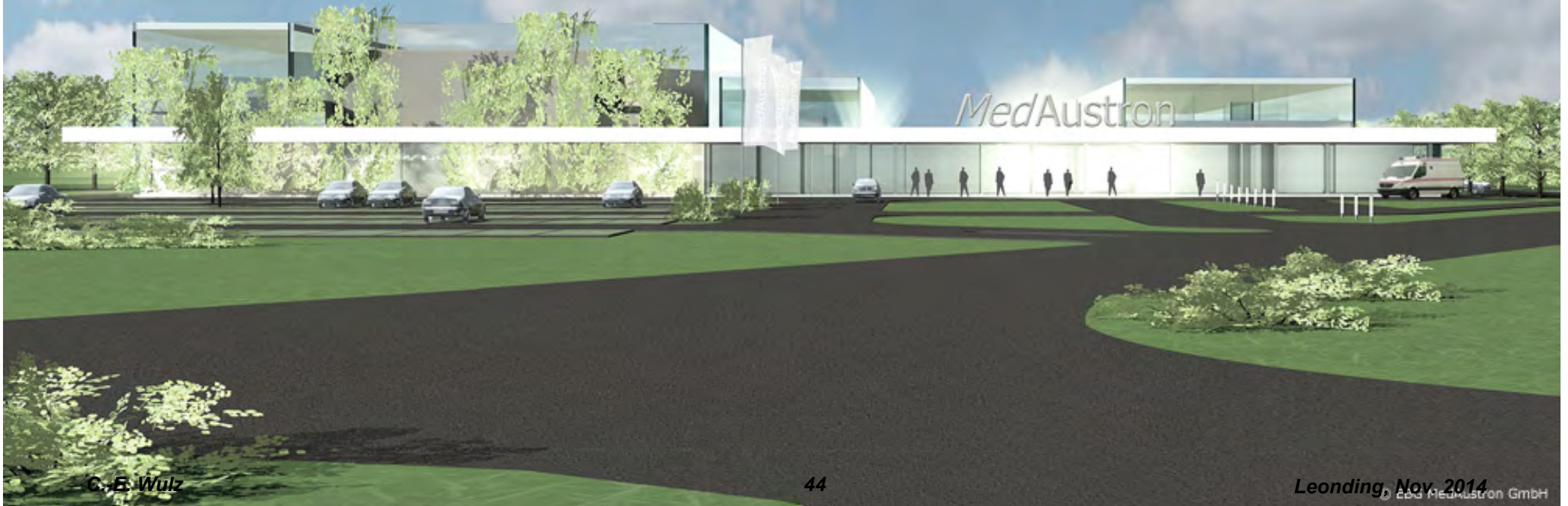
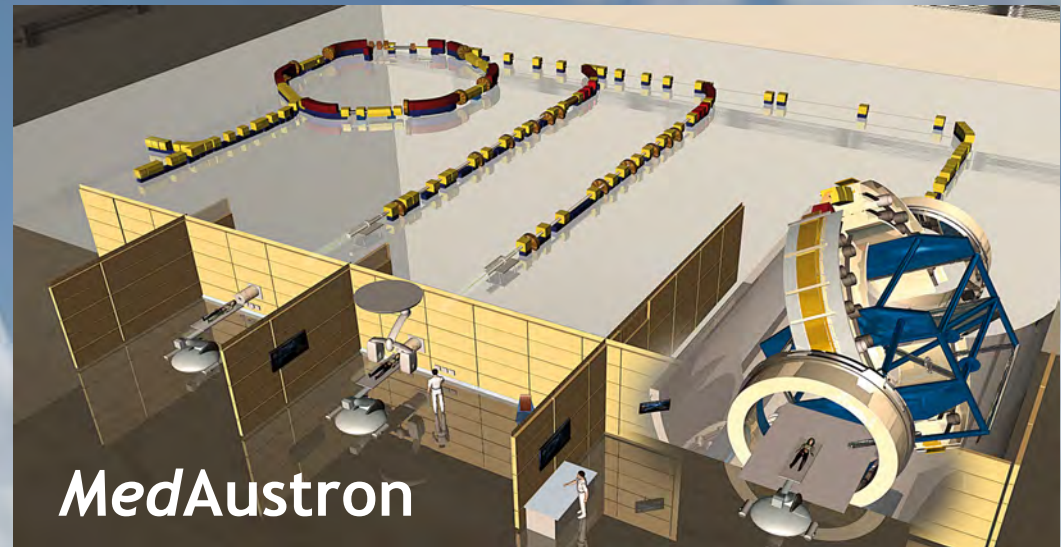


Kohlenstoff-Ionen

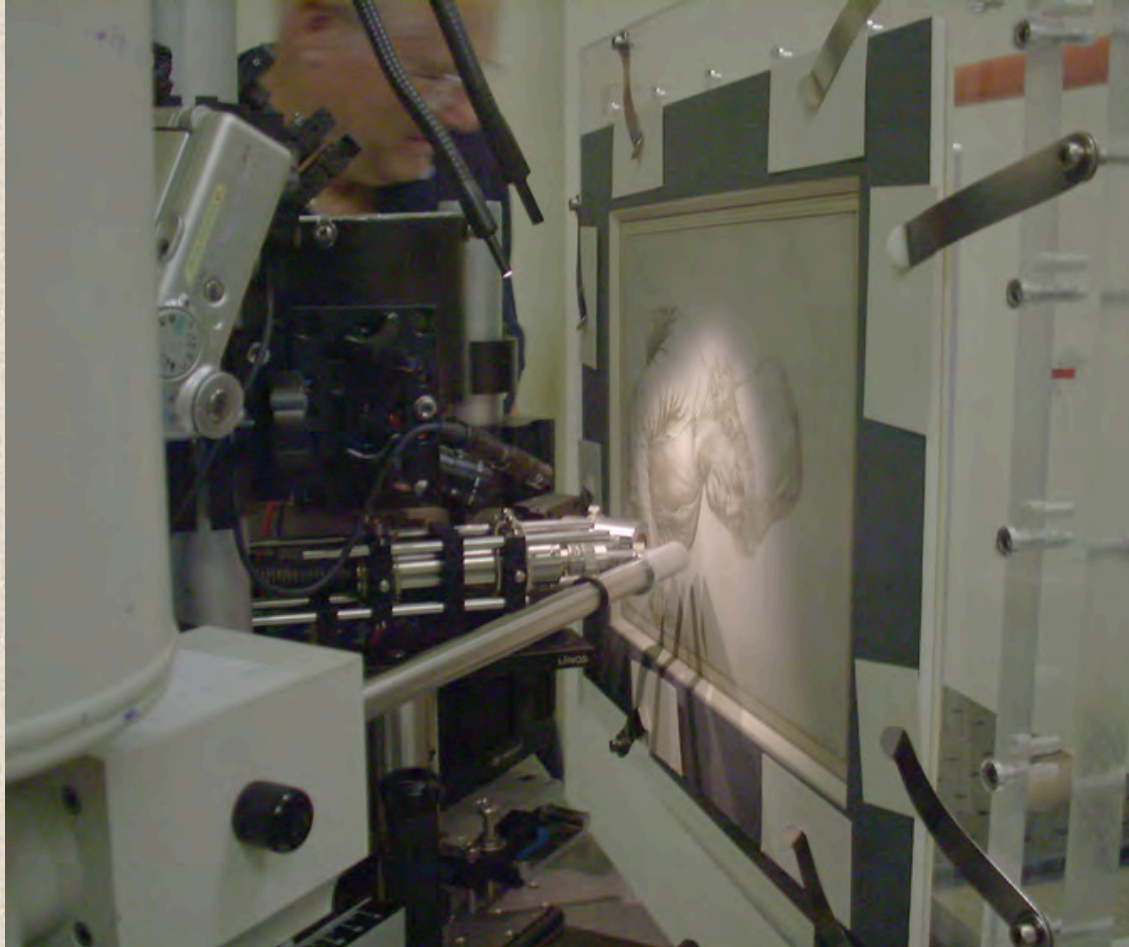


Dosis (%)





## PIXE (Proton Induced X-Ray Emission)



Porträt des Vaters  
des Künstlers

Untersuchung von Silberstiftzeichnungen Albrecht Dürers an der Universität Wien in Zusammenarbeit mit der Albertina und dem Louvre.

## Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten wurde das Verständnis der Physik entscheidend verbessert.

Jedoch ... viele Antworten auf fundamentale Fragen fehlen noch!

Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie müssen gemeinsam zu ihrer Beantwortung beitragen.

Der Large Hadron Collider ist ein wichtiges Werkzeug. Mit ihm werden Bedingungen bis kurz nach dem Urknall reproduziert.

**WIR LEBEN IN INTERESSANTEN ZEITEN!**