



Von den kleinsten Teilchen bis zum Kosmos

HTL Braunau
16. Mai 2022

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

The background is a deep space scene filled with various galaxies, including spiral and elliptical ones, set against a dark, star-filled sky. In the center, a magnifying glass is positioned, its lens focusing on a cluster of colorful particles (red, purple, green, and blue spheres) that represent subatomic particles. The handle of the magnifying glass extends downwards from the lens.

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

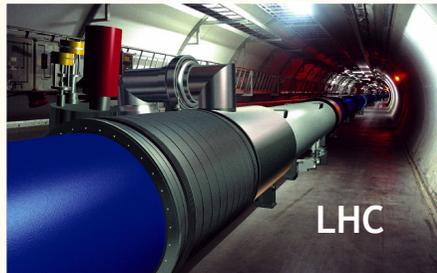
Wie trägt die Teilchenphysik bei?
Was bringt uns diese Forschung?

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

Anlagen zur Beantwortung dieser Fragen

Teilchenbeschleuniger

z.B. LHC, RHIC, KEK-B



Undergrundlaboratorien

z.B. Gran Sasso, Kamiokande



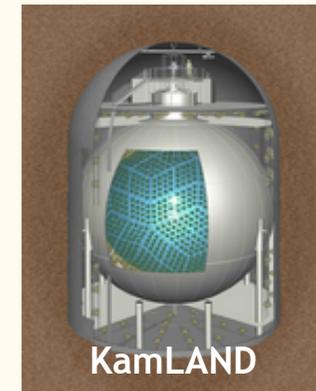
Experimente mit kosmischen Strahlen

z.B. Auger, IceCube



Experimente an Kernreaktoren oder mit radioaktiven Quellen

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



Terrestrische Teleskope

z.B. ALMA, VLT



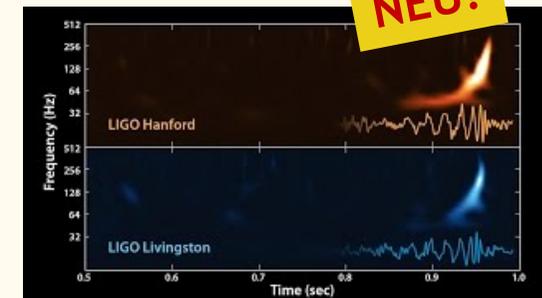
Raumsonden

z.B. Hubble, Planck



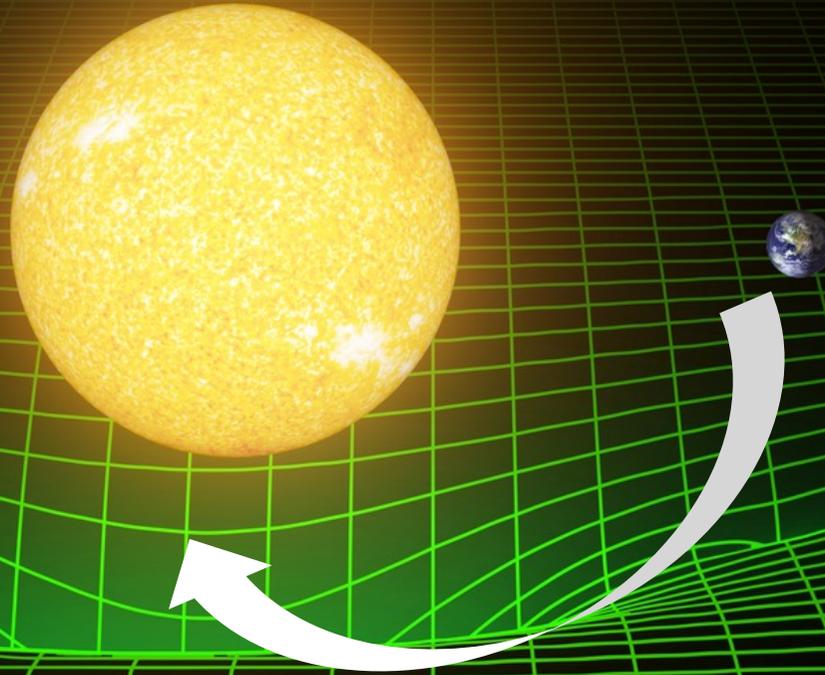
Gravitationswellenexperimente

z.B. LIGO



Allgemeine Relativitätstheorie - Einstein

Krümmung der Raumzeit

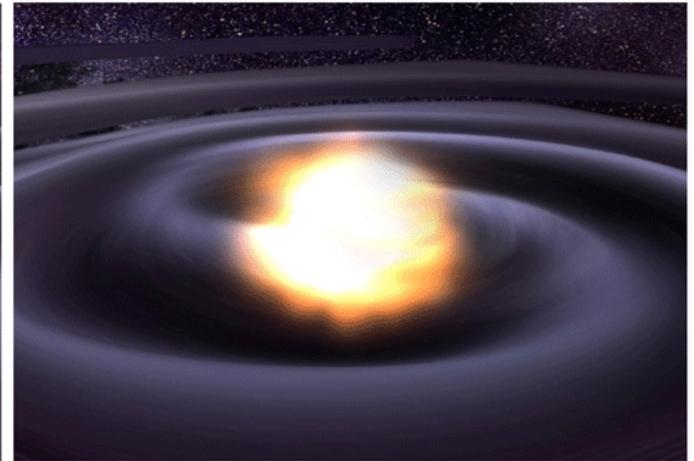
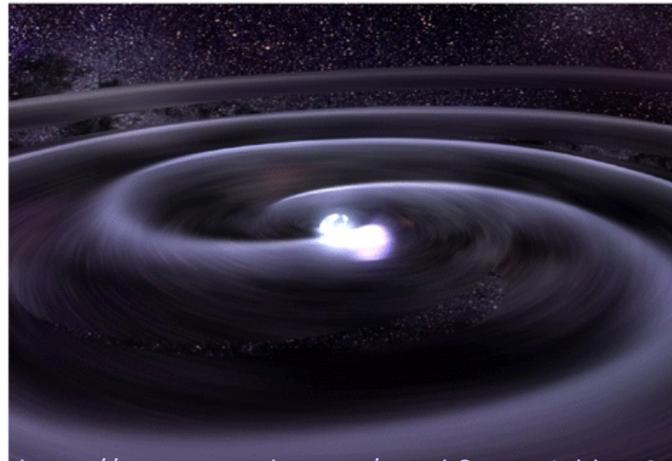
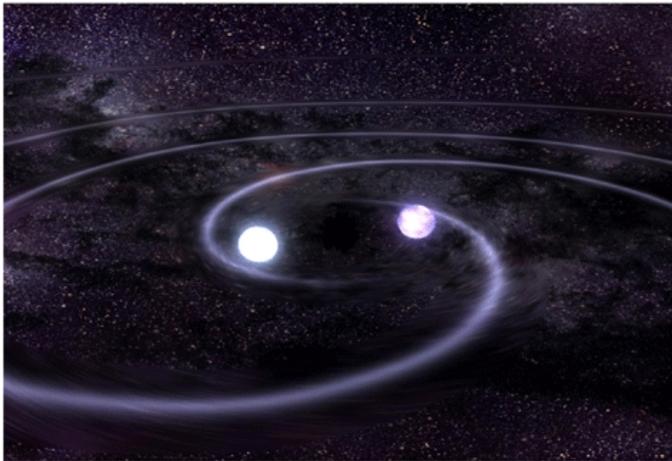


Gravitationswellen - eine neue Ära der Physik

Erforschung der gewaltigsten Ereignisse im Universum

- ohne Aussendung von Licht

- Verschmelzung von Neutronensternen, weißen Zwergen ...
- Schwarze Löcher, die einander auffressen ...



<https://www.youtube.com/watch?v=tUpiohbBv6o>



Nachweis von Gravitationswellen Laserinterferometer



LIGO-Hanford (USA)



KAGRA-Kamioka
(Japan)

Längenänderung:
ca. 10^{-18} m/km



VIRGO-Cascina (Italien)

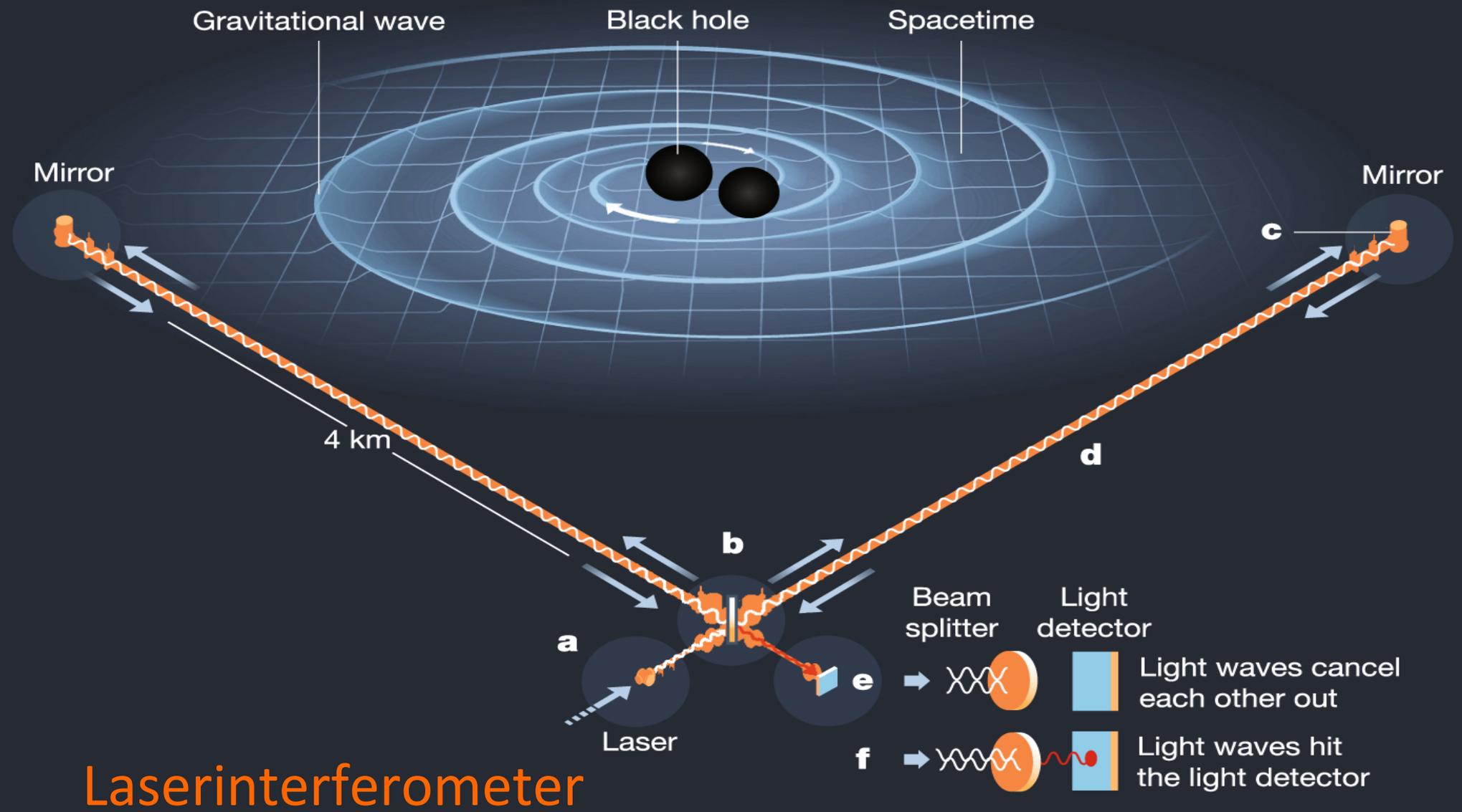


LIGO-Livingston (USA)



2017

Rainer Weiss
Barry Barish
Kip Thorne



Laserinterferometer

Neues über Schwarze Löcher

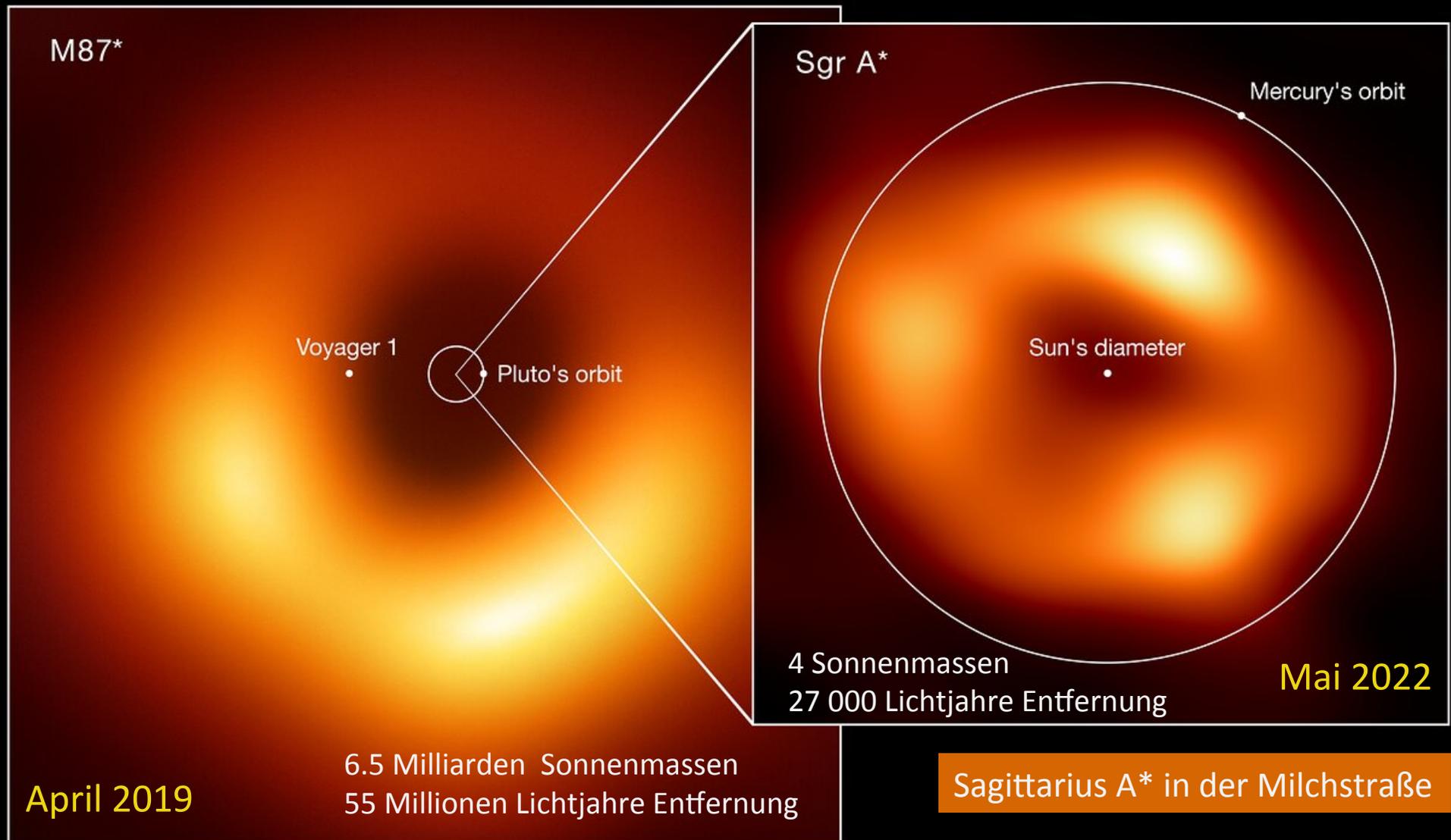
- Event Horizon Telescope (EHT)
 - **Roger Penrose**: Allgemeine Relativitätstheorie erlaubt sie
 - **Rainer Genzel, Andrea Ghez**: Nachweis mit Radioteleskopen (230 GHz) von Sagittarius A* in der Milchstraße



Nobel Prize in Physics 2020

Andrea Ghez (USA, left), Reinhard Genzel (GER, centre), and Roger Penrose (UK, right), share the Nobel Prize for their discoveries about one of the most exotic phenomena in the universe, the black hole

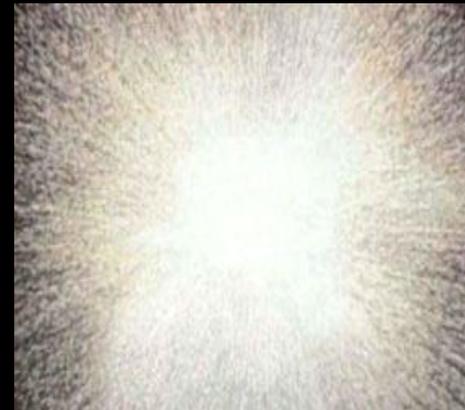
Erste Abbildungen von schwarzen Löchern



Wie und wann ist das Universum entstanden?

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

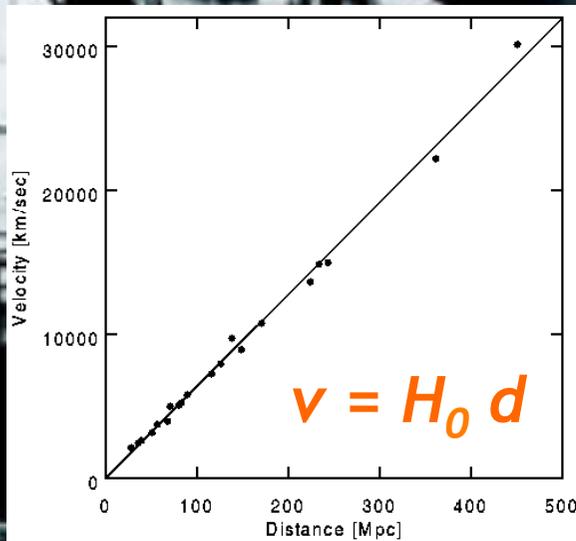
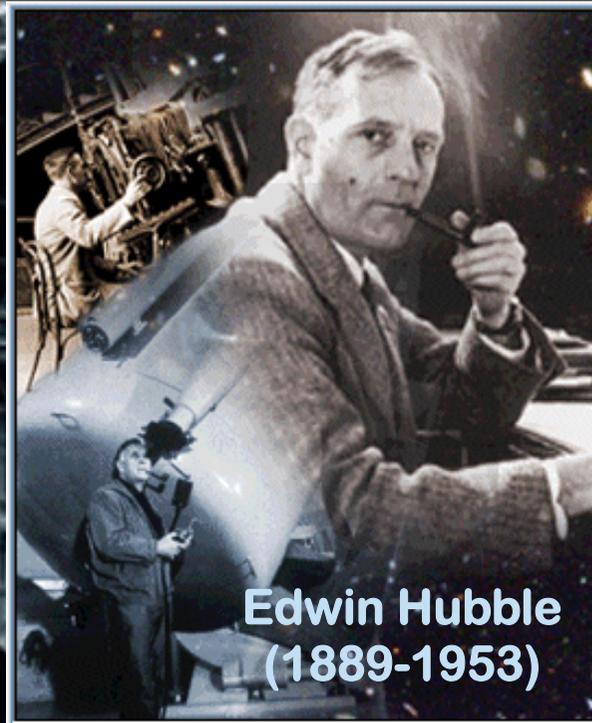
Seither dehnt es sich aus und kühlt sich ab.



Woher wissen wir das?

Ursprünglich aus Beobachtungen von Galaxien

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



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:

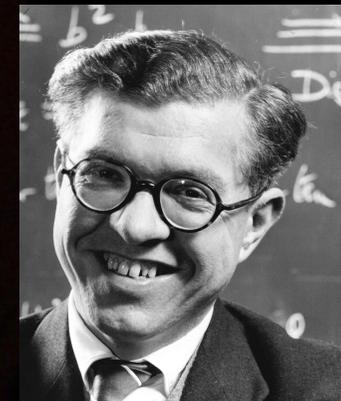
Das Universum begann in einem Punkt

Big Bang

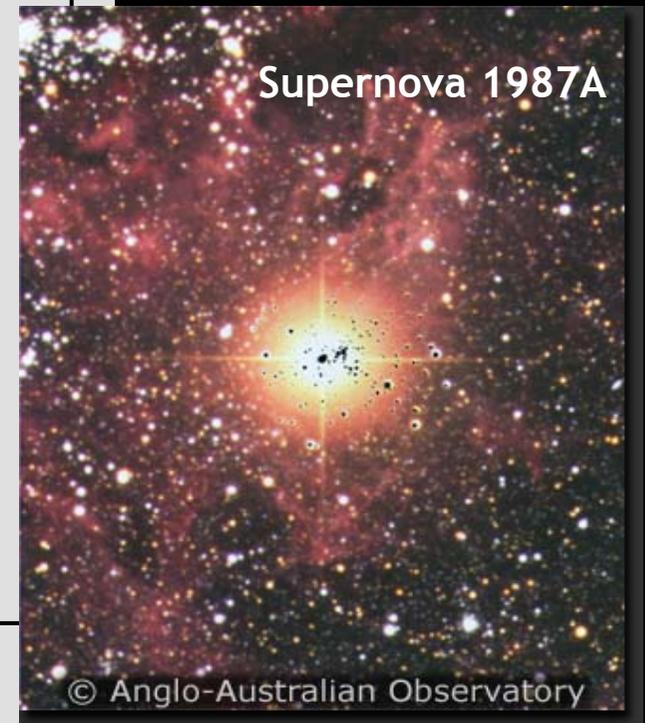
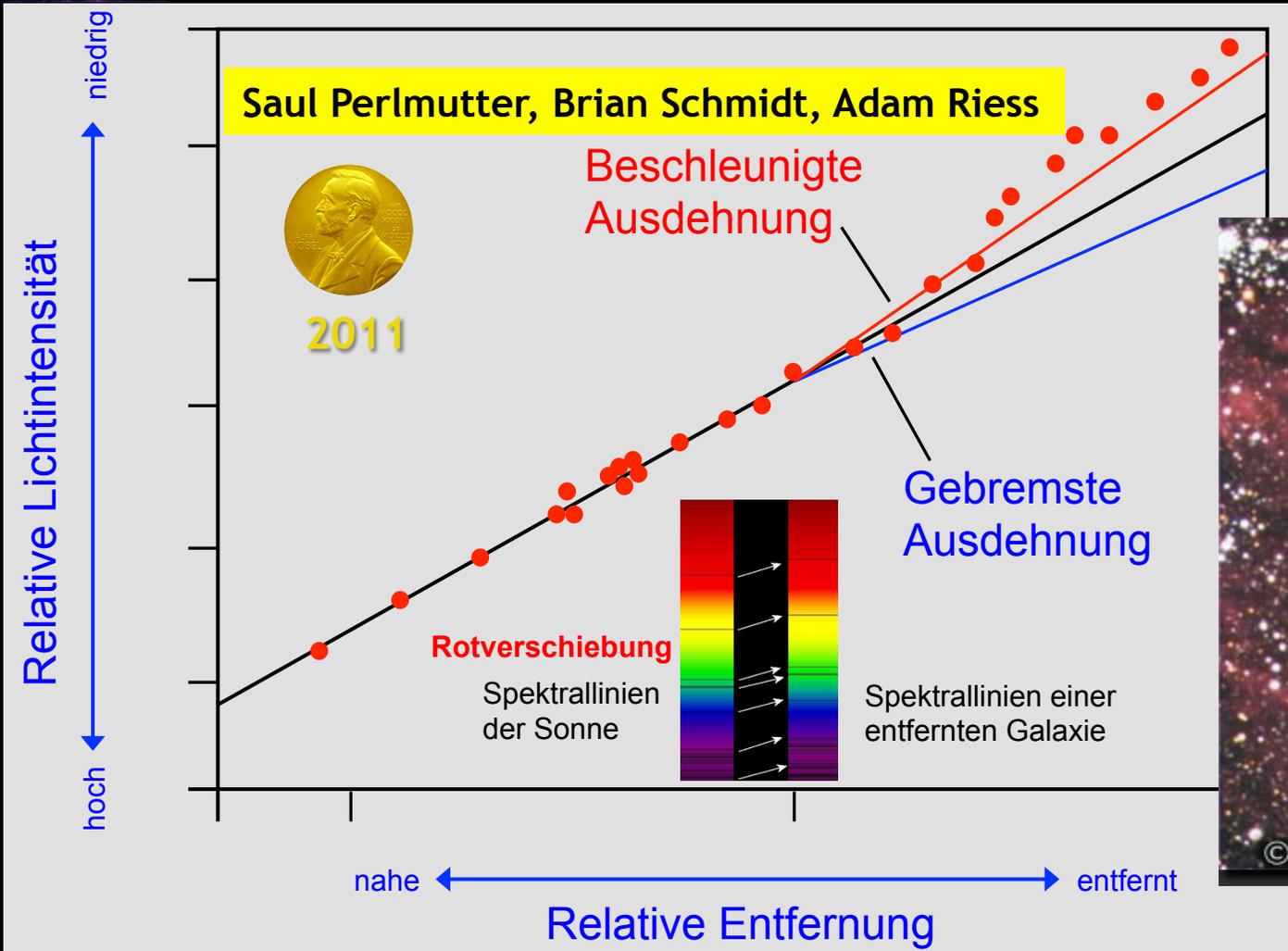


Albert Einstein,
Georges Lemaître

Fred Hoyle

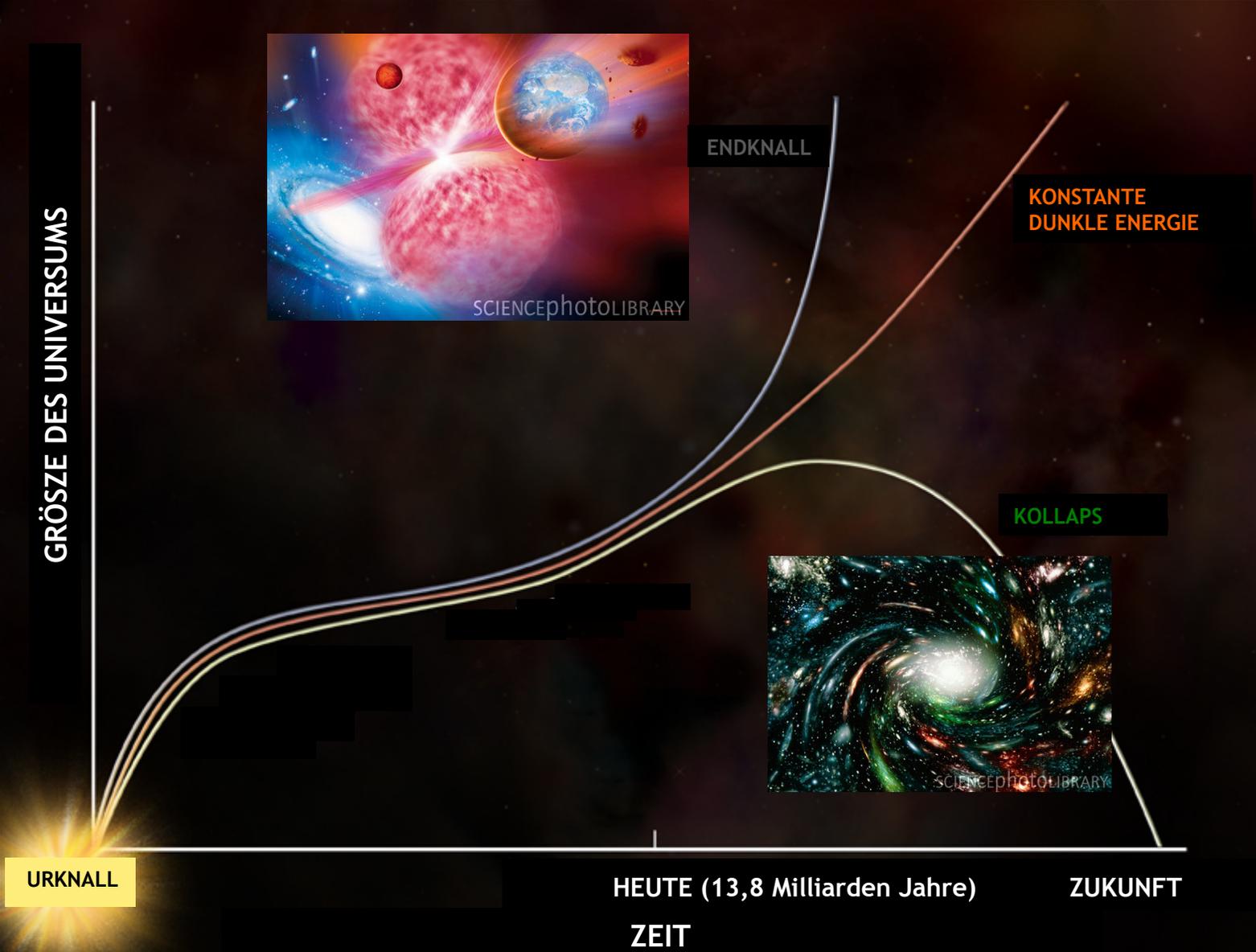


Entdeckung der dunklen Energie 1998

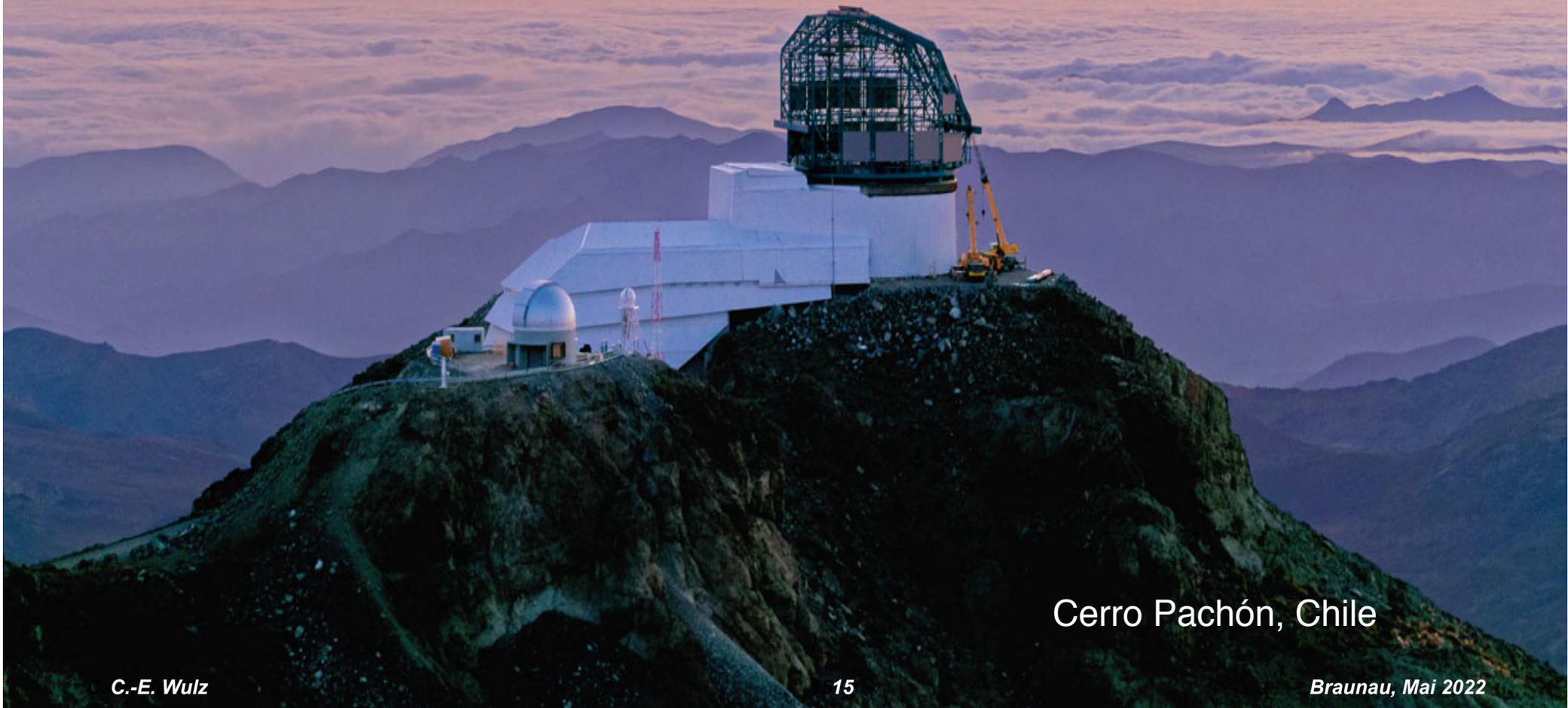


Beobachtungen von Supernovae ergaben, dass eine mysteriöse Kraft - dunkle Energie - das Universum immer schneller auseinander treibt!

Entwicklung des Universums



Vera Rubin Observatorium



Was sind die Bestandteile des Universums?

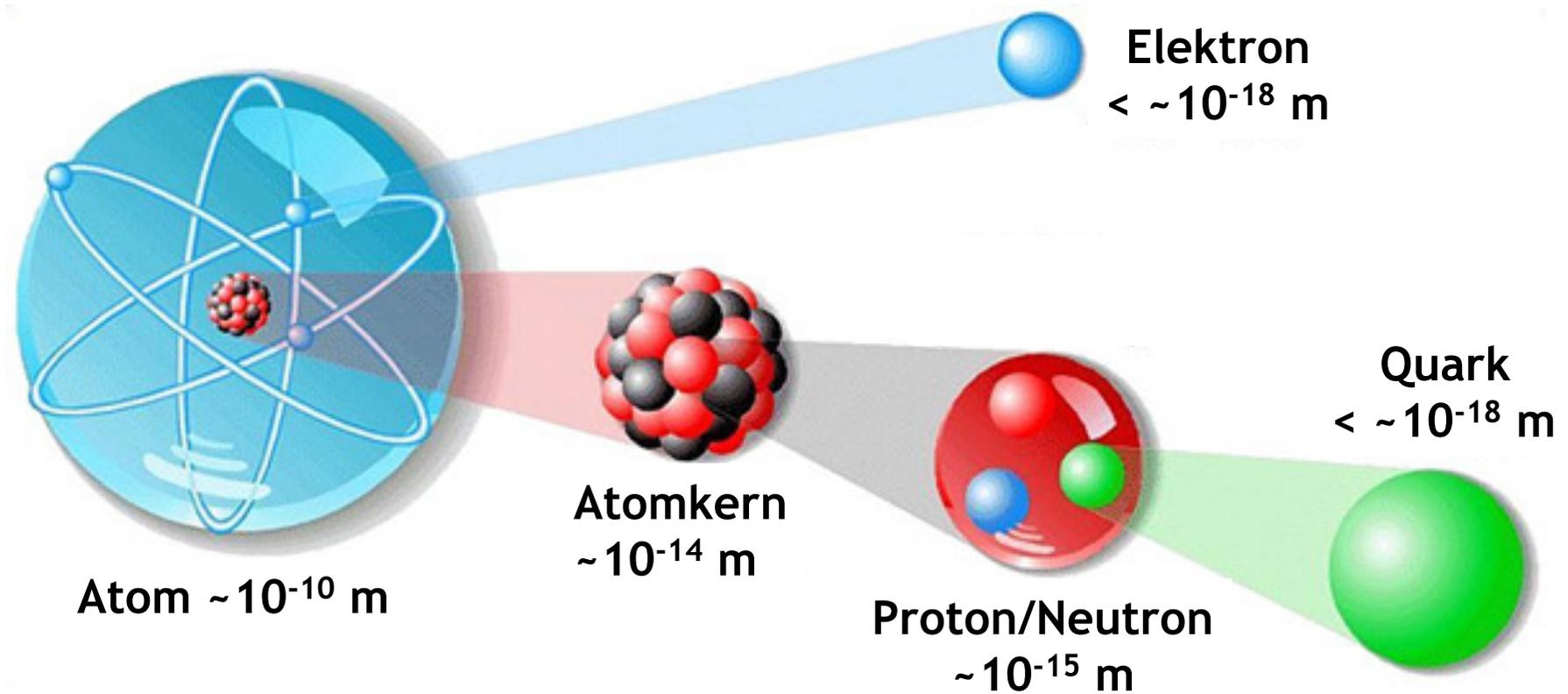
Normale Materie (Atome, “baryonische Materie”): Quarks, Leptonen
Dunkle Materie
Dunkle Energie

Welche Kräfte herrschen im Universum?

Schwerkraft
Elektromagnetische Kraft
Starke Kraft (Kernkraft)
Schwache Kraft

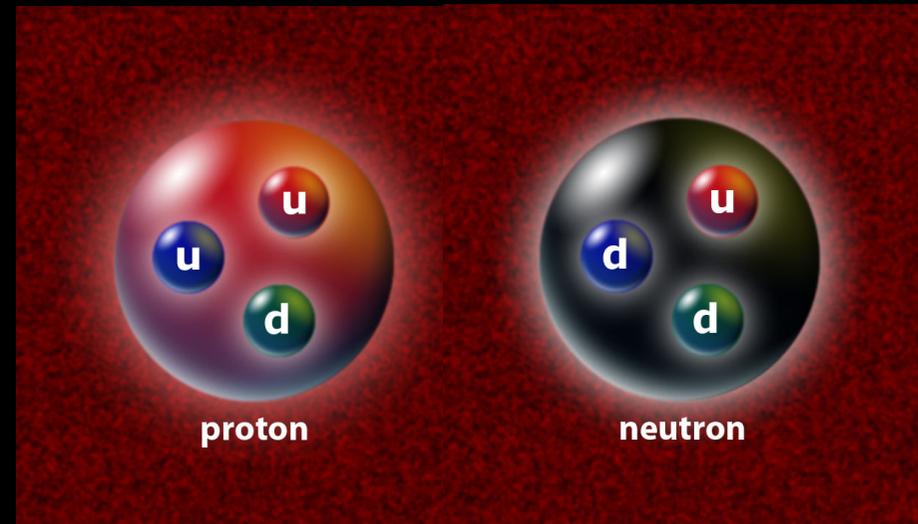
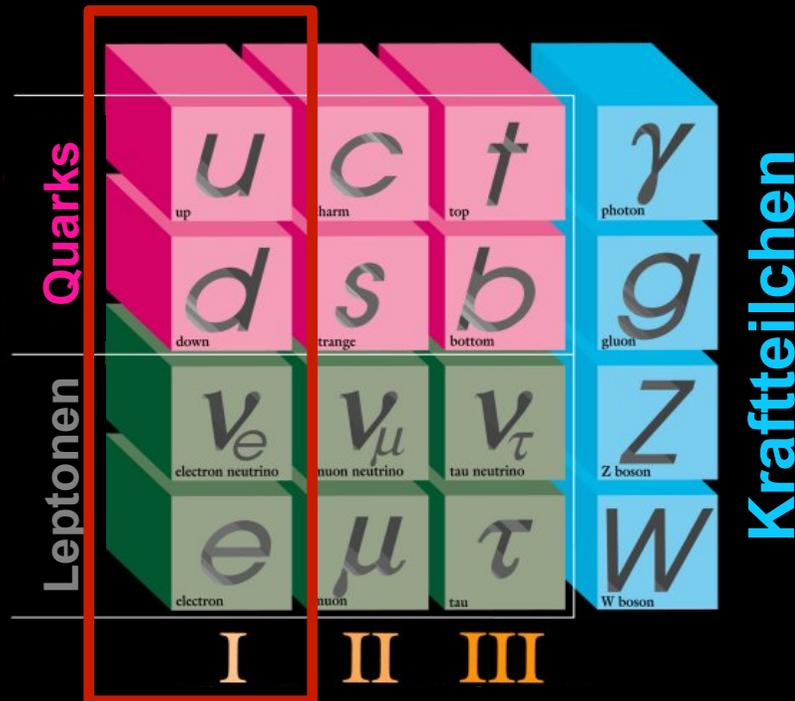
Kräfte werden durch Austausch von Teilchen (Bosonen) vermittelt.

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™



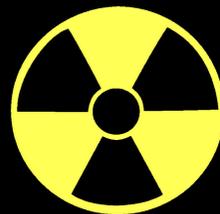
Der LHC ist eine Zeitmaschine,
genau so wie Teleskope oder
Raumsonden!

LICENSED BY:
Nintendo THE SOFTWARE TOOLWORKS

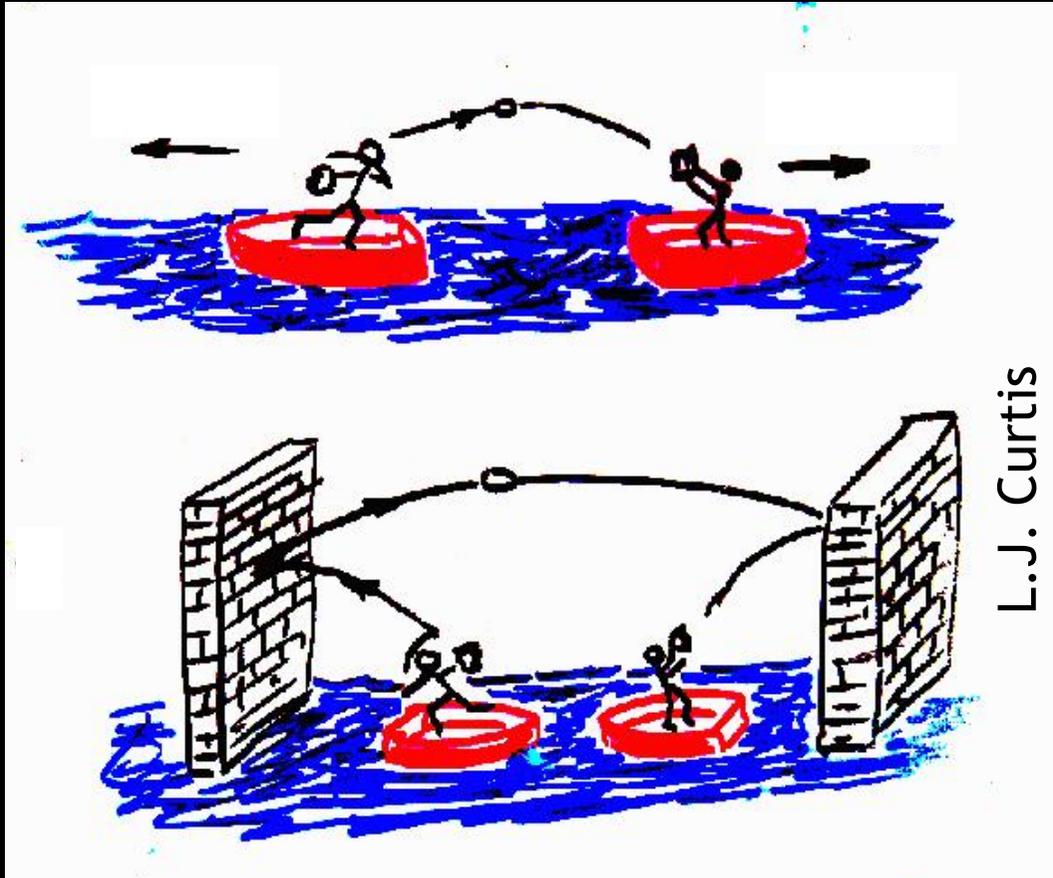
C: E: Wulz

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



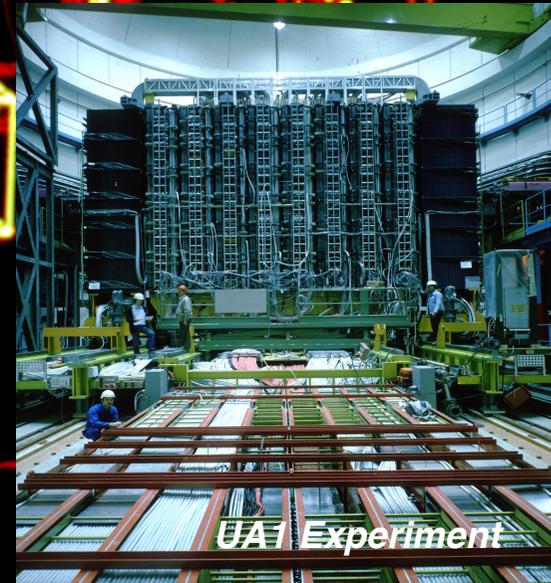
Teilchenaustausch ist für Kraft verantwortlich.

Entdeckung der W und Z am CERN

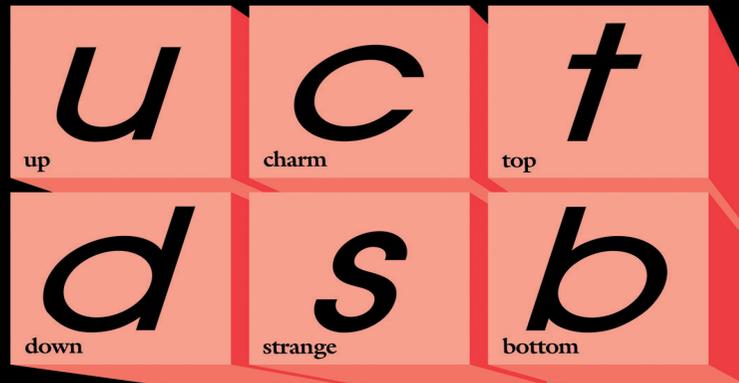
Zerfall eines Z-Teilchens in 2 Elektronen



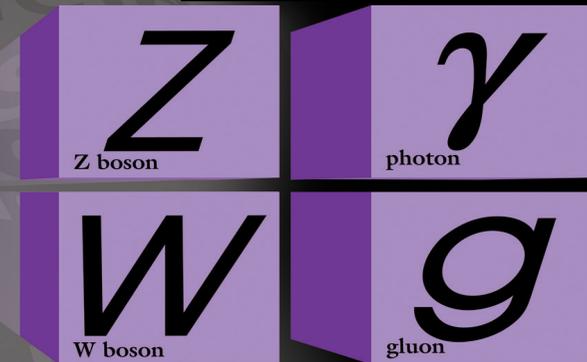
1984
Carlo Rubbia



Quarks



Kraftteilchen



Leptonen

Standardmodell

Erzeugung von Masse durch Higgs-Mechanismus

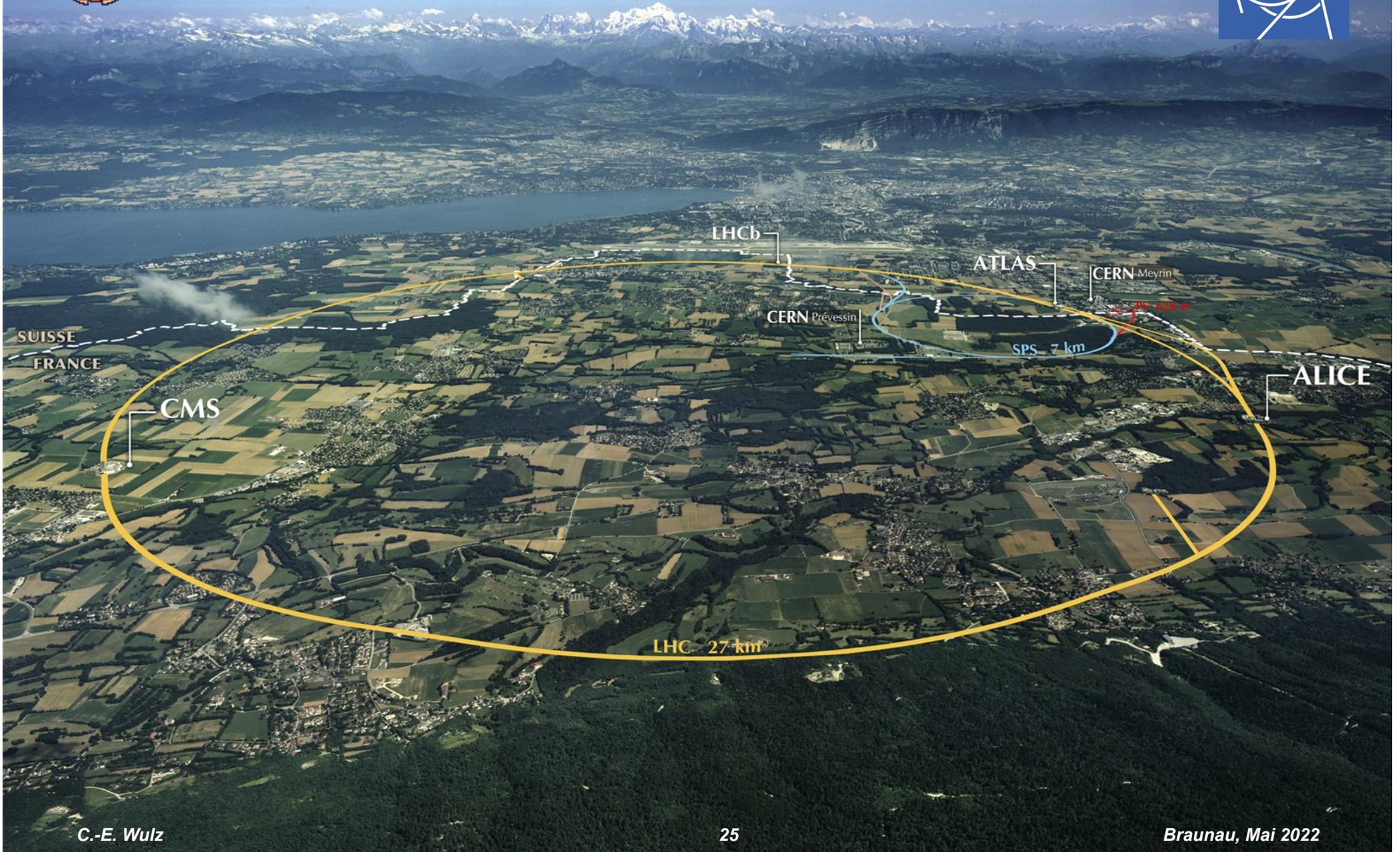
$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger D^\mu \phi - V(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

- 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

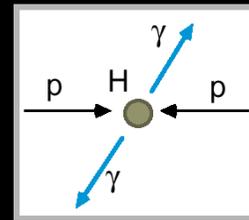


LHC und die Experimente



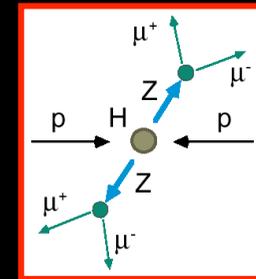
Wie sucht man nach dem Higgs-Teilchen?

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



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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



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

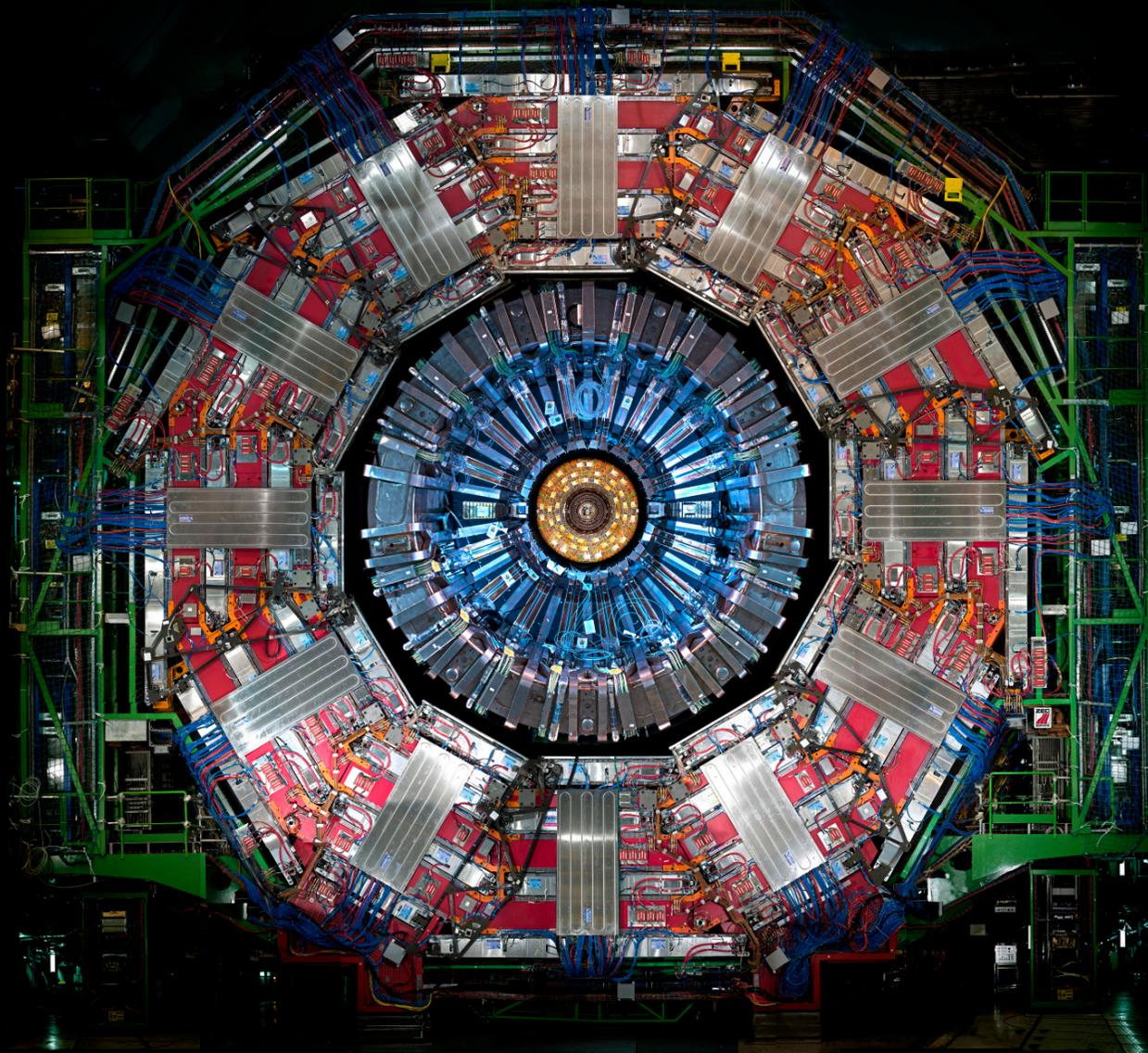
$$H \rightarrow bb$$

$$H \rightarrow \tau\tau$$

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

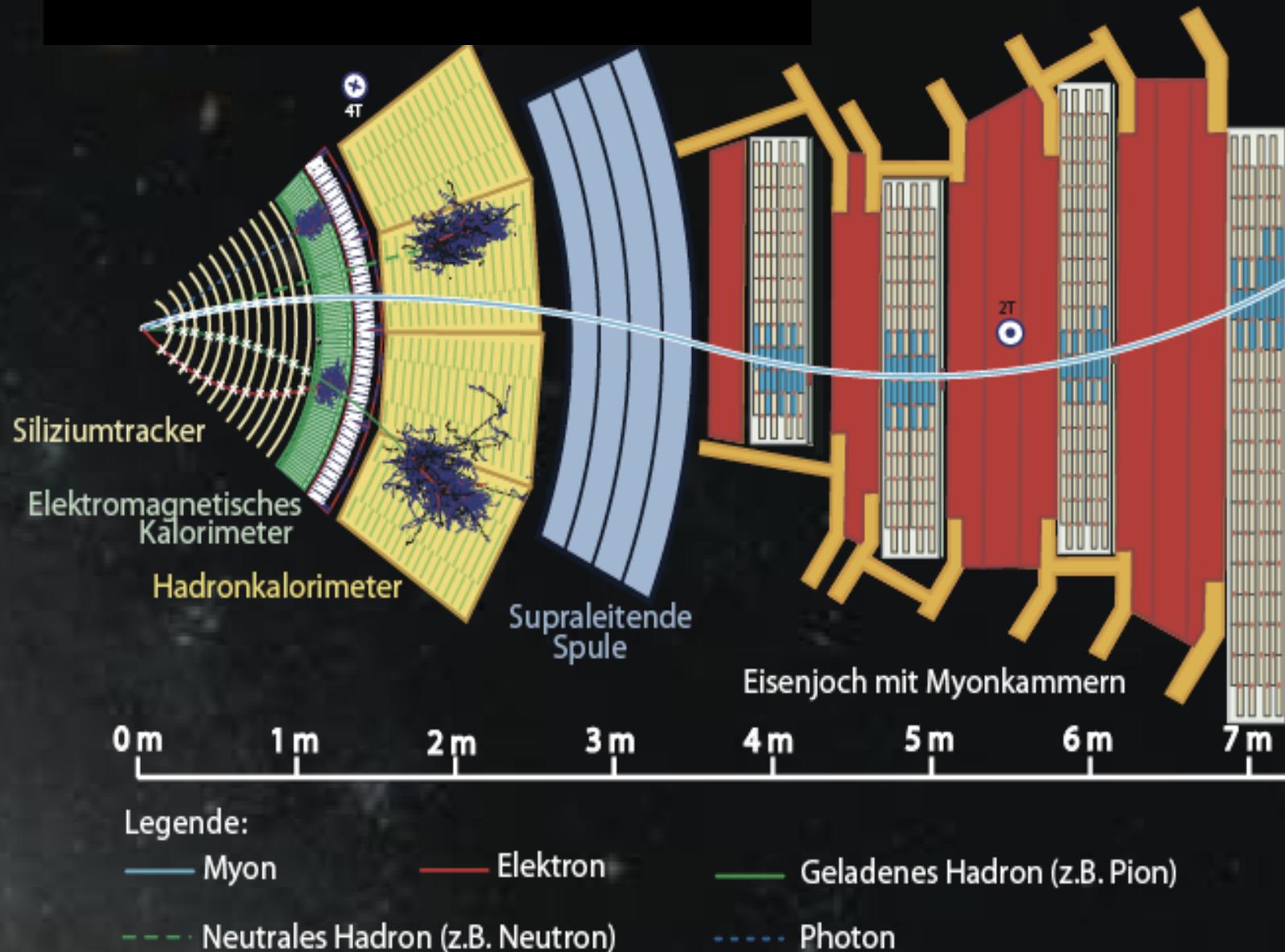


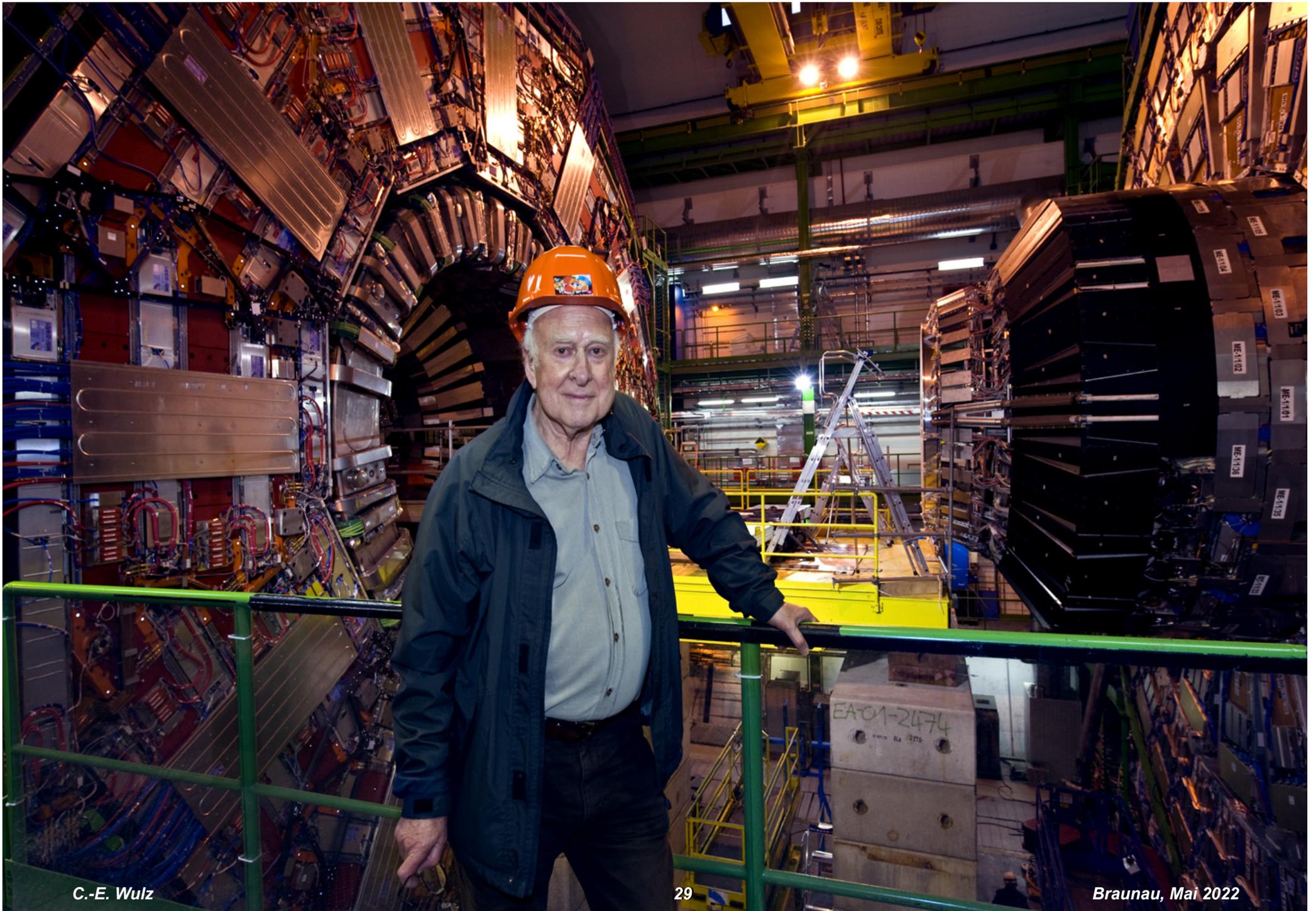
CMS-Experiment





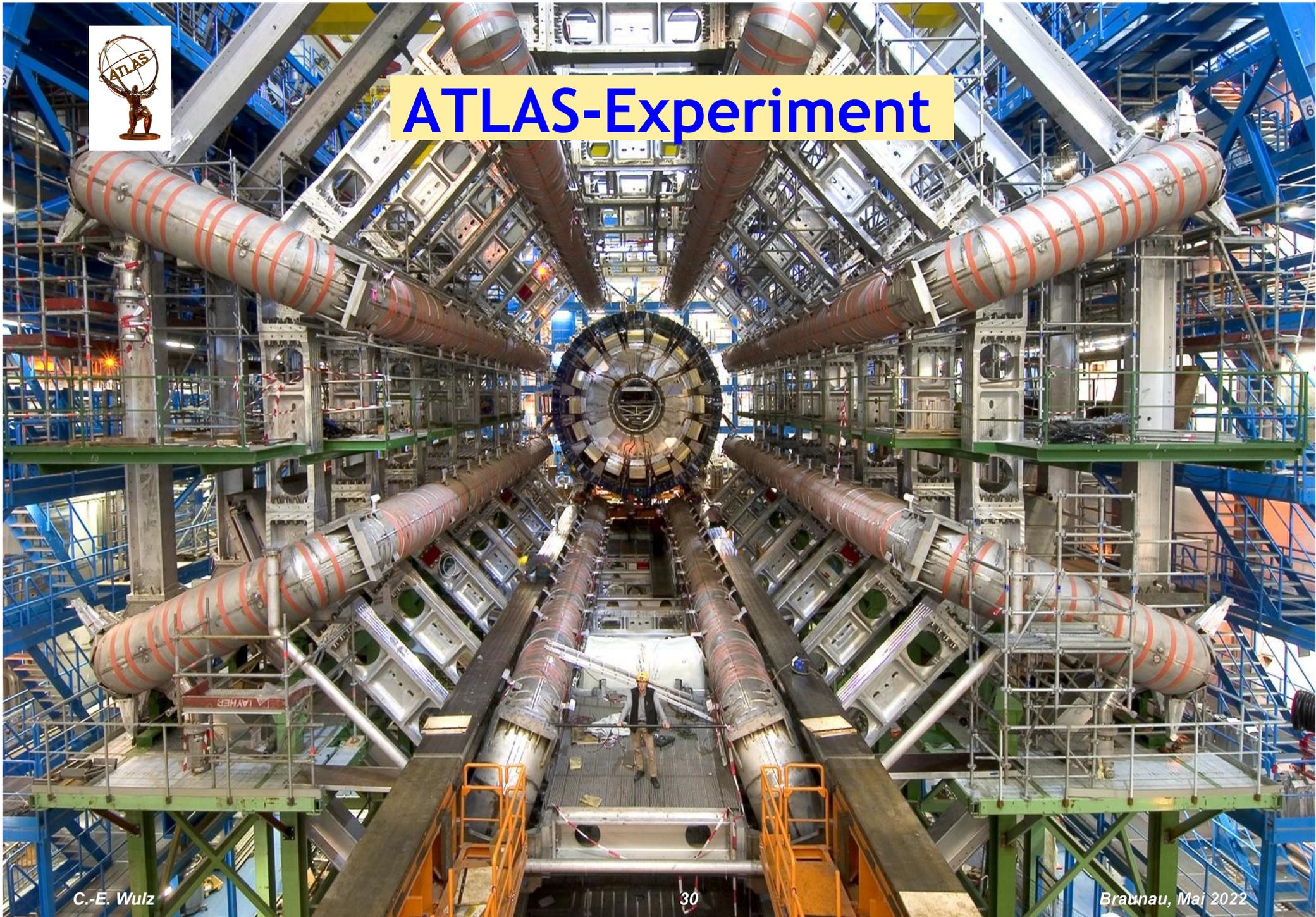
CMS-Experiment





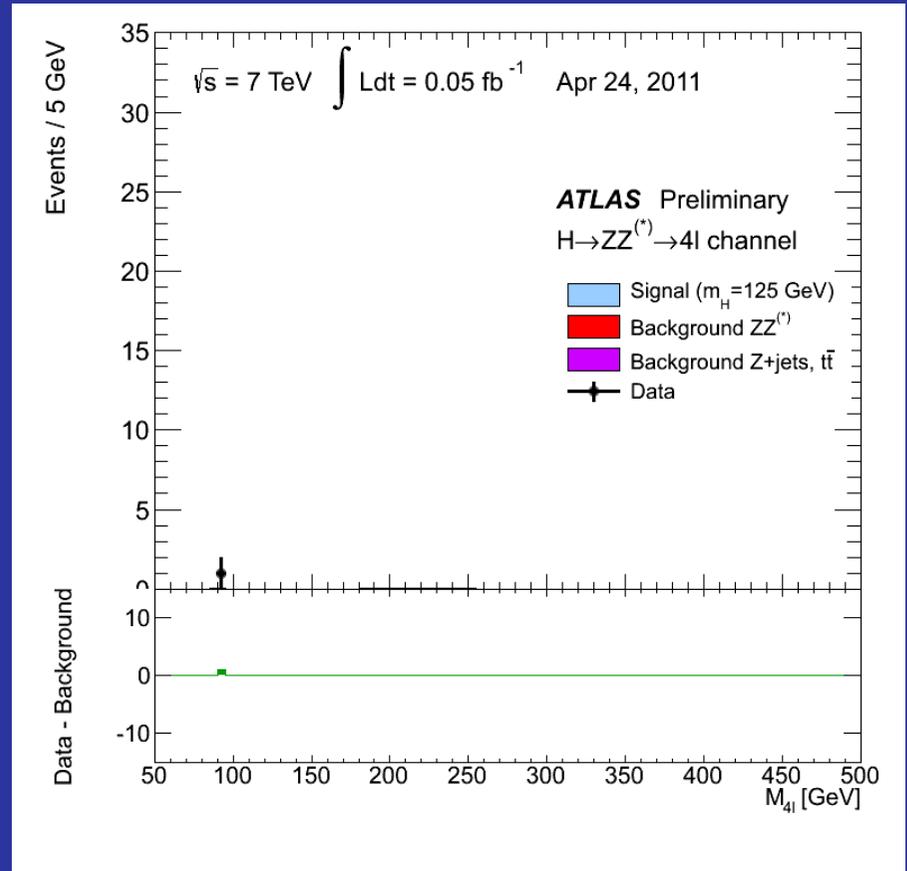
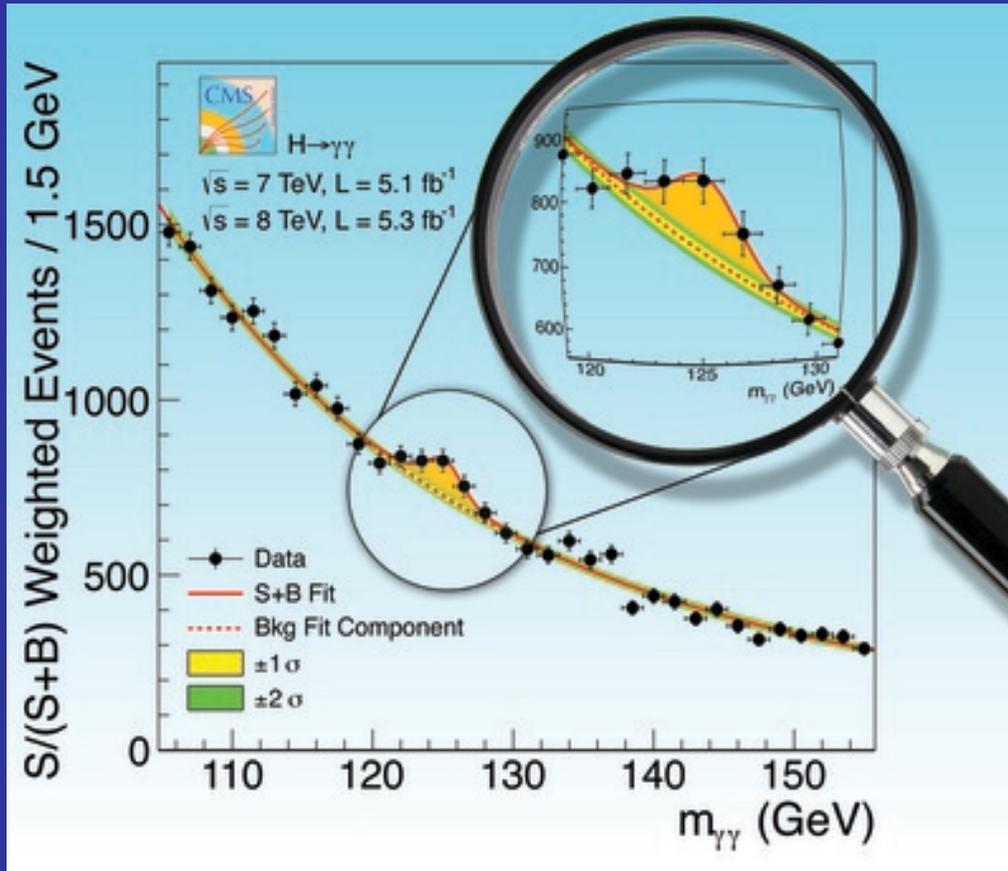


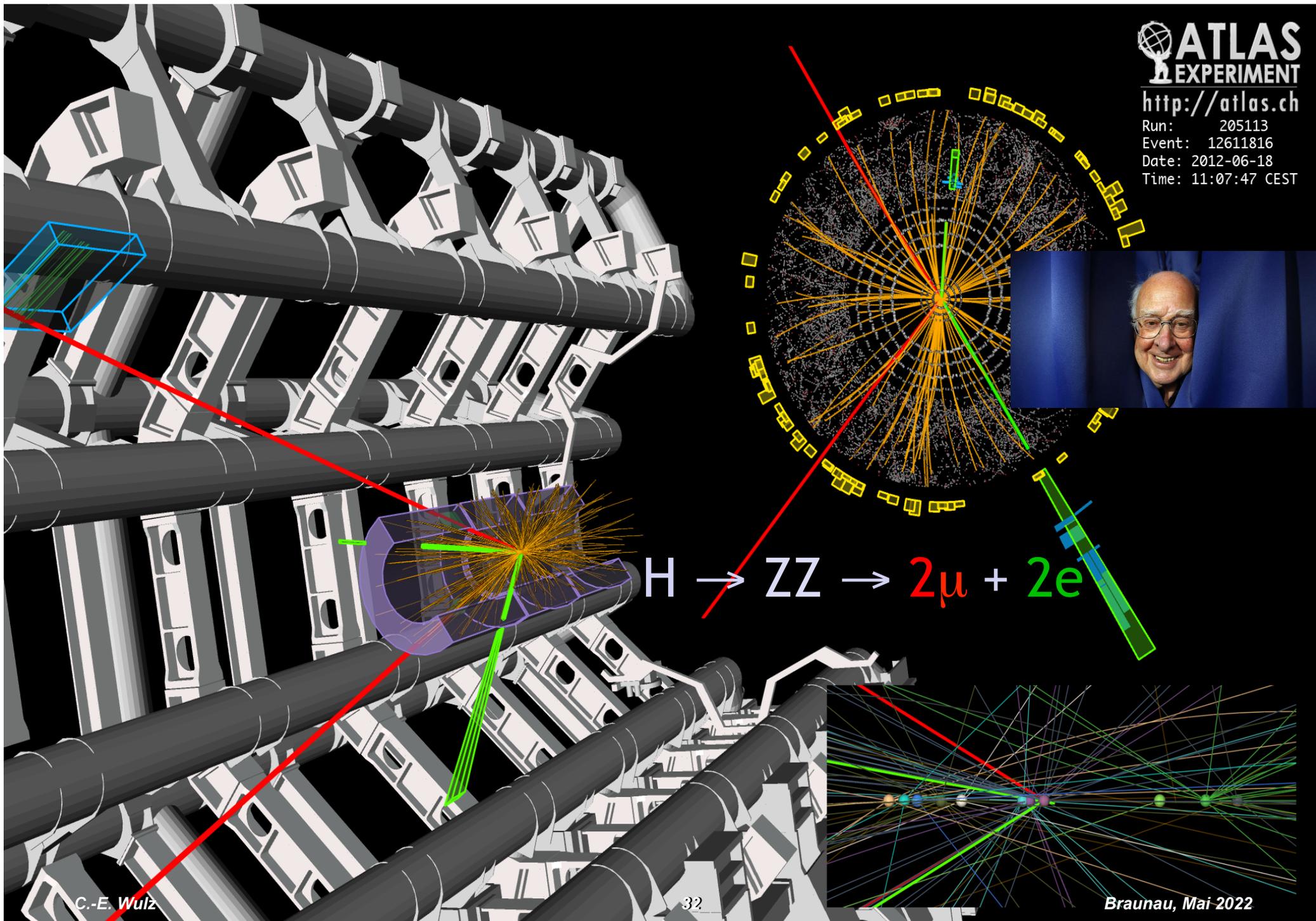
ATLAS-Experiment



Masse des Higgs-Bosons (≈ 125 GeV)

Das Higgs-Boson wird bald zehn!







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

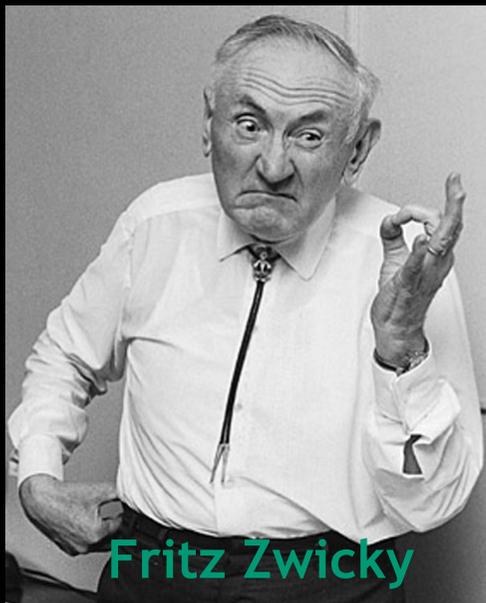
• Woraus besteht das Universum? -> Wir kennen nur 5% (Atome), Rest ist dunkle Materie und dunkle Energie.

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

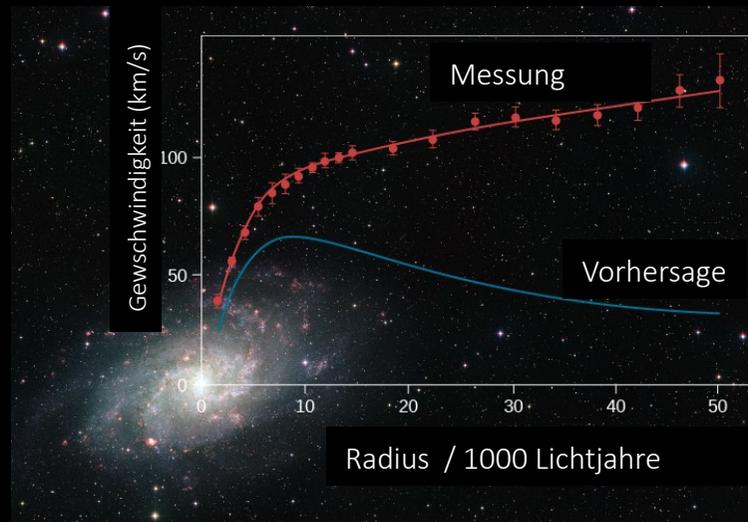


Dunkle Materie

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



Es gibt **5 Mal mehr dunkle** als baryonische Materie!



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)

Gravitationslinsen

Abbild der Galaxie



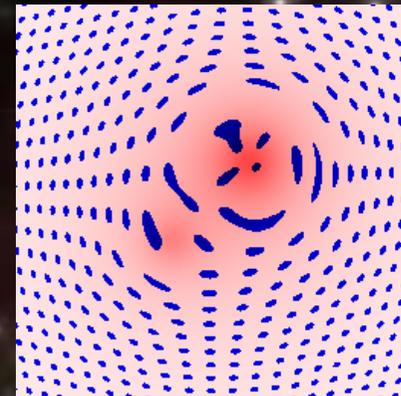
Imaginärer Lichtweg

Tatsächlicher Lichtweg



Massives Objekt

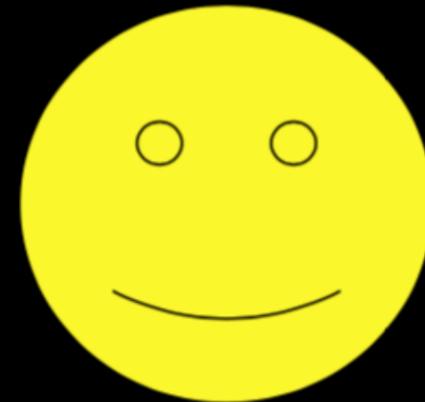
Abbild der Galaxie



Smiley

“Hubble sees a smiling lens”

<https://www.nasa.gov/content/hubble-sees-a-smiling-lens>



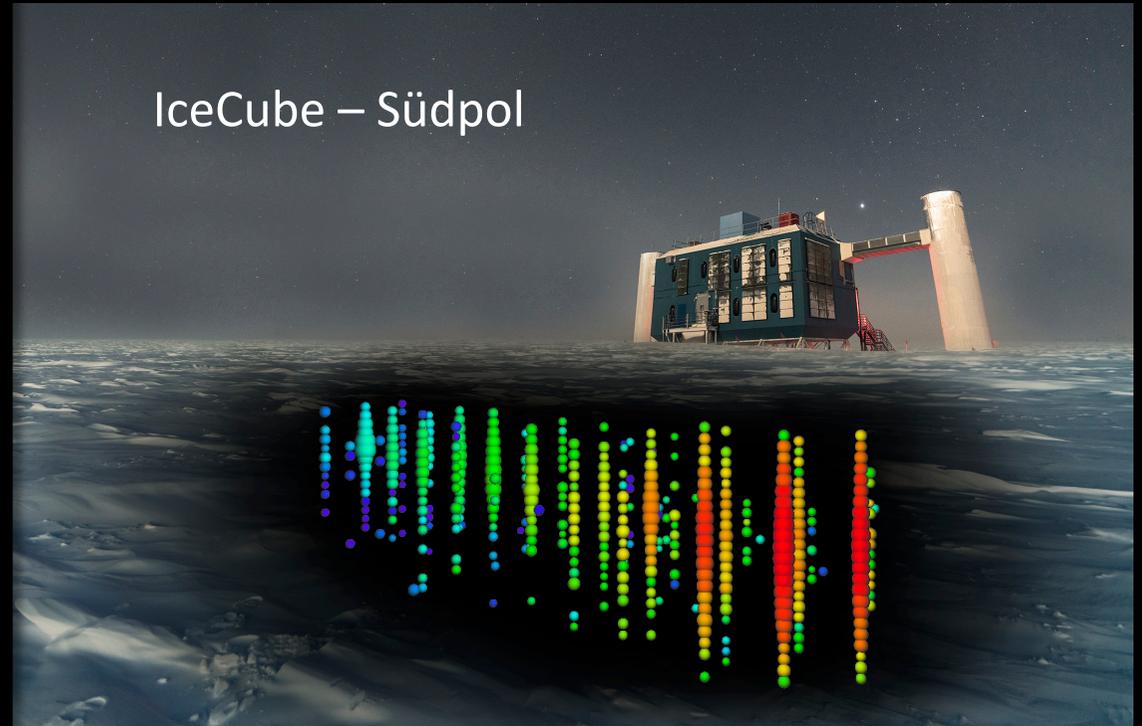


Experimente für Dunkle Materie

Weltweit viele Experimente (Gran Sasso, Boulby, Kamioka, Sudbury, Südpol, ...)



CRESST – Gran Sasso

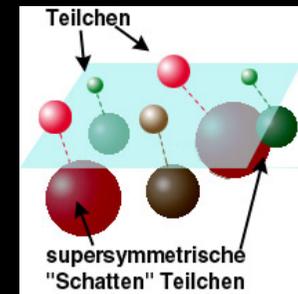


IceCube – Südpol

Was ist die dunkle Materie ?

- WIMPs/SIMPs (weakly/strongly interacting massive particles) ?
- MACHOs (massive astrophysical compact halo objects) ?
- AXIONs ?
- ... ?

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
Neutronensterne (Kollaps nach Supernova-Explosion)
Schwarze Löcher

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

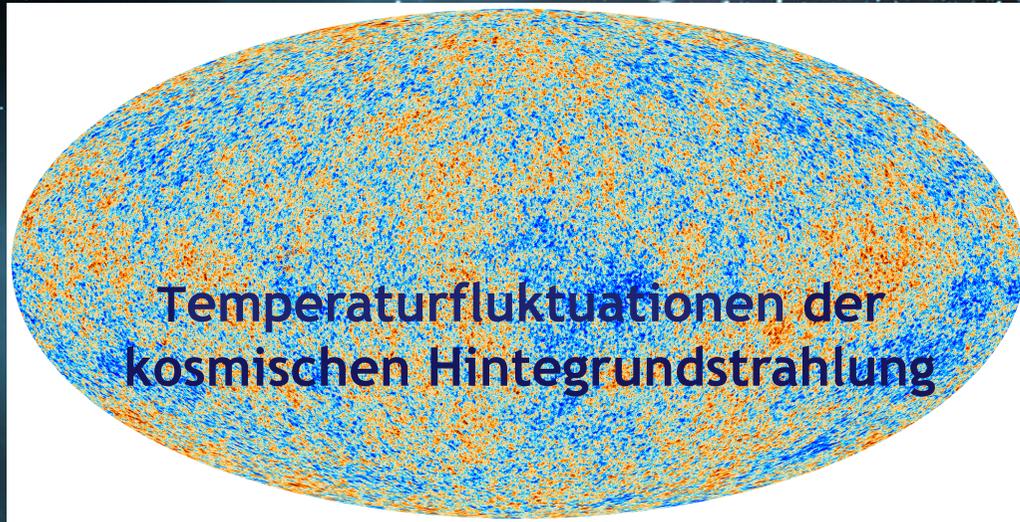


AMS auf der ISS





Planck-Satellit

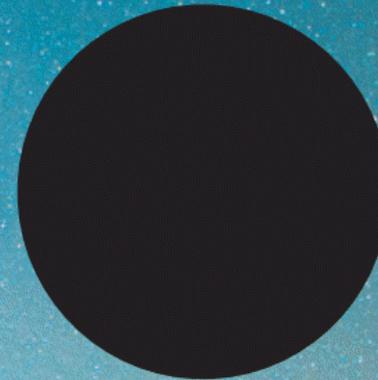


14. Mai 2009 -
23. Okt. 2013

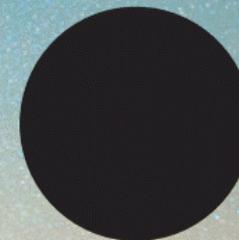


■ Bausteine des Universums

Dunkle Energie 68,3%



Dunkle Materie 26,8%



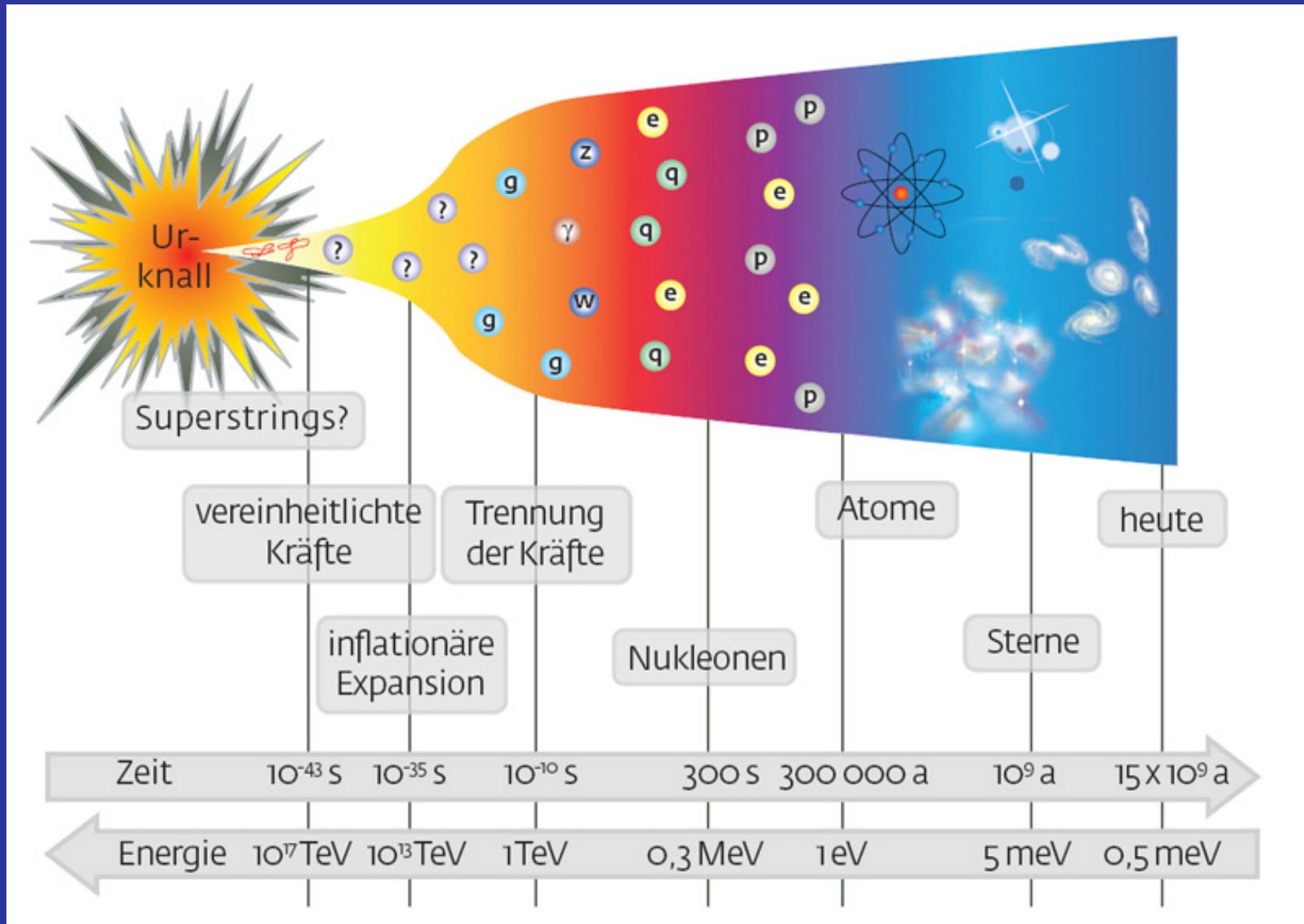
Sichtbare Materie 4,9%



BZ-GRAFIK/DRE

QUELLE: GEO

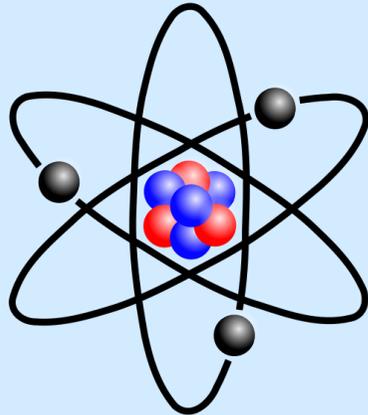
Geschichte des Universums





Quantentheorie

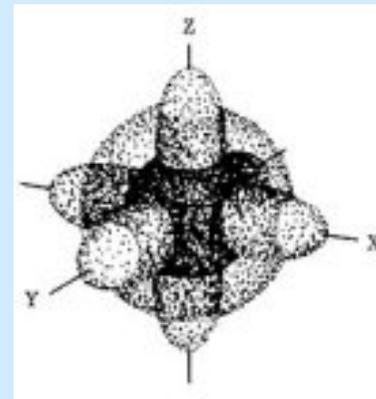
Die Teilchenphysik folgt den Gesetzen der **Quantentheorie**.
Diese hat viele Anwendungen (z.B. Laser, Quantencomputer?)



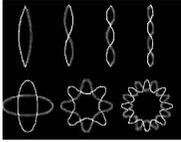
Klassisches Bild: Elektronen bewegen sich auf **festen Bahnen** um den Atomkern, und sie können alle möglichen Energien haben.

Jedoch:

Die Gravitation passt nicht in die quantenmechanische Welt!

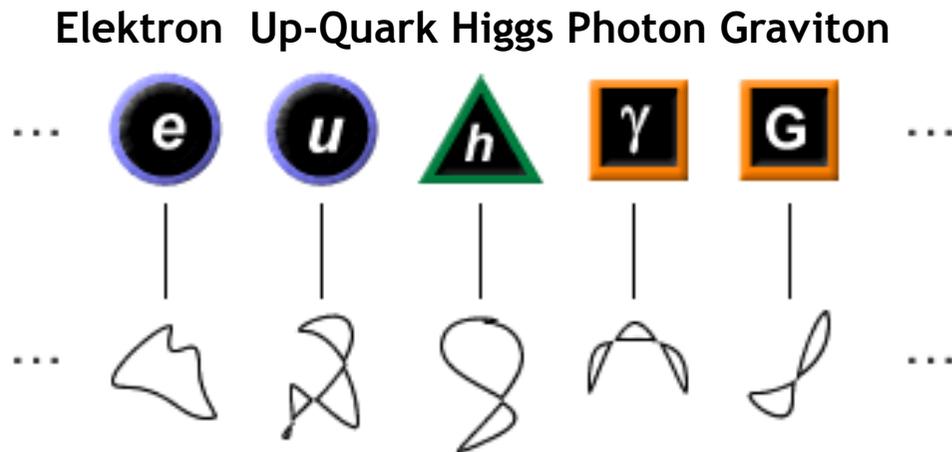


Quantentheoretisches Bild: Elektronen haben bestimmte **Aufenthaltswahrscheinlichkeiten**, sie können nur bestimmte (diskrete) Energiewerte haben.



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.

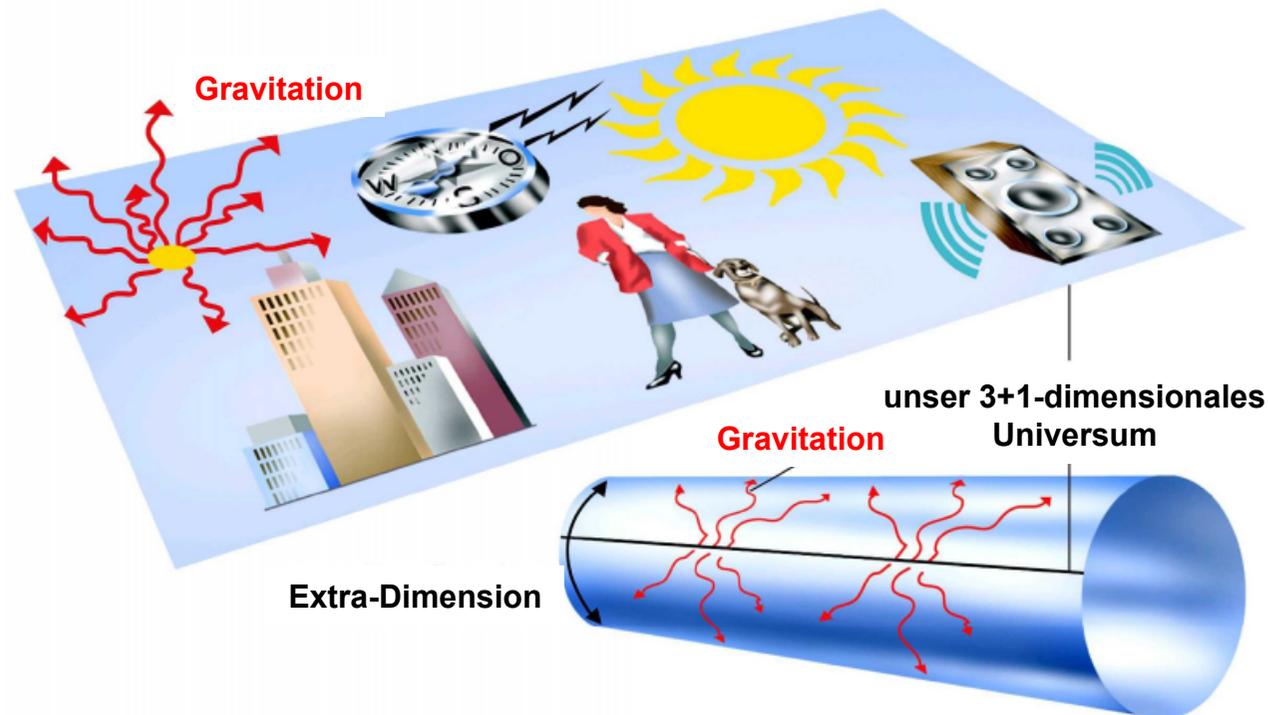


Gravitation und Extradimensionen

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

Mögliches Modell:

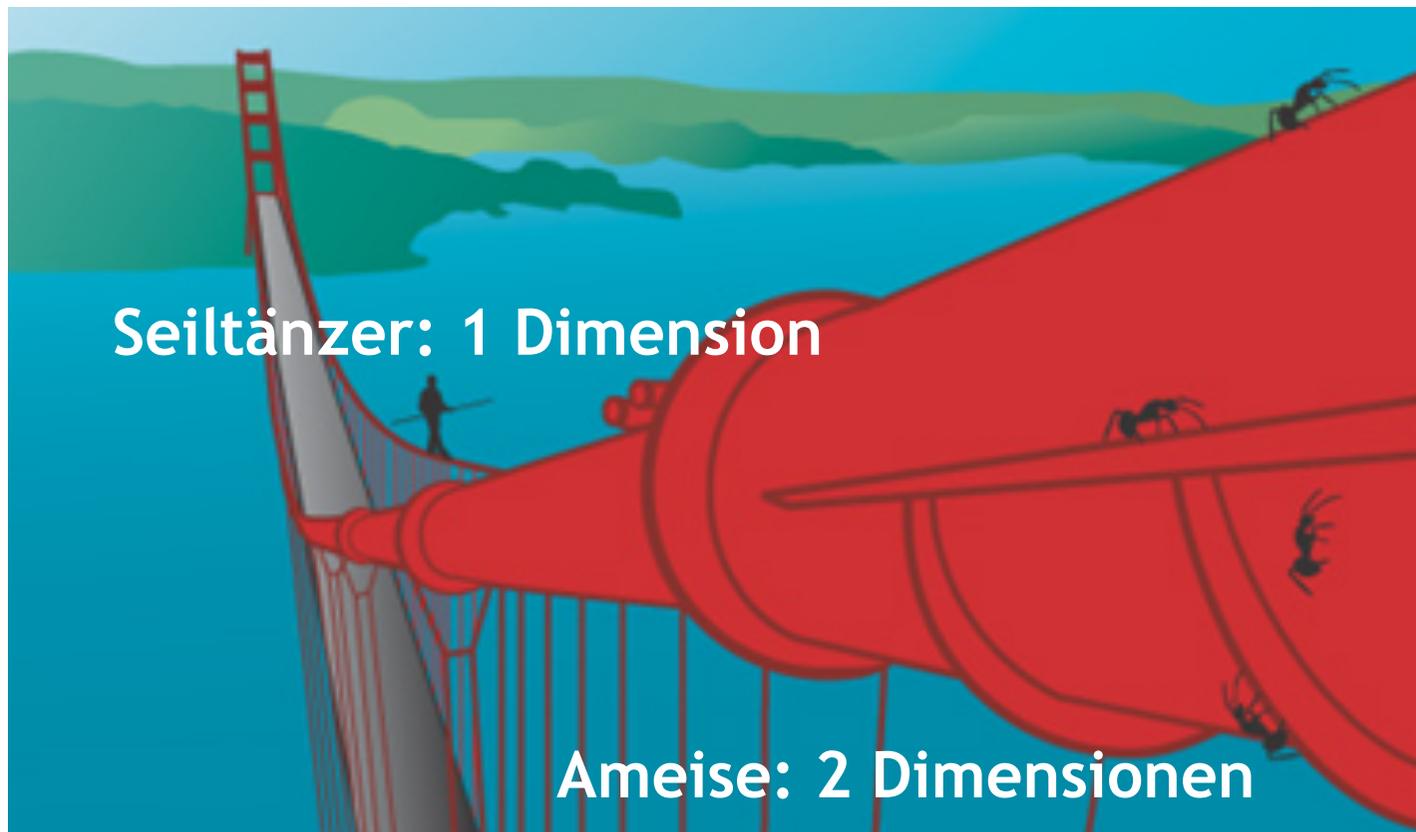
- Bekannte Teilchen leben im 3+1-dimensionalen Universum (Brane)
- **Gravitation lebt in einem höherdimensionalen Universum (Bulk)**
- Extra-Dimensionen sind aufgerollt mit Radius R





Extradimensionen

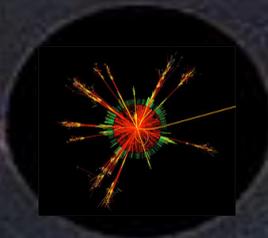
Unser bekanntes Universum: 3 Raumdimensionen + 1 Zeitdimension
Stringtheorie: mindestens 9 + 1 Dimensionen



2. Dimension: aufgerollt

Schwarze Löcher am LHC

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



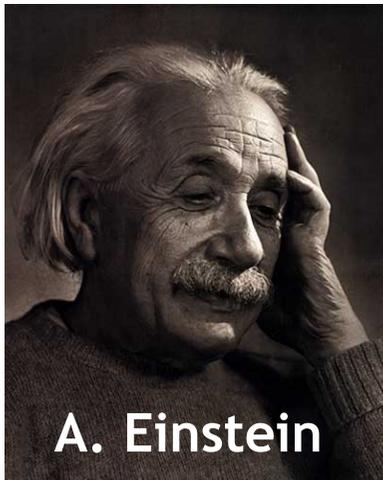
Sie sollten jedoch durch quantenmechanische Effekte sehr schnell ($\sim 10^{-35}$ s) verdampfen (Hawking-Strahlung), unter Erzeugung aller möglichen Standardmodellteilchen.

Bisher wurden jedoch keine solchen schwarzen Löcher gefunden.



Grundlagenforschung

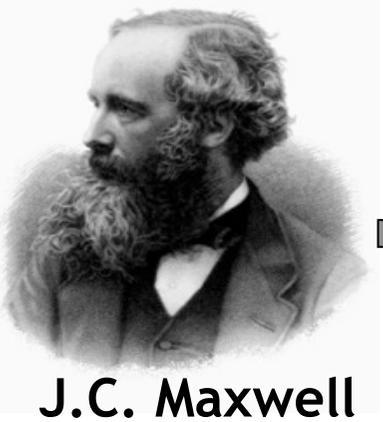
Sie war stets eine Voraussetzung für technischen Fortschritt!



→ Relativitätstheorie →



100% Grundlagenforschung

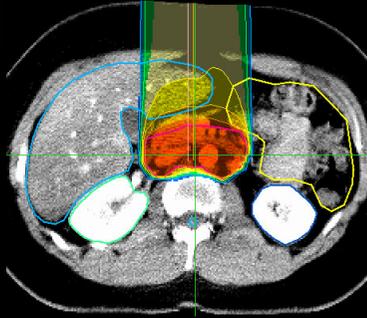


→ Elektromagnetismus →

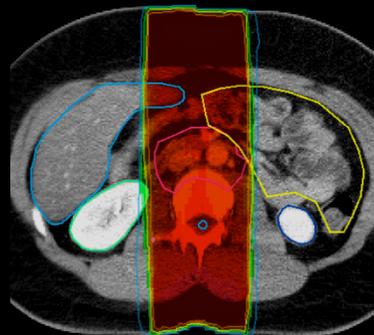




Beschleuniger und Antimaterie



Krebstherapie mit Kohlenstoffionen



Konventionelle
Krebstherapie mit
Photonen

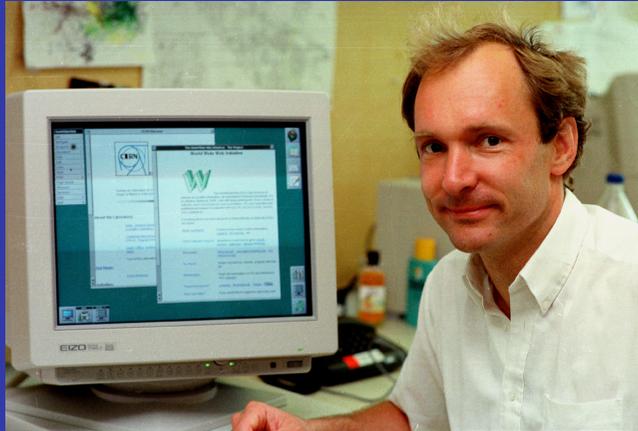


Ca. 9000 der 17000 Beschleuniger weltweit für
medizinische Zwecke

PET Scanner: positron emission tomography (Positron = Antielektron)
Technologie am CERN entwickelt



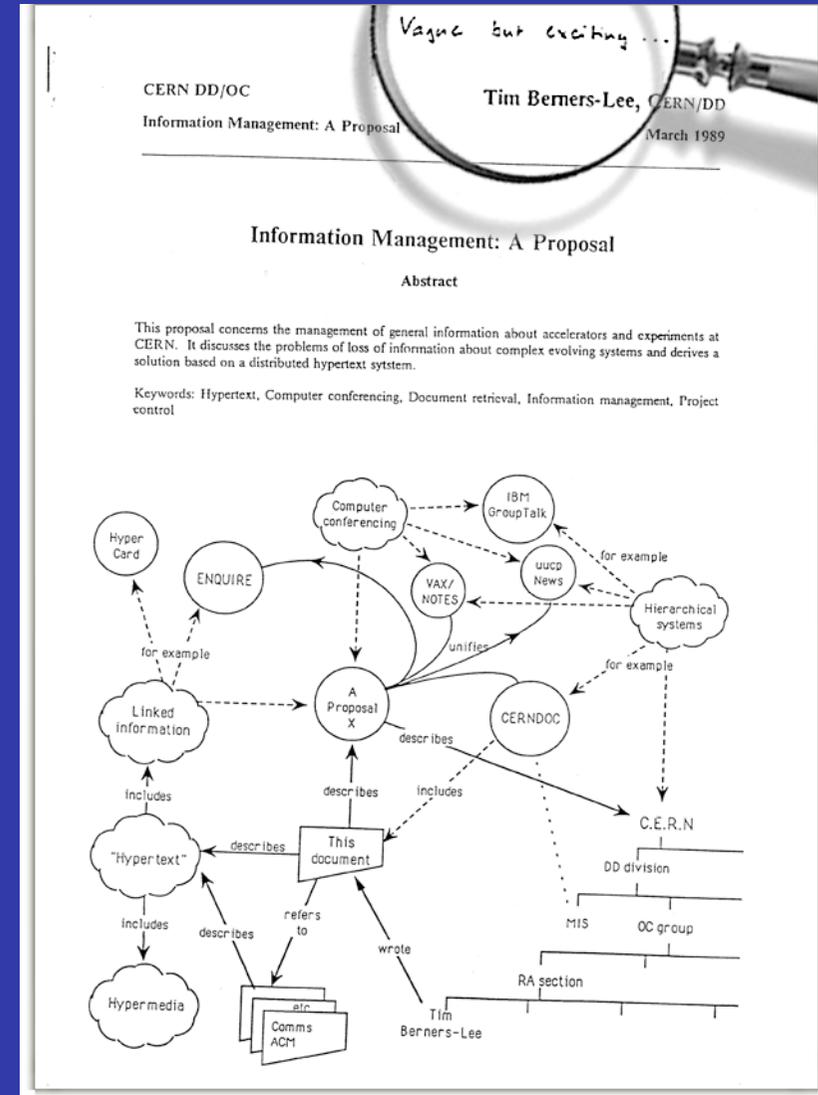
Geburt des WWW 1989

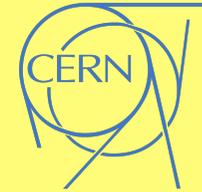


Sir Tim Berners-Lee

Am 30. April 1993 wurde das hypertext protocol mit folgendem Statement der Öffentlichkeit zugänglich gemacht:

“CERN relinquishes all intellectual property rights to this code, both source and binary and permission is given to anyone to use, duplicate, modify and distribute it.”





Der erste kapazitive Touchscreen



Bent Stumpe, ein dänischer Ingenieur am CERN entwickelte 1972 den ersten kapazitiven Touchscreen (Smartphone, iPad, Bankomat etc.) für den SPS-Beschleuniger des CERN.

B. Stumpe 11.03.1972 PAGE 7.

Proposed outlay for a fast interactive computer display system *

1. General.

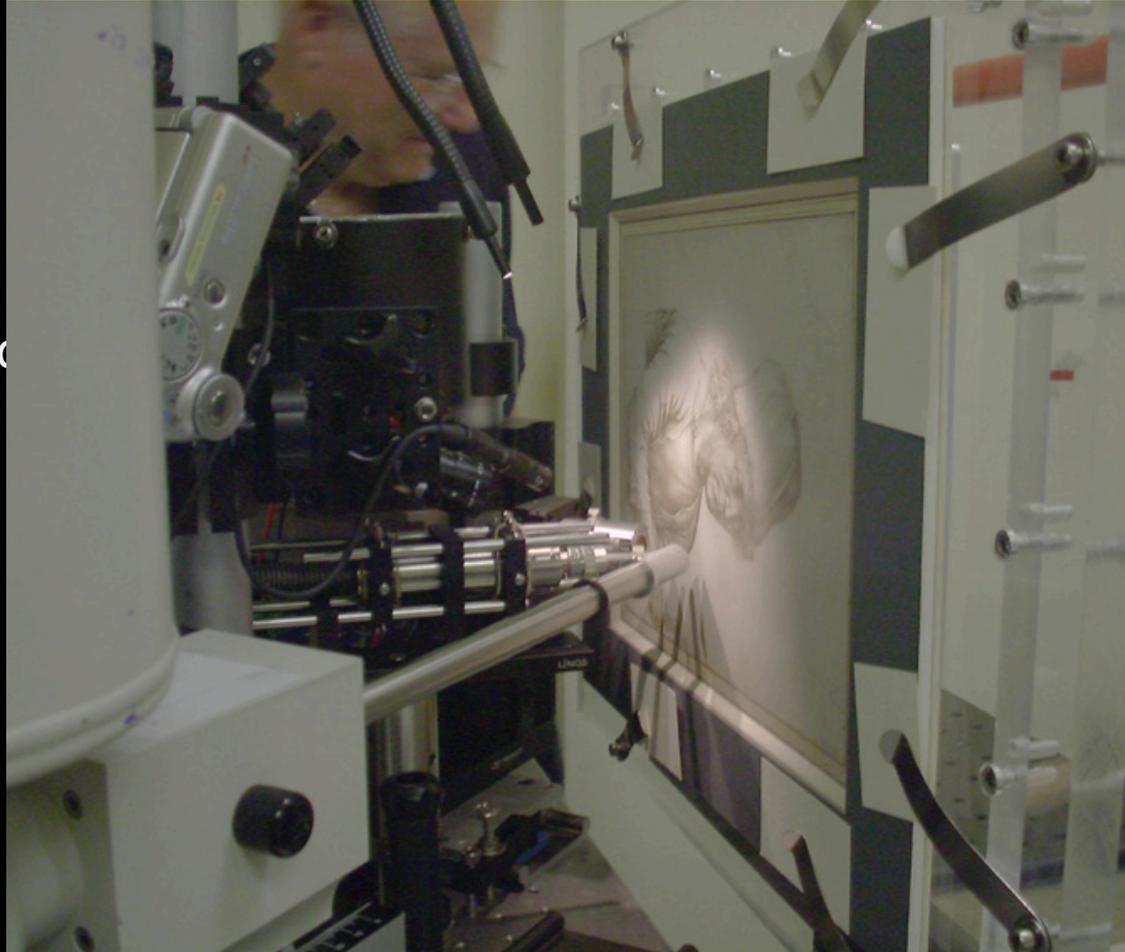
Nearly all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to the computer system.

In most cases this involves following basic operations:

1. 1. Display of the question
1. 2. Searching for the displayed information
1. 3. Thinking and decision taking.
1. 4. Searching the correct buttons to press on the keyboard.
1. 5. Arm and finger movement to press the selected buttons.
1. 6. Researching on the display to get information back on the effect of the executed order.

* This idea was given by Mr. Frank Beck, the author is only suggesting a practical solution to the problem.

Beschleuniger und **Kunst**: Think outside the box!



Dürers Vater

PIXE (proton-induced X-ray emission): Untersuchung von Silberstiftzeichnungen Albrecht Dürers an der Universität Wien (Beschleuniger VERA) 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!