



Von den kleinsten Teilchen bis zum Kosmos

BG Dornbirn
HLA Hohenems
26. Mai 2023

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 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



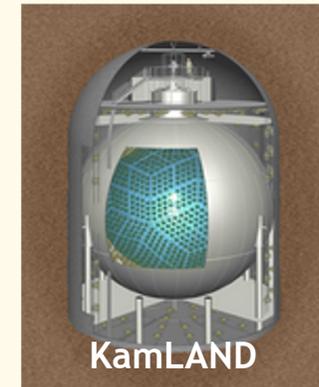
Experimente mit kosmischen Strahlen

z.B. Auger, IceCube



Experimente an Kernreaktoren oder mit radioaktiven Quellen

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



Terrestrische Teleskope

z.B. ALMA, VLT, ELT (2025)



Raumsonden

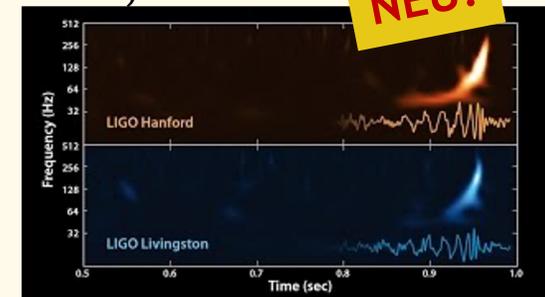
z.B. Hubble, Planck, James Webb Telescope



NEU!

Gravitationswellenexperimente

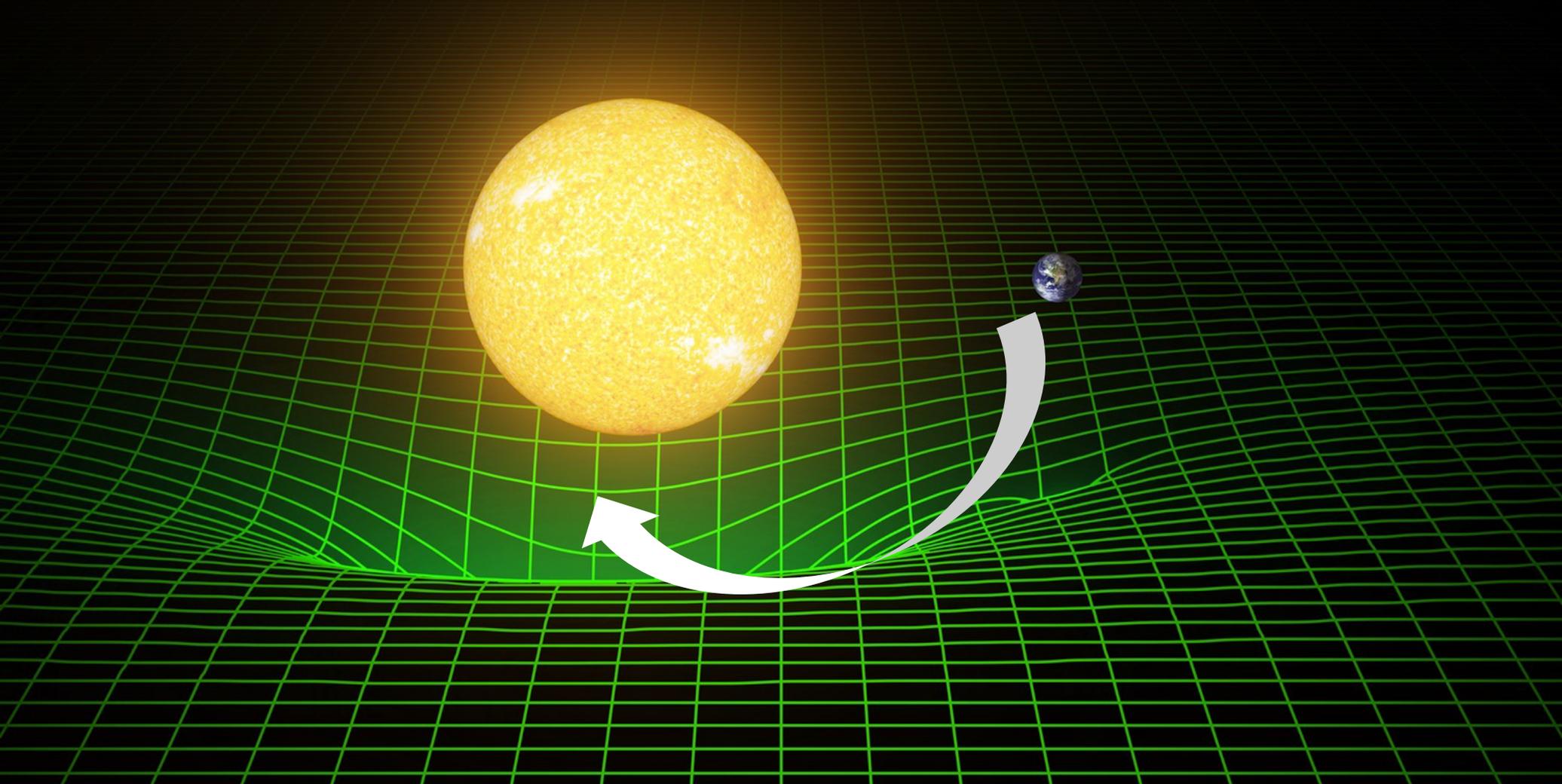
z.B. LIGO, VIRGO



NEU!

Allgemeine Relativitätstheorie - Einstein

Krümmung der Raumzeit



Gravitationswellen - eine neue Ära der Physik

Erforschung der gewaltigsten Ereignisse im Universum

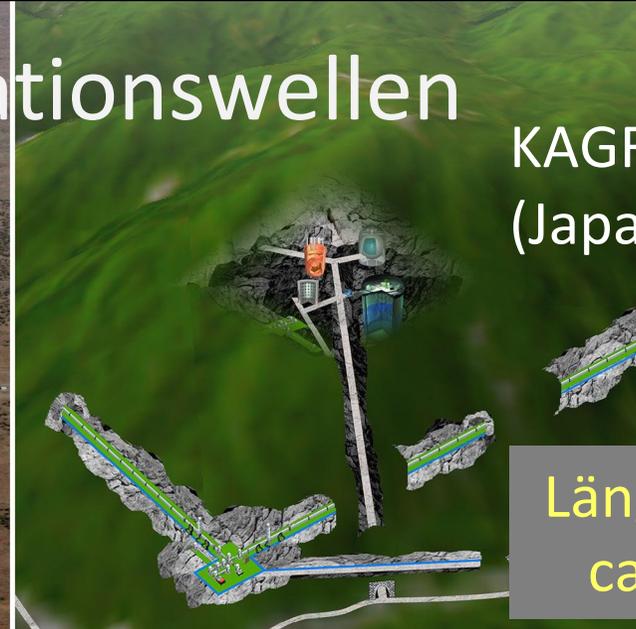
- ohne Aussendung von Licht
 - Verschmelzung von Neutronensternen, weißen Zwergen ...
 - Schwarze Löcher, die einander auffressen ...



Nachweis von Gravitationswellen Laserinterferometer



LIGO-Hanford (USA)



KAGRA-Kamioka
(Japan)

Längenänderung:
ca. 10^{-18} m/km

VIRGO-Cascina
(Italien)

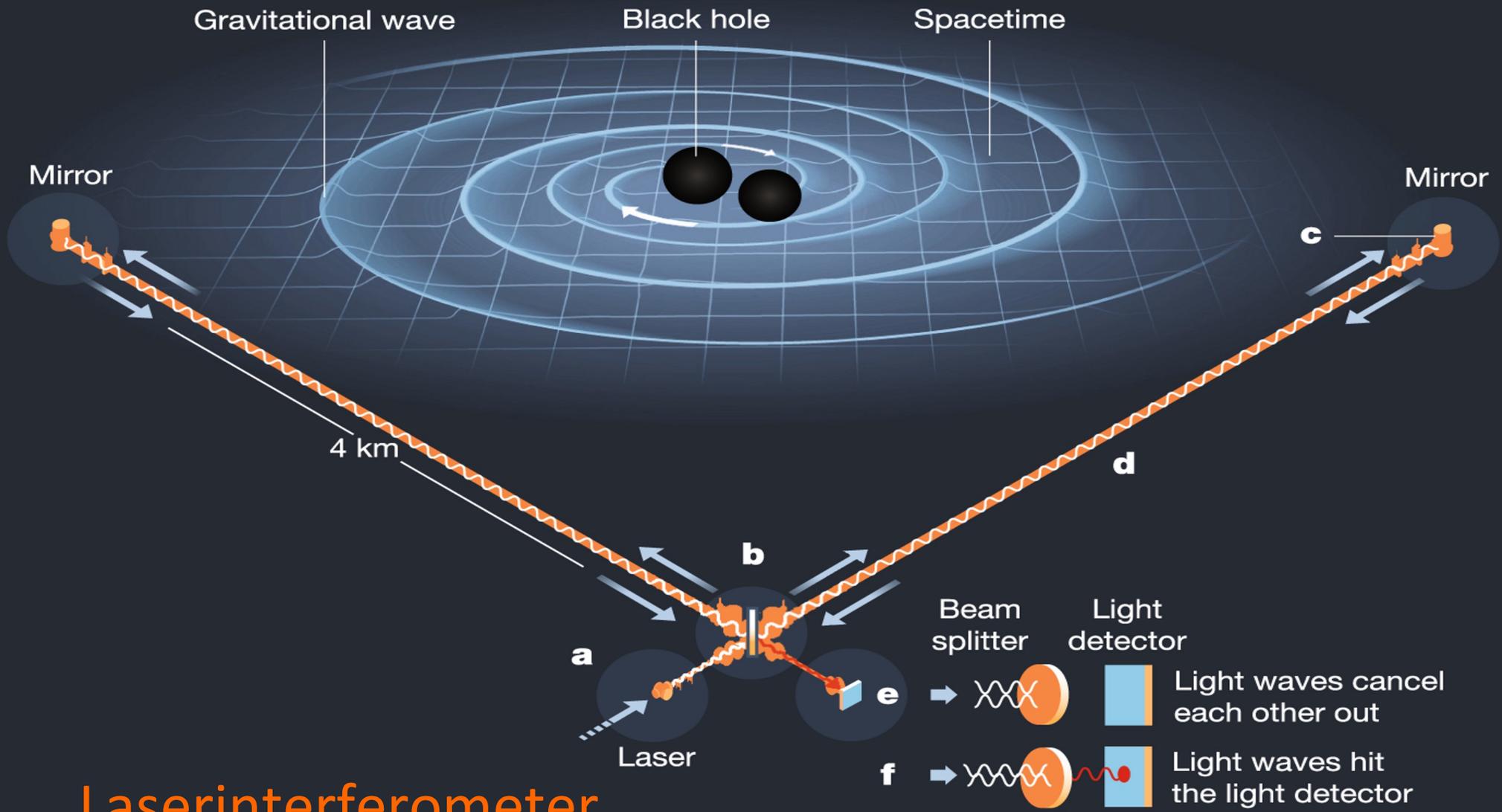


LIGO-Livingston (USA)



2017

Rainer Weiss
Barry Barish
Kip Thorne



Laserinterferometer

Neues über Schwarze Löcher

- Roger Penrose: Allgemeine Relativitätstheorie erlaubt sie
- Rainer Genzel, Andrea Ghez: Nachweis des schwarzen Lochs Sgr A* mit Radioteleskopen (Very Large Telescope, Chile, und Keck Observatory, Hawaii) in der Region Sagittarius A im Zentrum der Milchstraße
- Event Horizon Telescope (EHT)



Nobel Prize in Physics

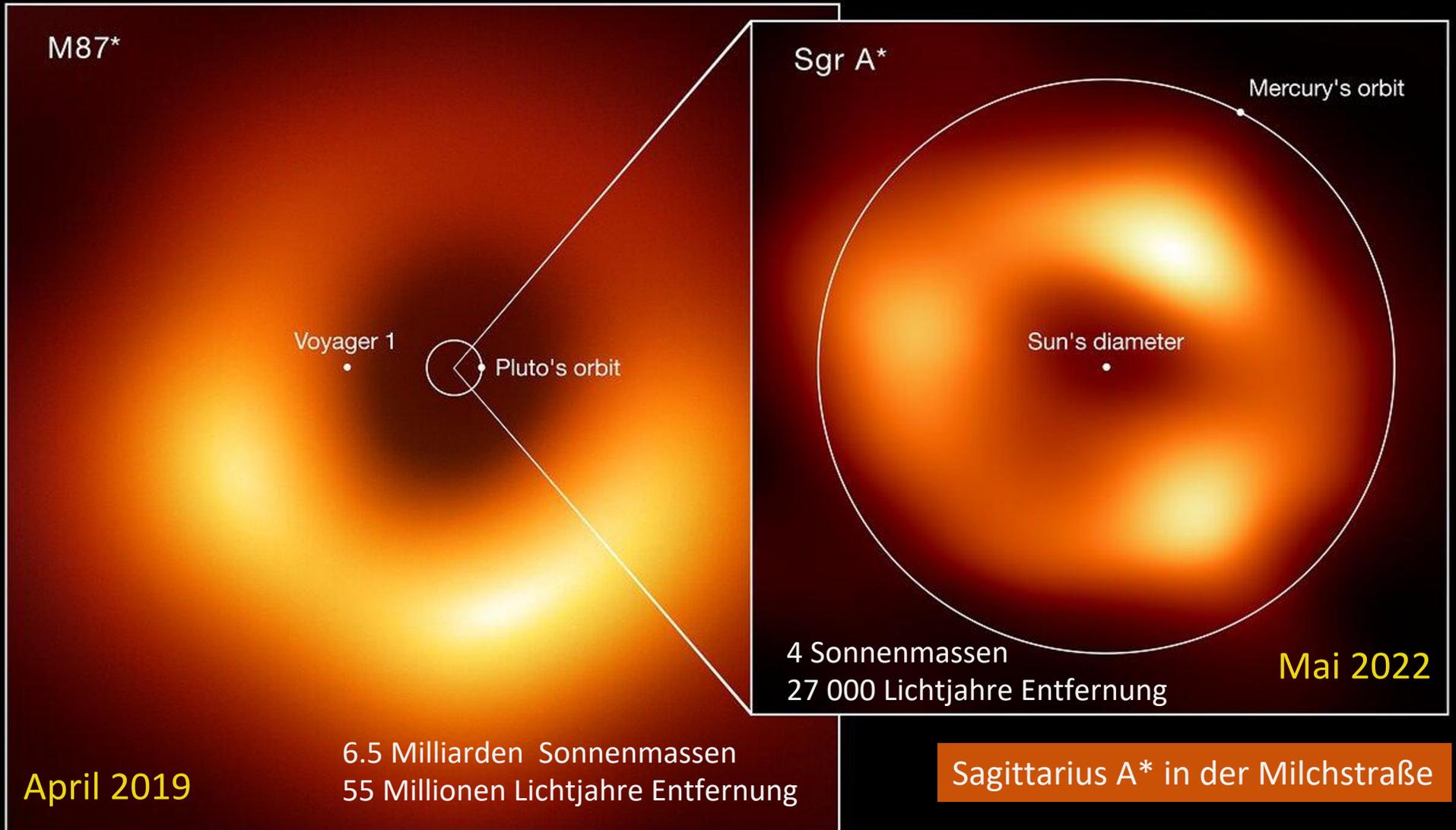
2020



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



Sagittarius A* in der Milchstraße

Wie und wann ist das Universum entstanden?

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

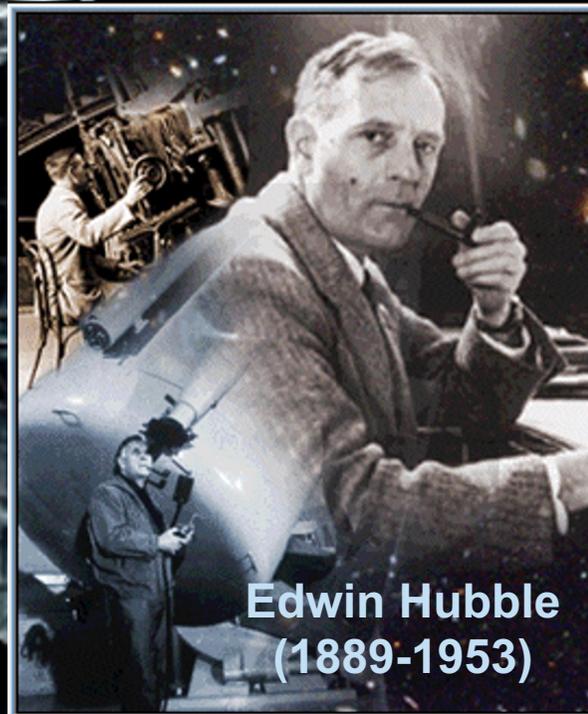
Seither dehnt es sich aus und kühlt sich ab.



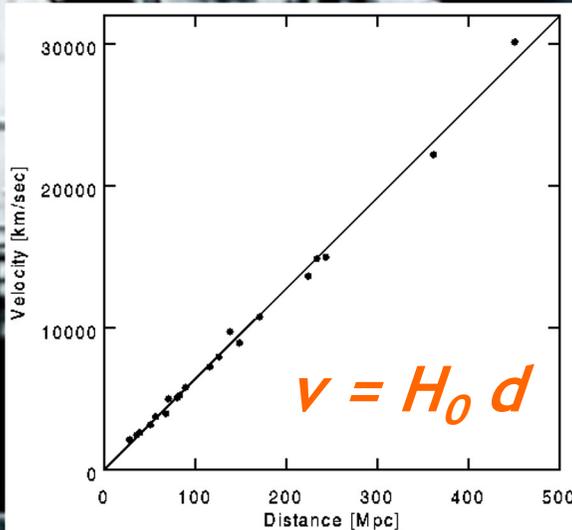
Woher wissen wir das?

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:

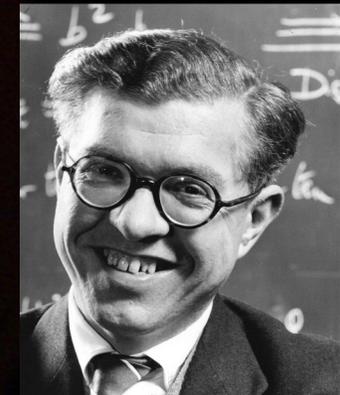
Das Universum begann in einem Punkt

Big Bang

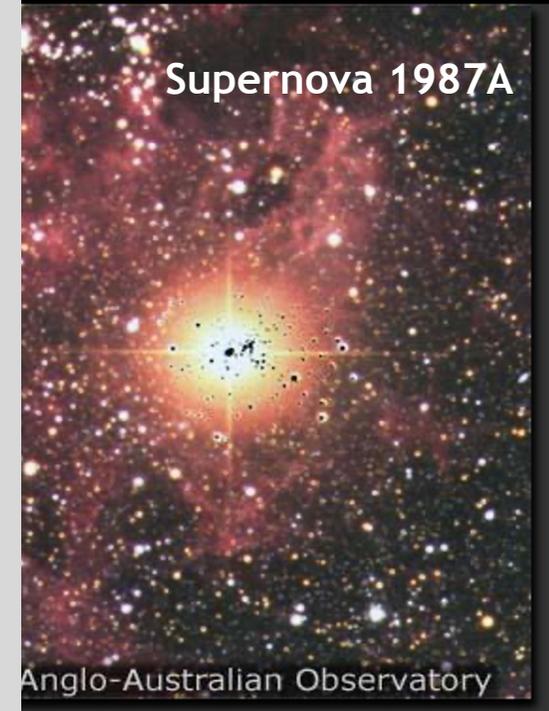
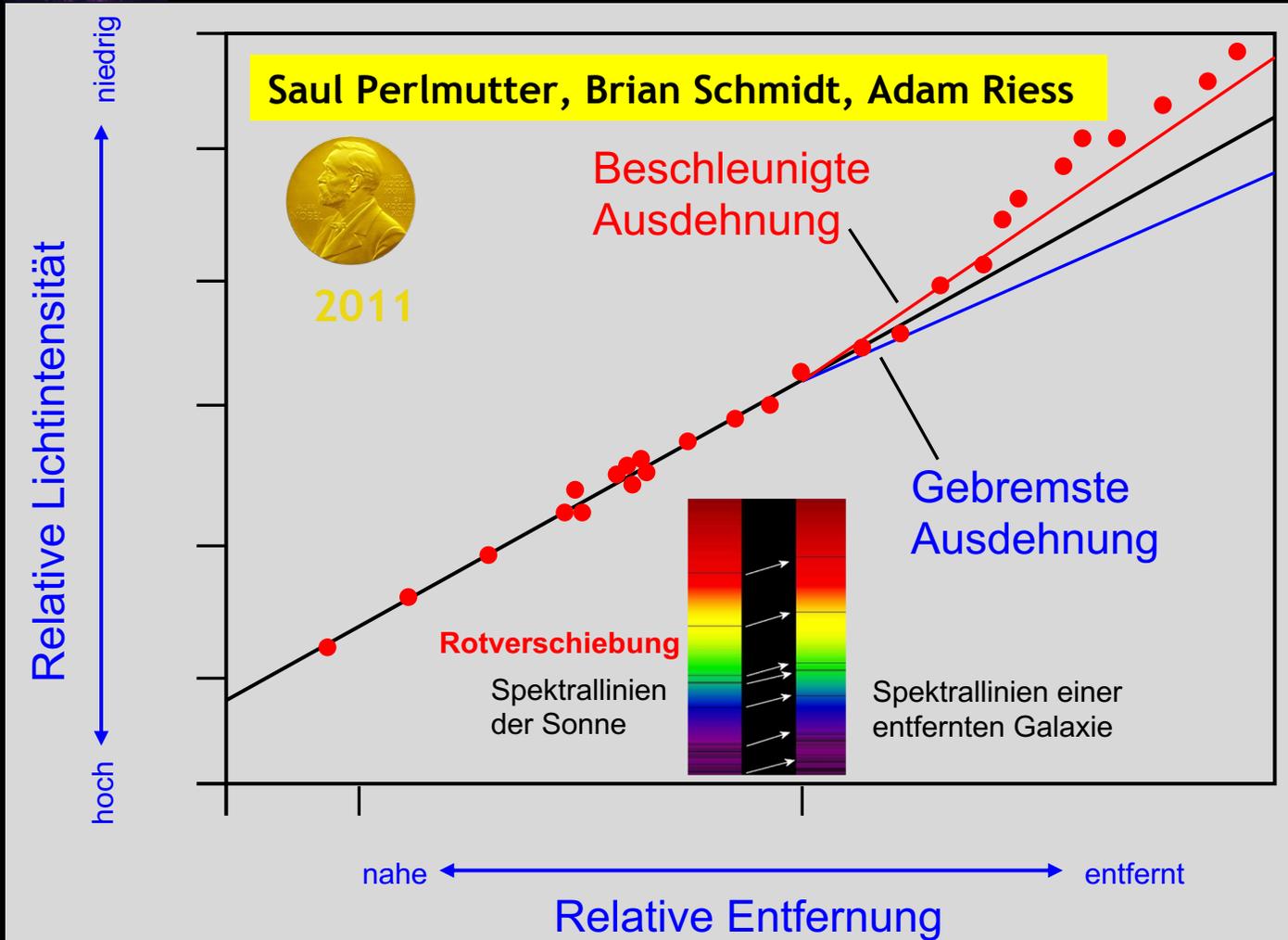
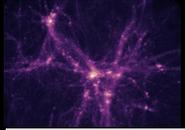


Albert Einstein,
Georges Lemaître

Fred Hoyle

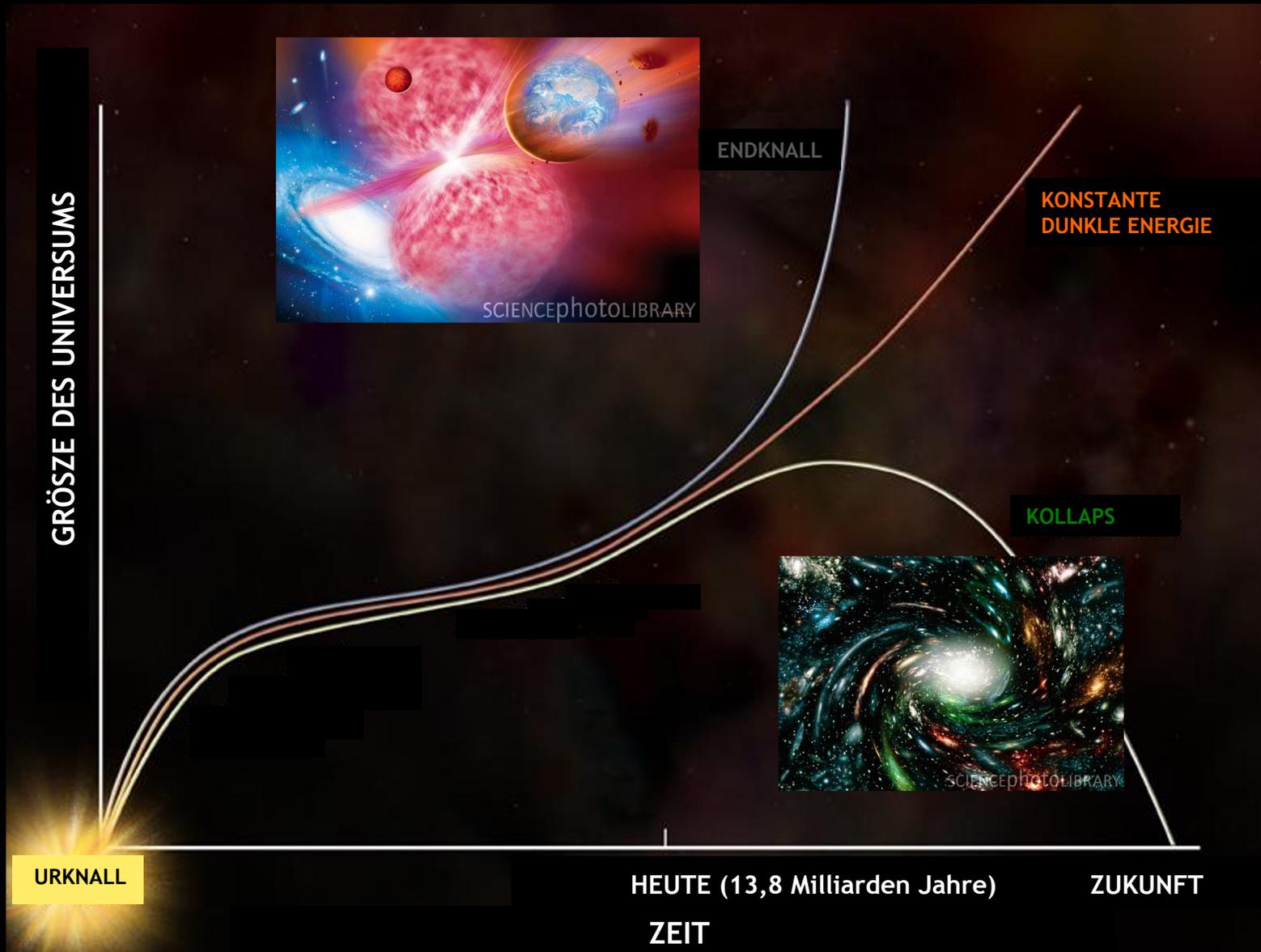


Entdeckung der dunklen Energie 1998

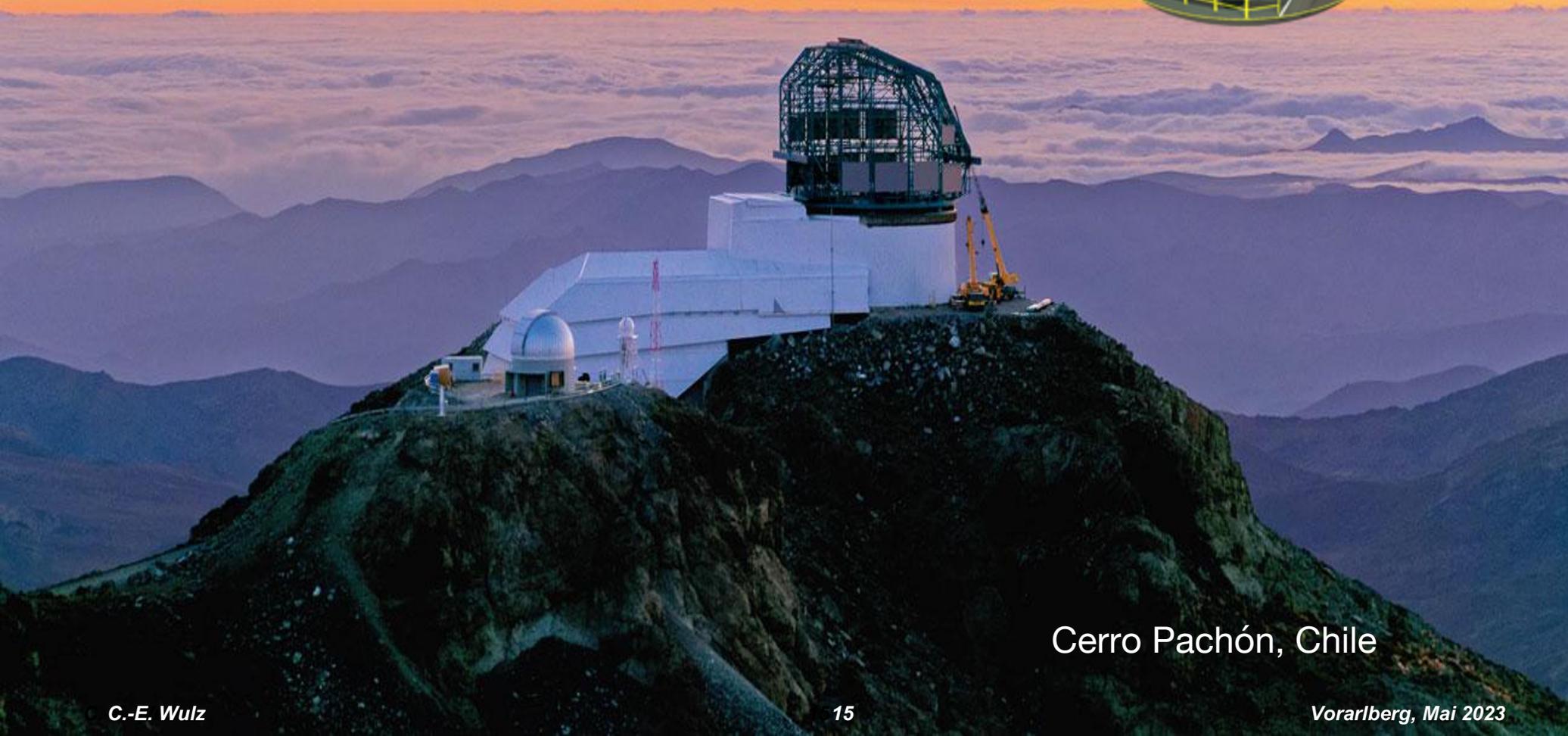


Beobachtungen von Supernovae ergaben, dass eine mysteriöse Kraft - dunkle Energie - das Universum immer schneller auseinander treibt!

Entwicklung des Universums



Vera Rubin Observatorium



Cerro Pachón, Chile

Was sind die Bestandteile des Universums?

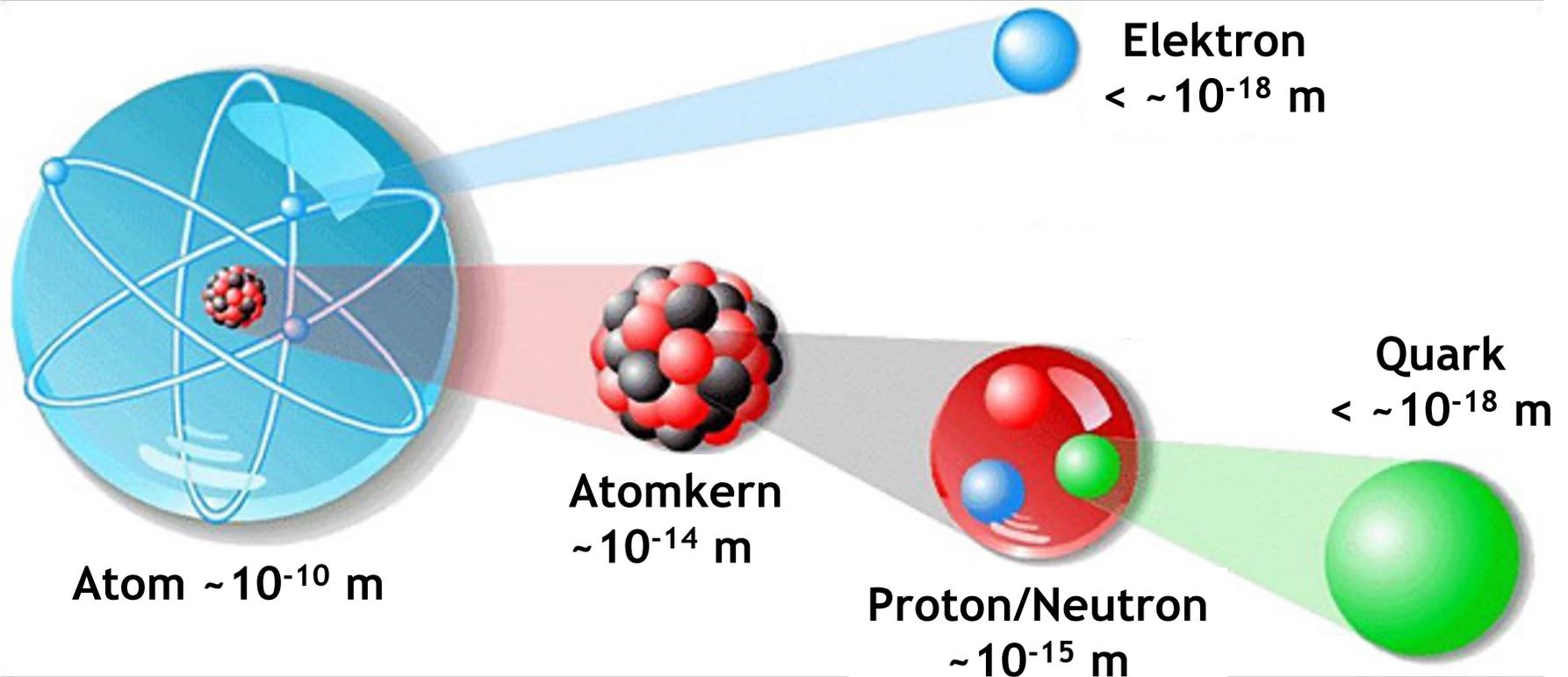
Normale Materie (z. B. Atome, “baryonische Materie”): Quarks, Leptonen
Dunkle Materie
Dunkle Energie

Welche Kräfte herrschen im Universum?

Schwerkraft
Elektromagnetische Kraft
Starke Kraft (Kernkraft)
Schwache Kraft

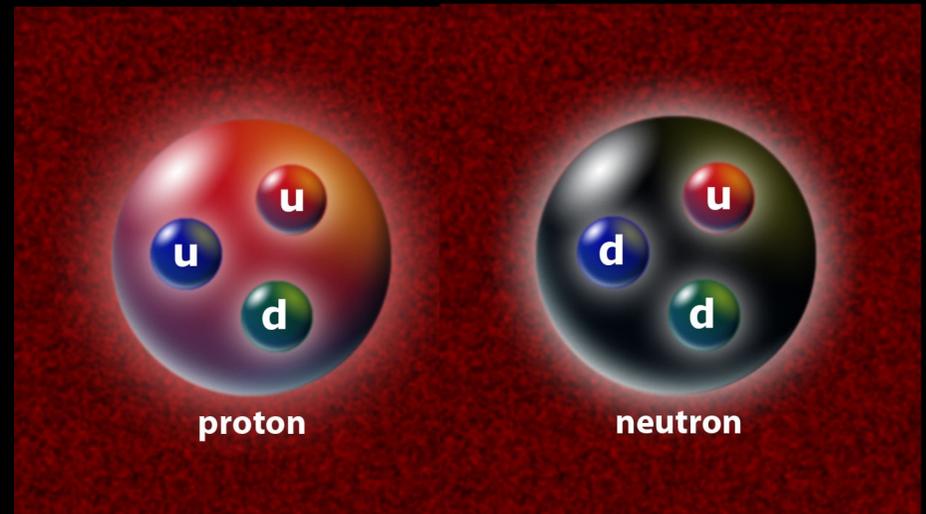
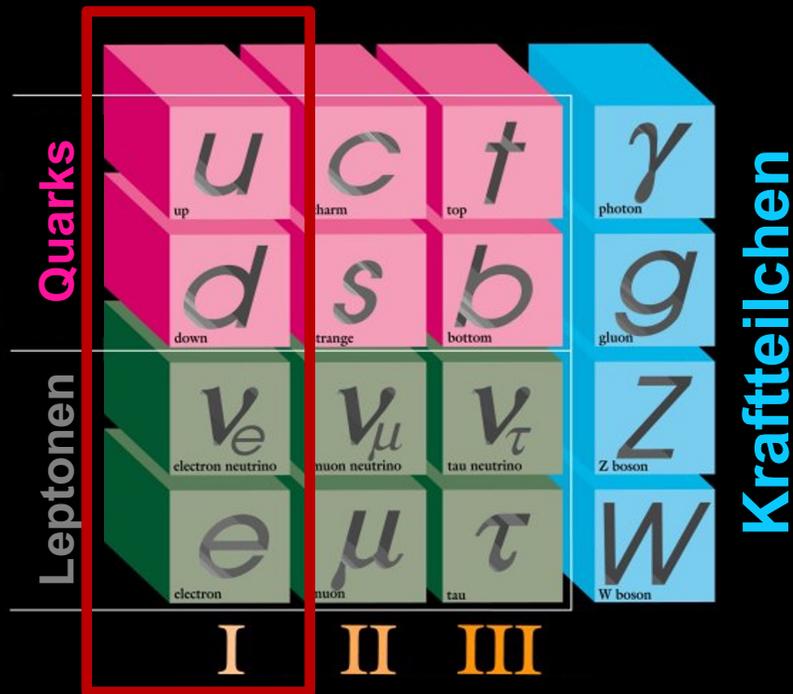
Kräfte werden durch Austausch von Teilchen (Bosonen) vermittelt.

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

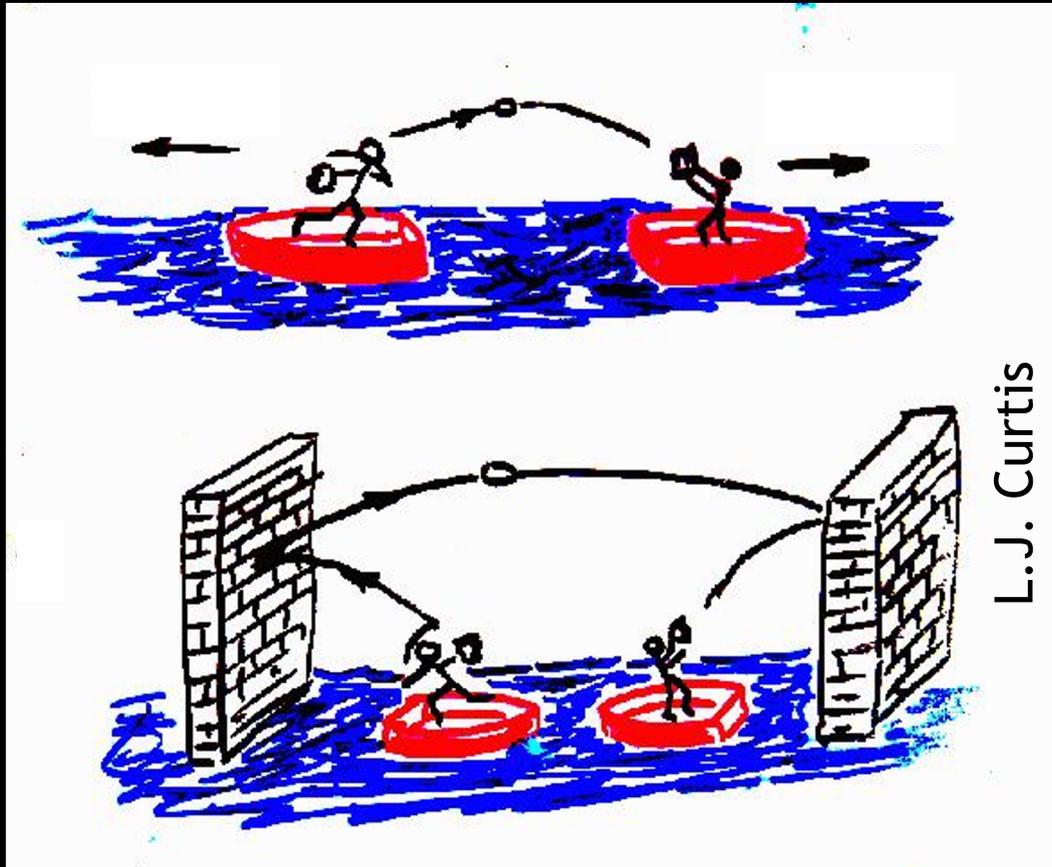
C.E. Wulz

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



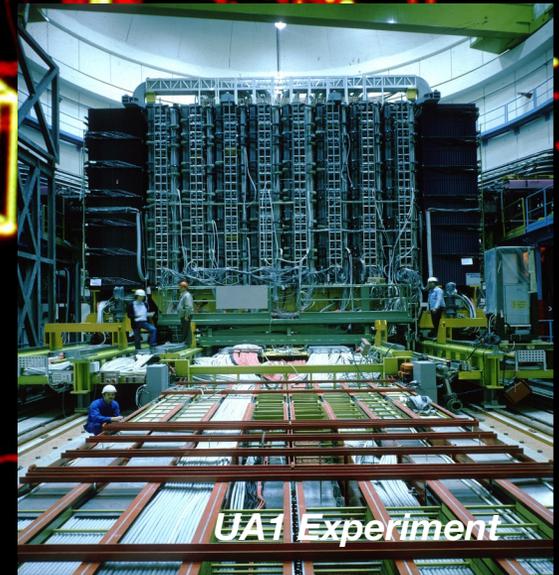
Eichbosonen



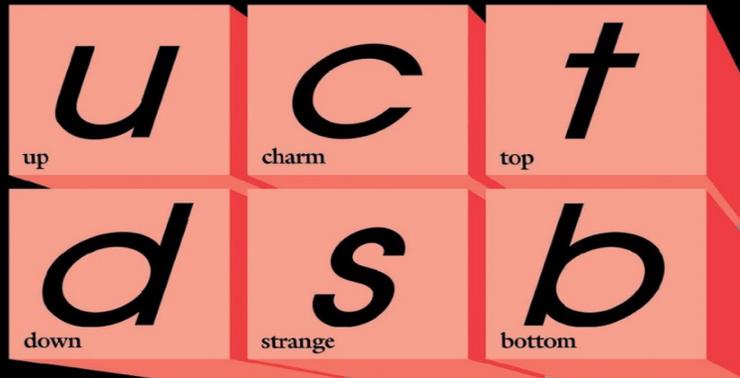
Teilchenaustausch ist für Kraft verantwortlich.

Entdeckung der W und Z am CERN

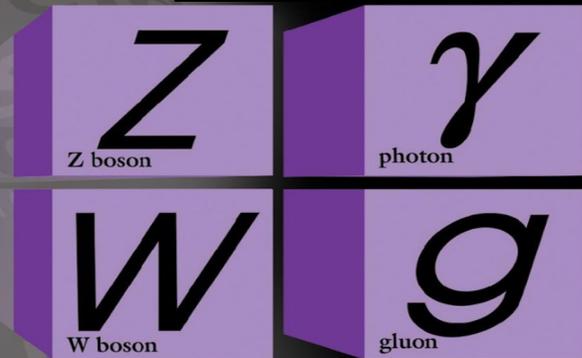
Zerfall eines Z-Teilchens in 2 Elektronen



Quarks



Kraftteilchen



Leptonen

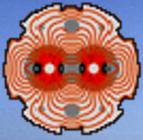
Standardmodell

Erzeugung von Masse durch Higgs-Mechanismus

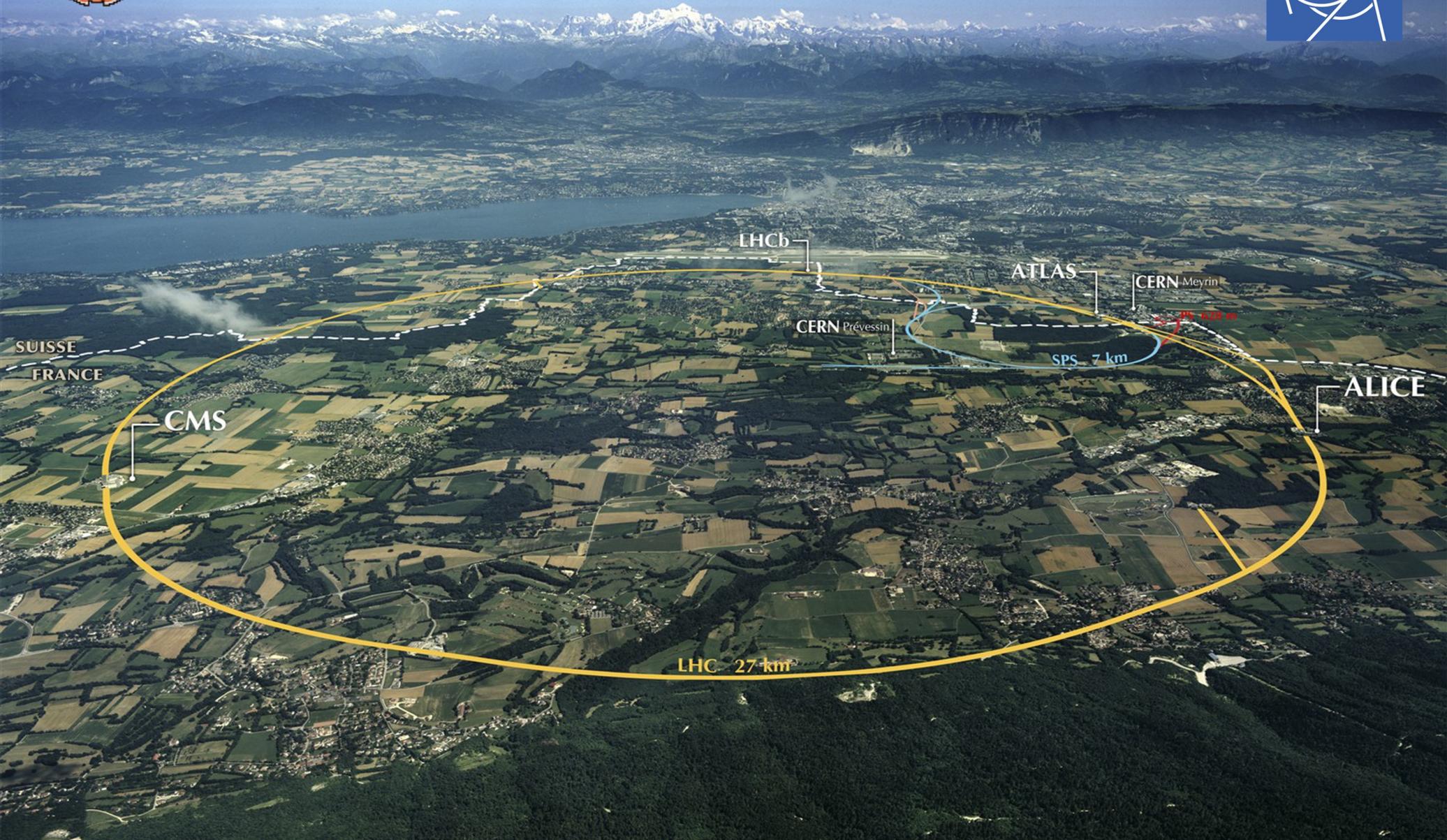
$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger D^\mu \phi - V(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

- 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

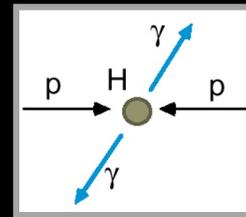


LHC und die Experimente



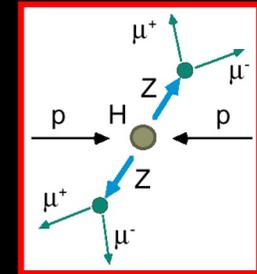
Wie sucht man nach dem Higgs-Teilchen?

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:



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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



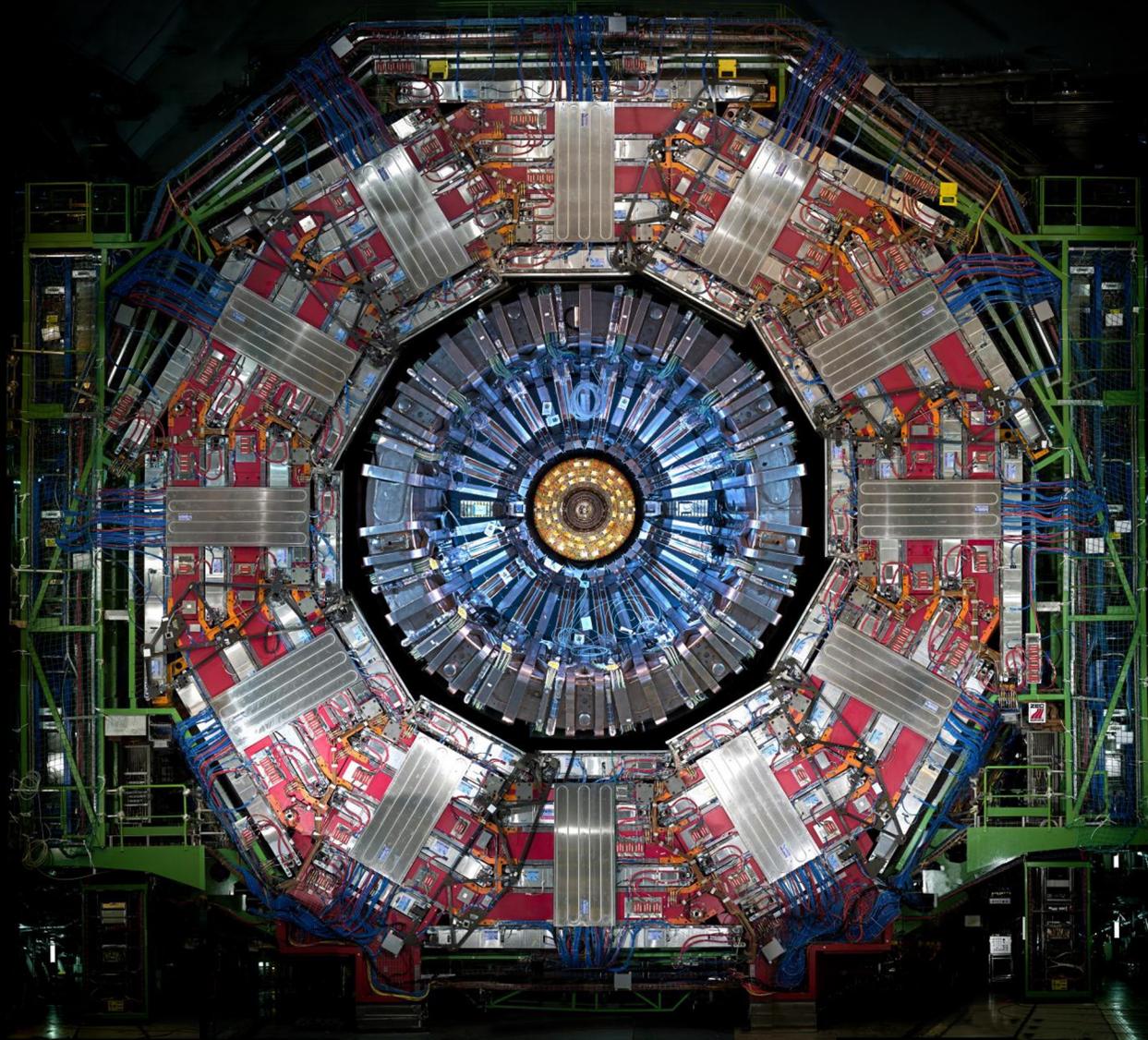
$$H \rightarrow WW \rightarrow 2e2\nu \text{ oder } 2\mu2\nu$$

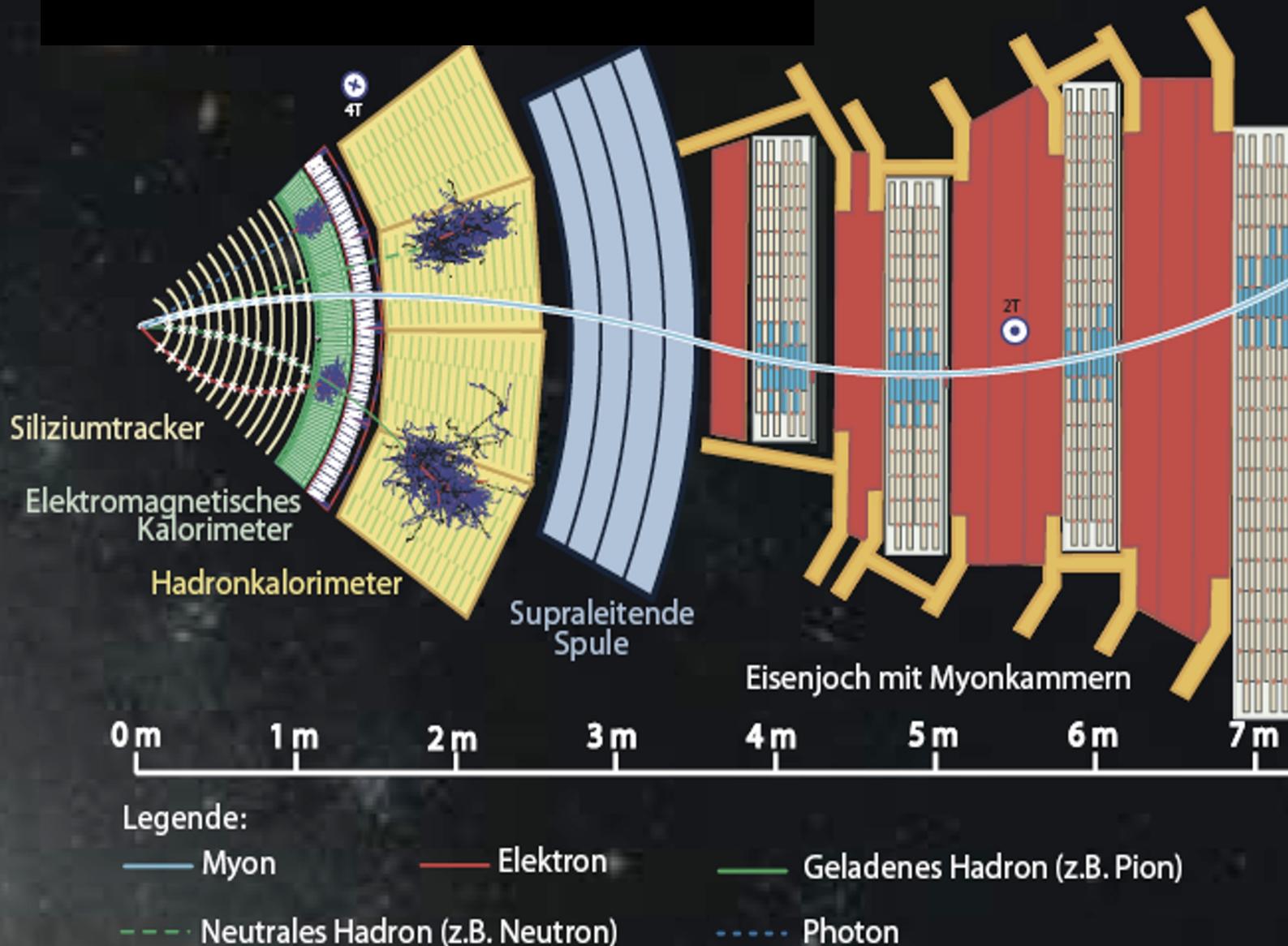
$$H \rightarrow bb$$

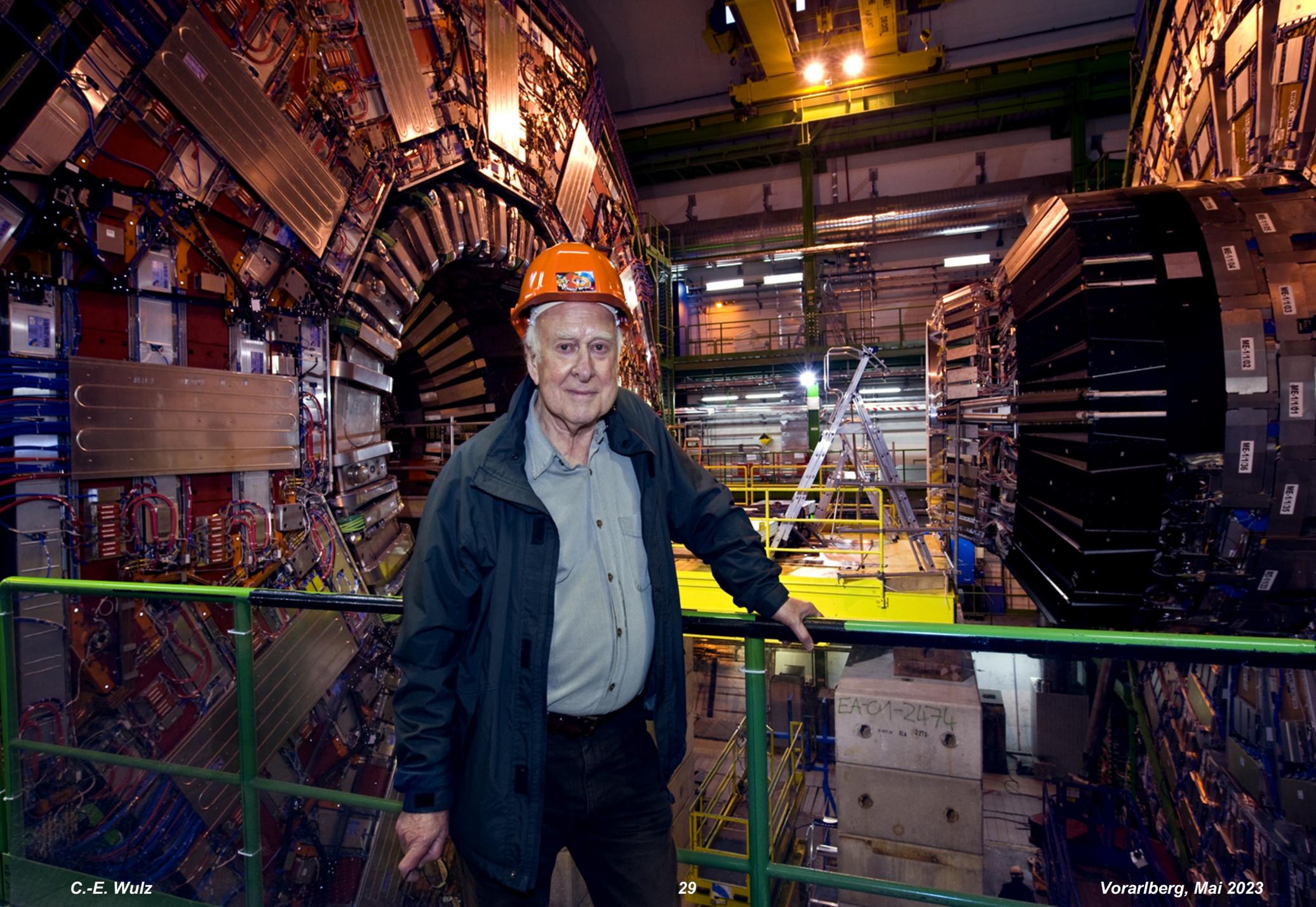
$$H \rightarrow \tau\tau$$

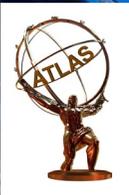
Andere Teilchen können im Detektor wie ein Higgs-Boson aussehen und somit ein “Signal” vortäuschen \rightarrow **Untergrund**.

CMS-Experiment

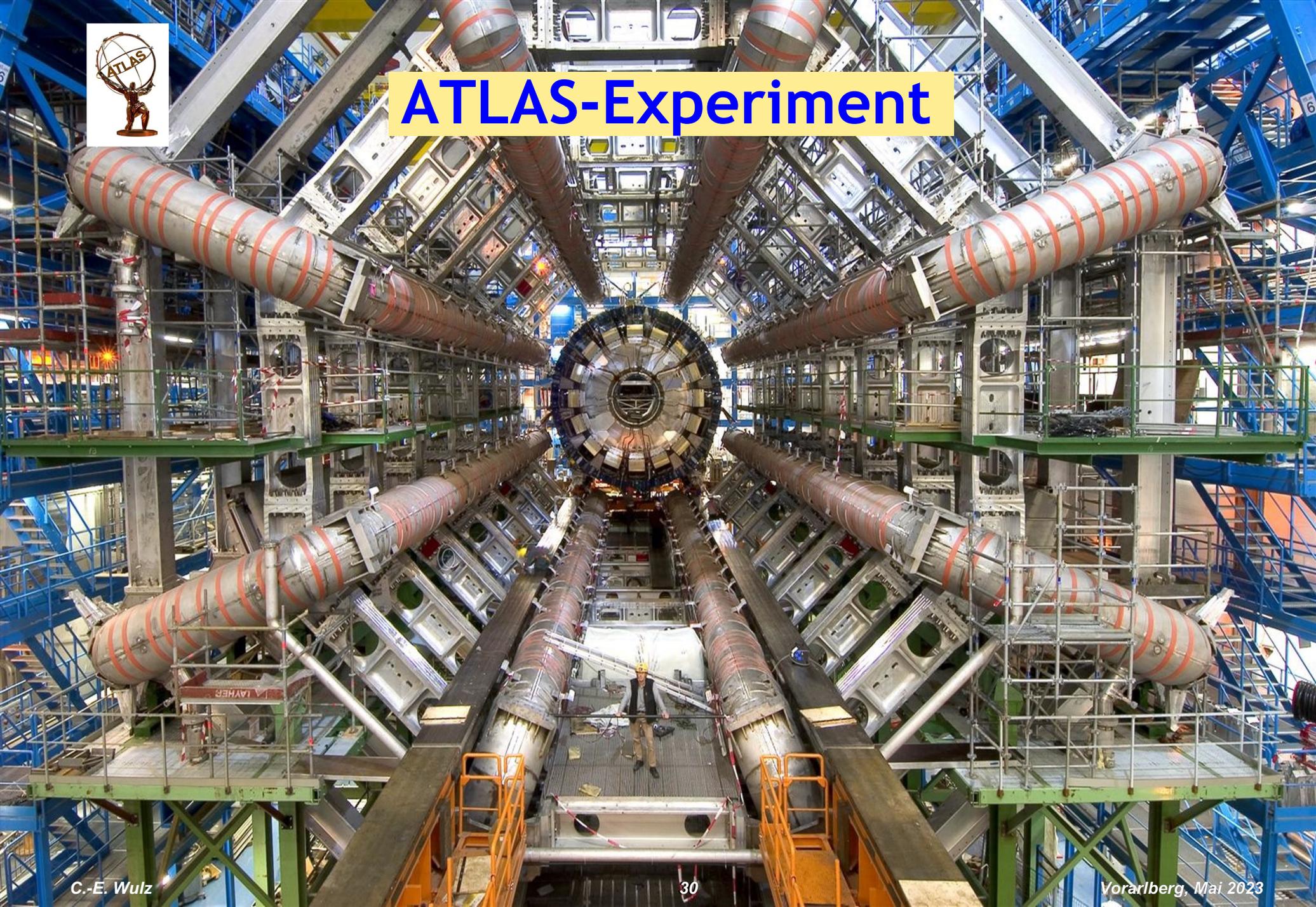






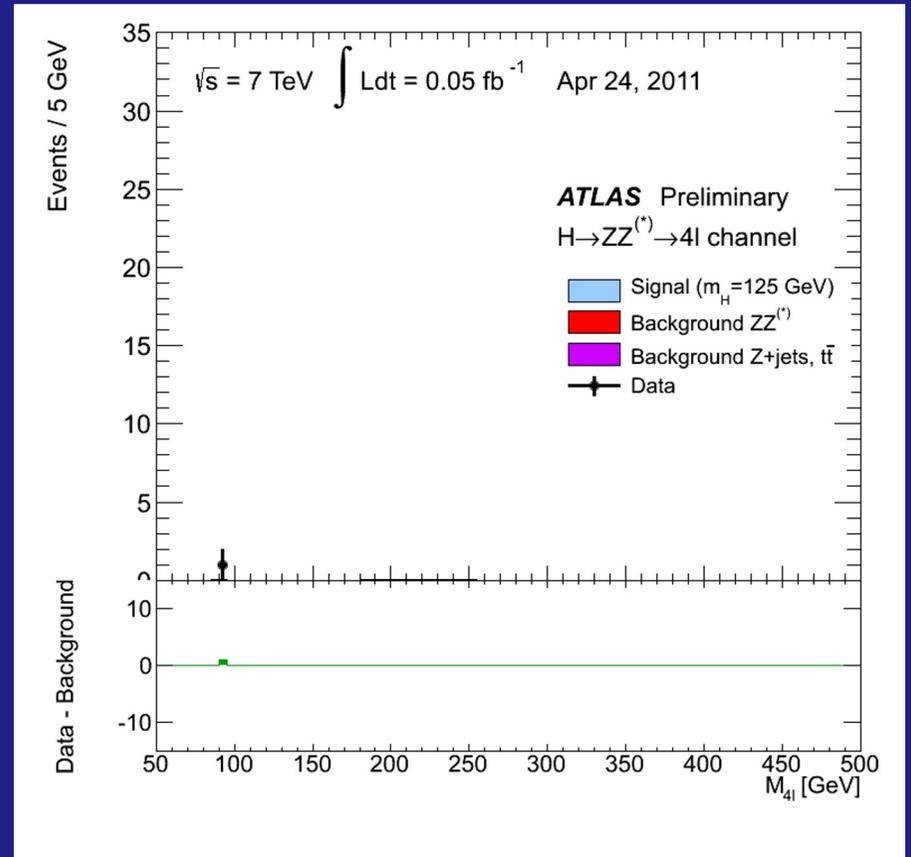
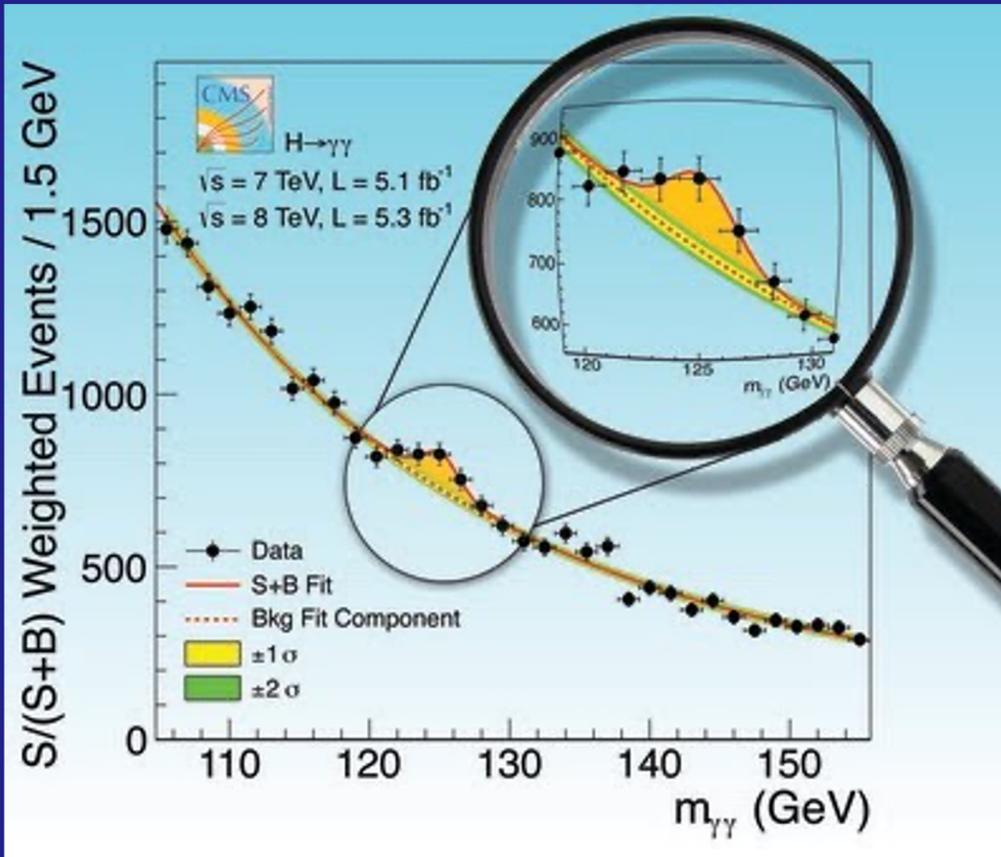


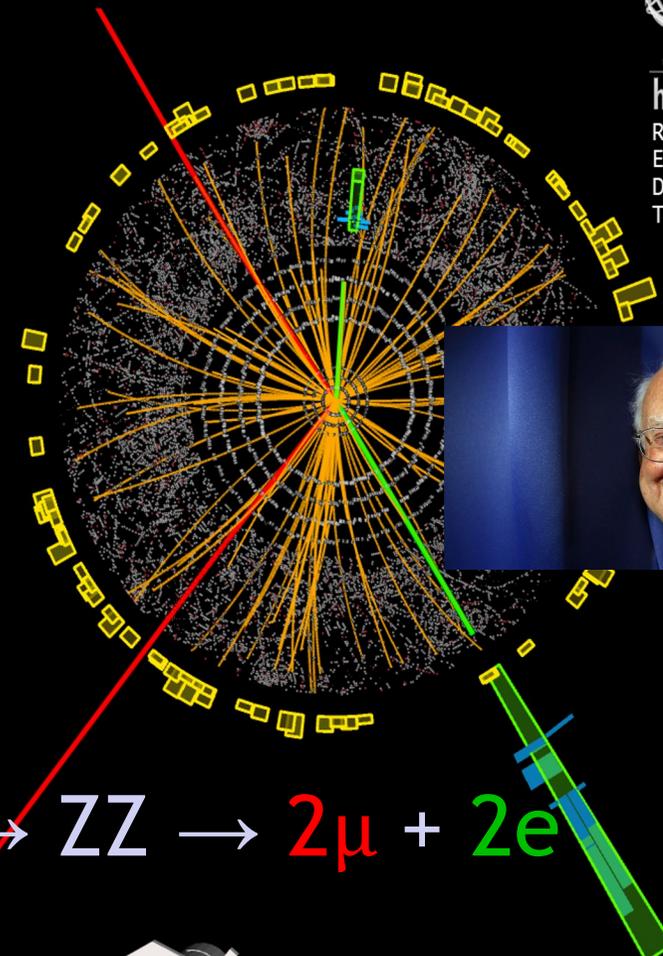
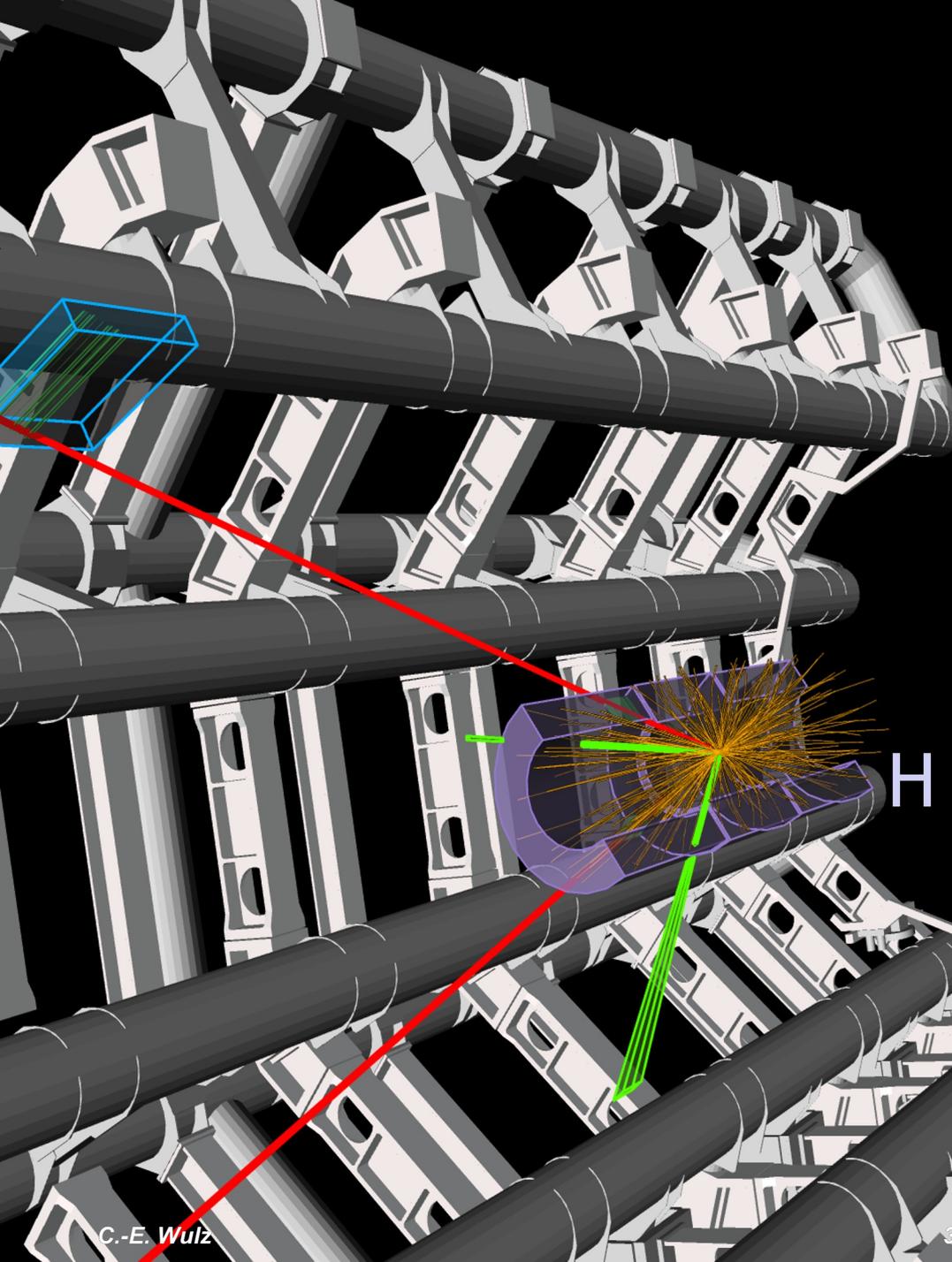
ATLAS-Experiment



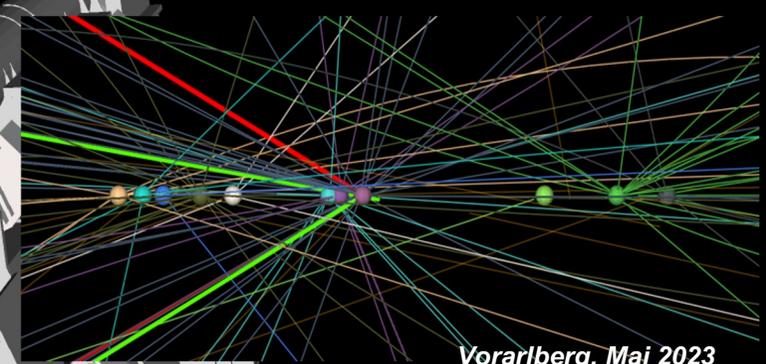
Masse des Higgs-Bosons (≈ 125 GeV)

Das Higgs-Boson ist zehn Jahre alt!





$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\mu + 2e$$





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.”



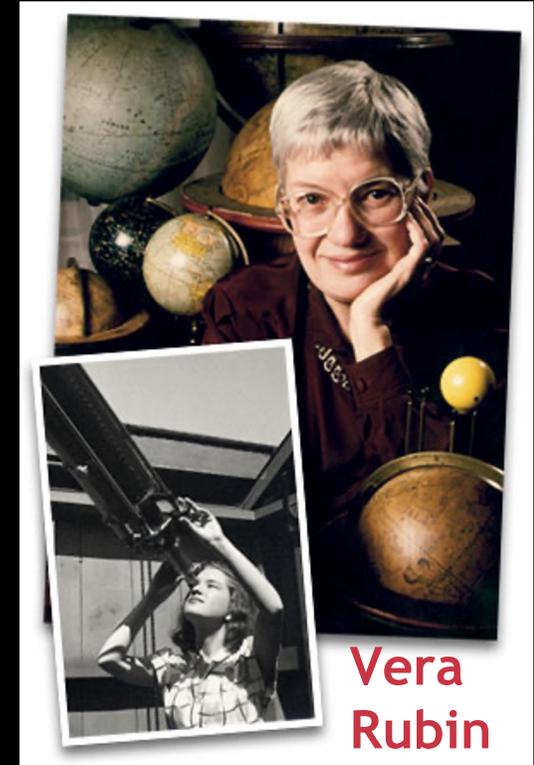
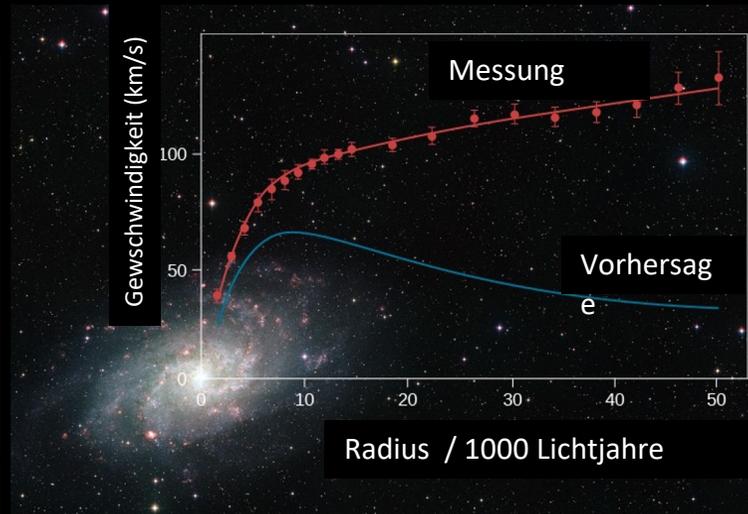
Ungelöste (und ein gelöstes) Rätsel

- ✓ 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.



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

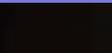


Imaginärer Lichtweg

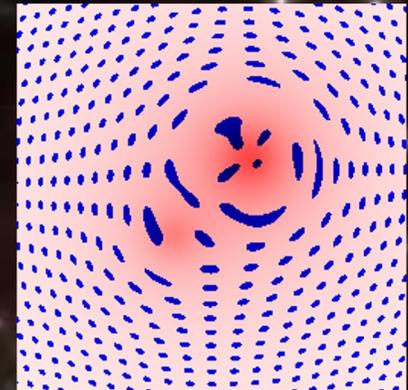
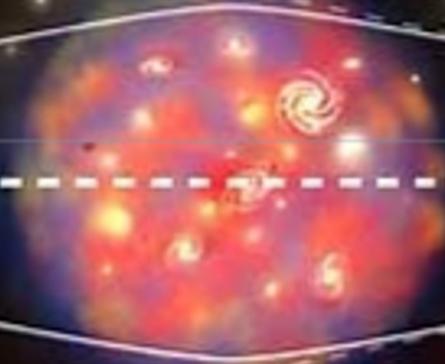
Tatsächlicher
Lichtweg



Abbild der Galaxie



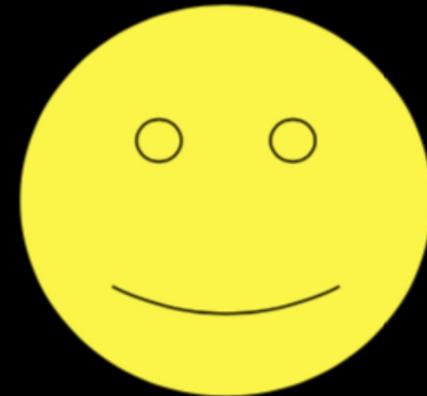
Massives
Objekt



Smiley

“Hubble sees a smiling lens”

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



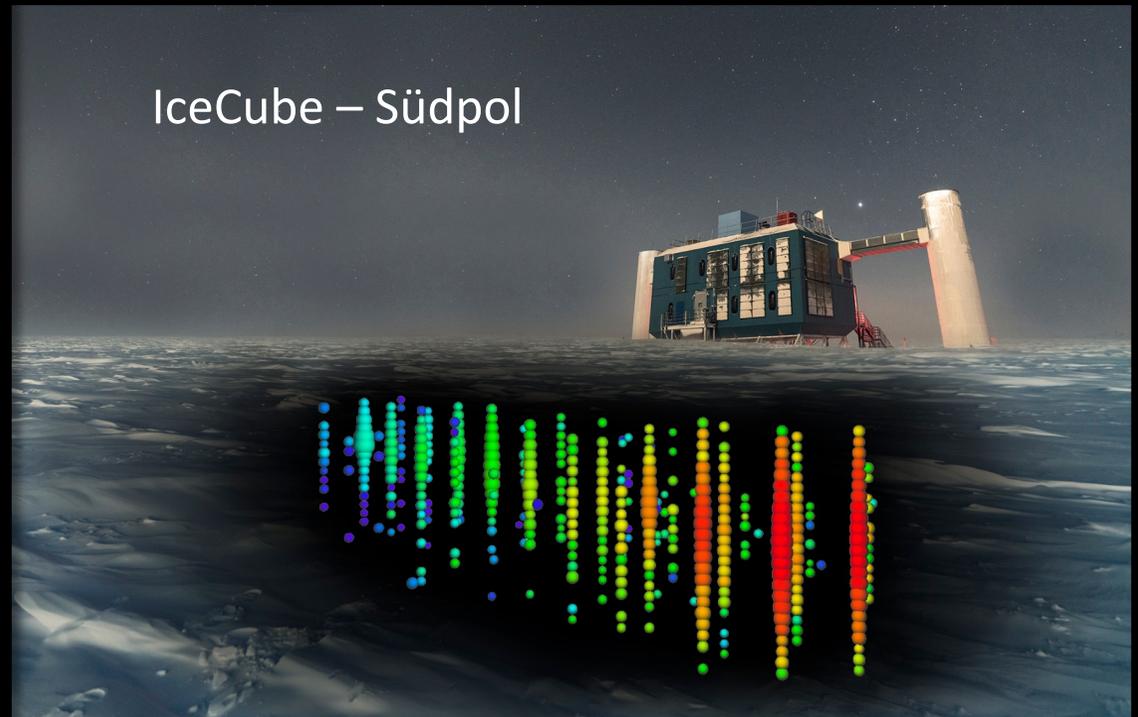


Experimente für Dunkle Materie

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



CRESST – Gran Sasso



IceCube – Südpol

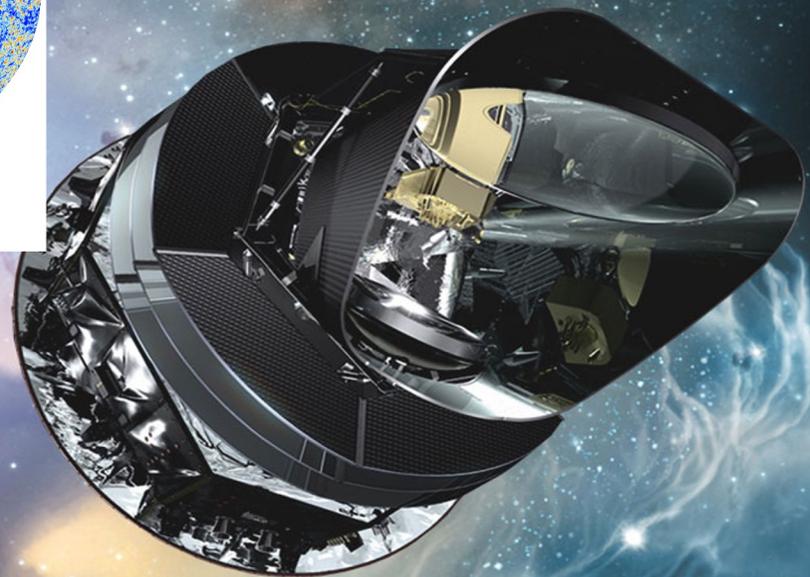
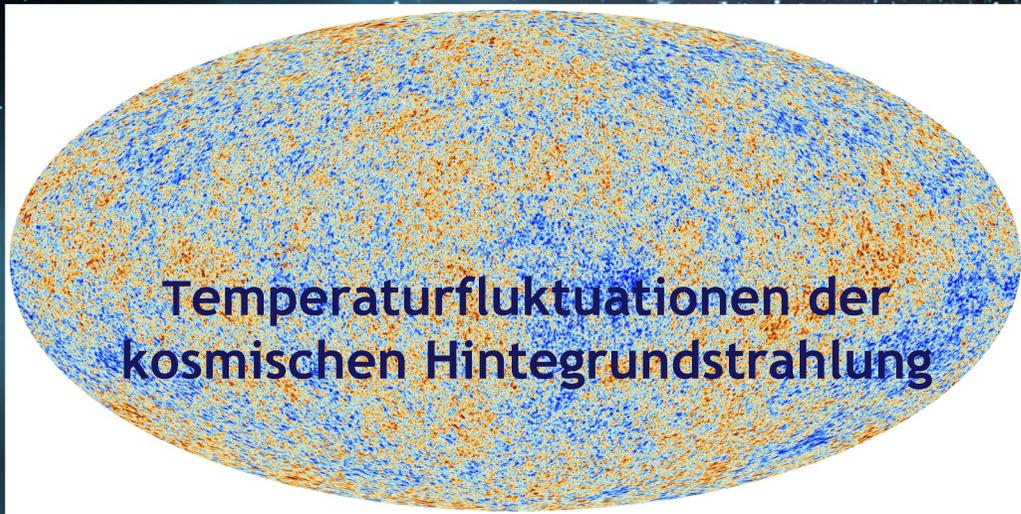


AMS auf der ISS





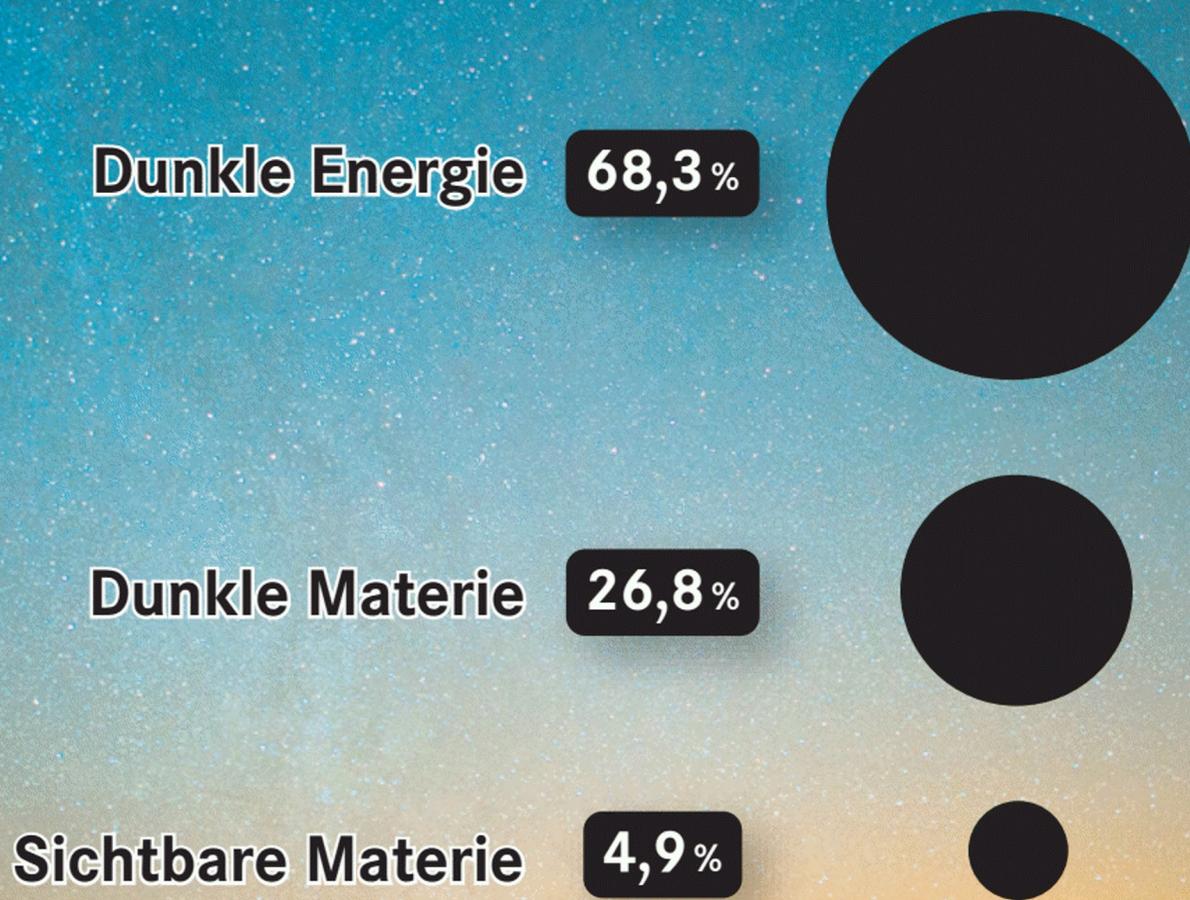
Planck-Satellit



14. Mai 2009 -
23. Okt. 2013



■ Bausteine des Universums



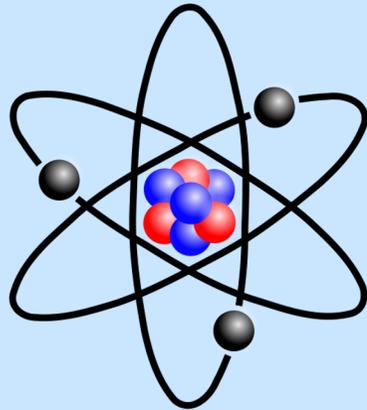
BZ-GRAFIK/DRE

QUELLE: GEO

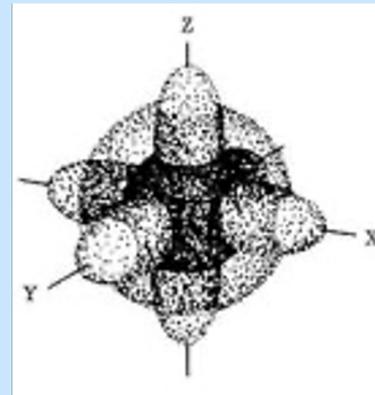


Quantentheorie

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!

Nobelpreis für Physik 2022

<https://www.nobelprize.org>



NOBELPRISET I FYSIK 2022 THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2022



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Photo: Royal Society

Alain Aspect

Université Paris-Saclay &
École Polytechnique, France

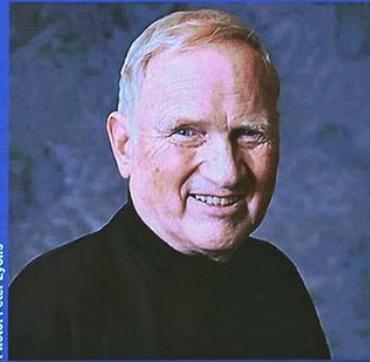


Photo: Peter Lyons

John F. Clauser

J.F. Clauser & Assoc.,
USA

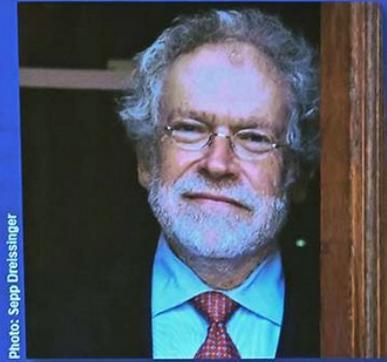


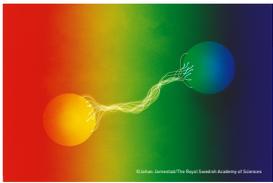
Photo: Sepp Dreissinger

Anton Zeilinger

University of Vienna,
Austria

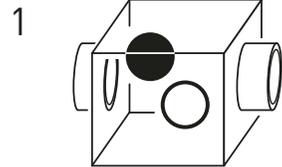
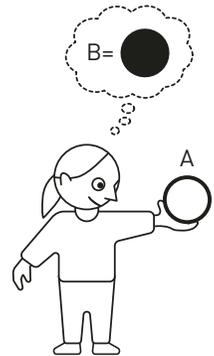
”för experiment med sammanflätade fotoner som påvisat brott mot Bell-olikheter och banat väg för kvantinformativvetenskap”

“for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science”

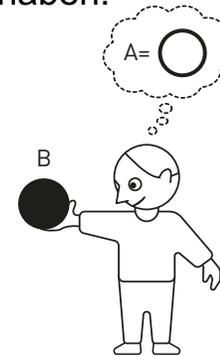
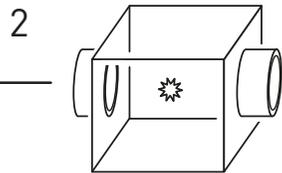


Quantenmechanische Verschränkung

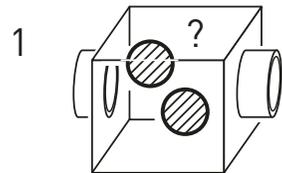
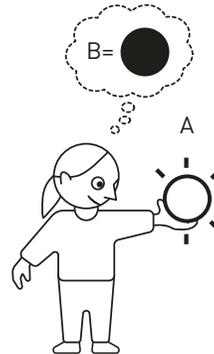
Hypothese 1:
VERSTECKTE VARIABLEN



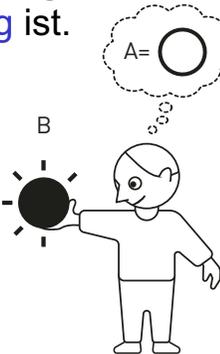
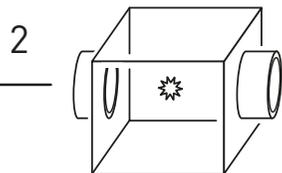
In einer Theorie mit versteckten Variablen, müssen die Bälle **versteckte Information** über die Farbe, die sie zeigen sollen, gespeichert haben.



Hypothese 2:
QUANTENMECHANIK



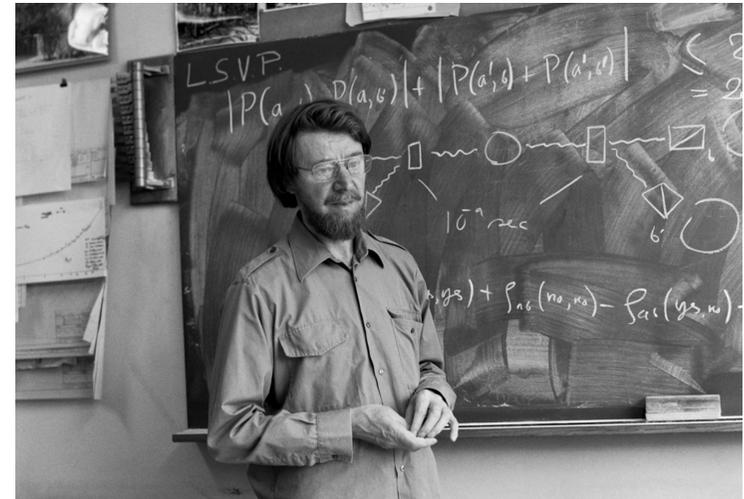
Die Quantenmechanik sagt, dass die Bälle so lange grau sind, bis jemand sie anschaut und einer zufällig weiß und der andere schwarz wird. Die Bell-Ungleichung beinhaltet, dass man herausfinden kann, welche der beiden Hypothesen richtig ist. Die Experimente von Clausen, Aspect, Zeilinger zeigten, dass die **quantenmechanische Beschreibung richtig** ist.



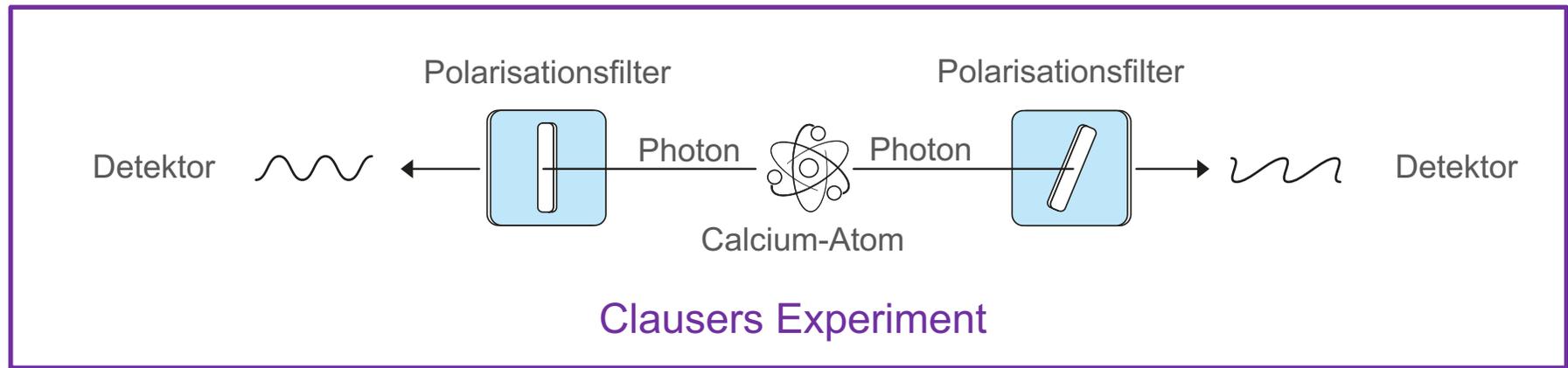
Experimentieren mit der Bell-Ungleichung

Es gibt ein Experiment, mit dem man bestimmen kann, ob die Welt rein quantenmechanisch, oder mit versteckten Variablen funktioniert. Wird dieses Experiment viele Male wiederholt, führen alle Theorien mit verborgenen Variablen zu einer Korrelation zwischen den Ergebnissen, die kleiner oder höchstens gleich einem bestimmten Wert sein muss (Bell-Ungleichung).

Quantenmechanik führt zu höheren Werten -> Bell-Ungleichung ist verletzt!

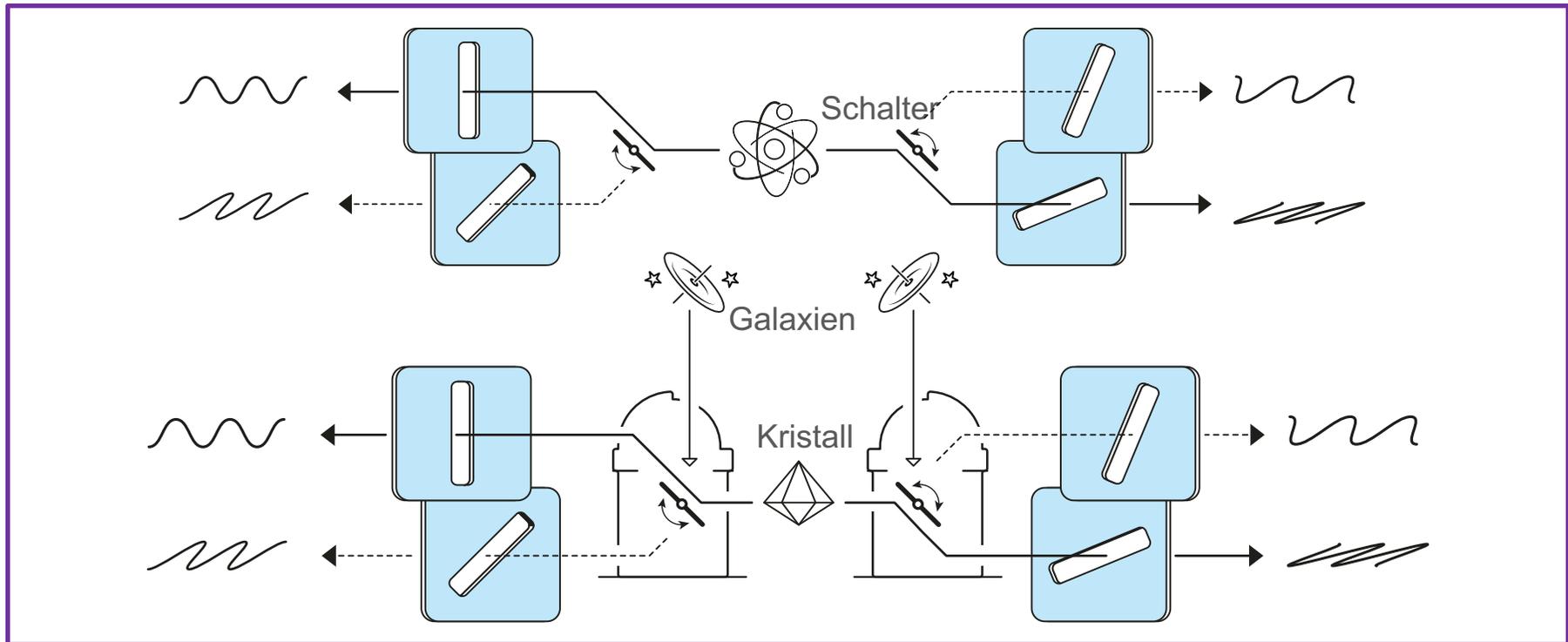


John Stuart Bell am CERN 1982



Messung der Photonen hinter Filtern in verschiedenen Winkeln zueinander -> Koinzidenzrate in den beiden Detektoren ist höher als für Theorien mit versteckten Variablen!

Experimentieren mit der Bell-Ungleichung



Aspects und Zeingers Experimente

Schalter können nach der Emission der Photonen umgelegt werden, so dass das System keine Vorabinformation haben kann, und auch beide Seiten sicher unabhängig voneinander sind

Zeinger: Zufällige Orientierung der Filter durch Signale von entfernten Galaxien, so dass sicher ist, dass sich die Signale nicht beeinflussen. Zeinger pionierte auch Verschränkung von mehr als 2 Teilchen -> **Grundlage für Quanteninformation**

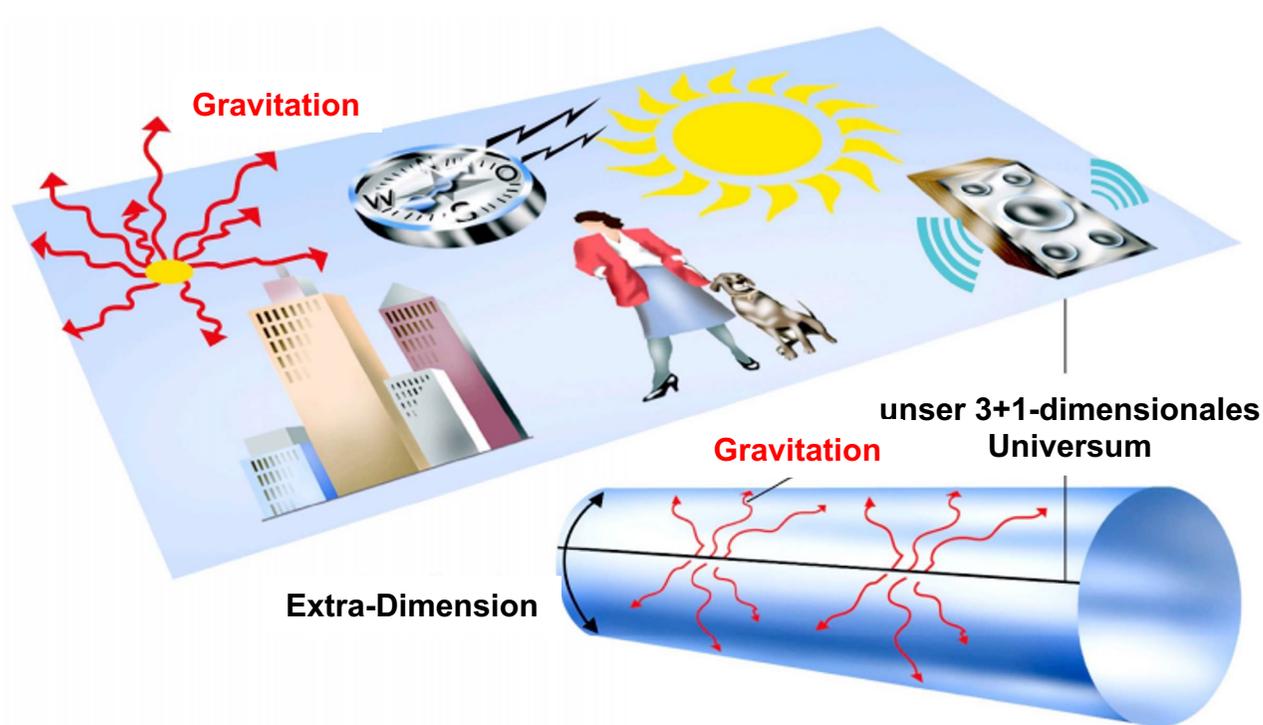


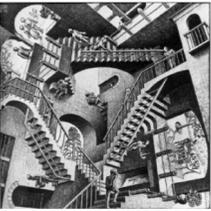
Gravitation und Extradimensionen

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

Mögliches Modell:

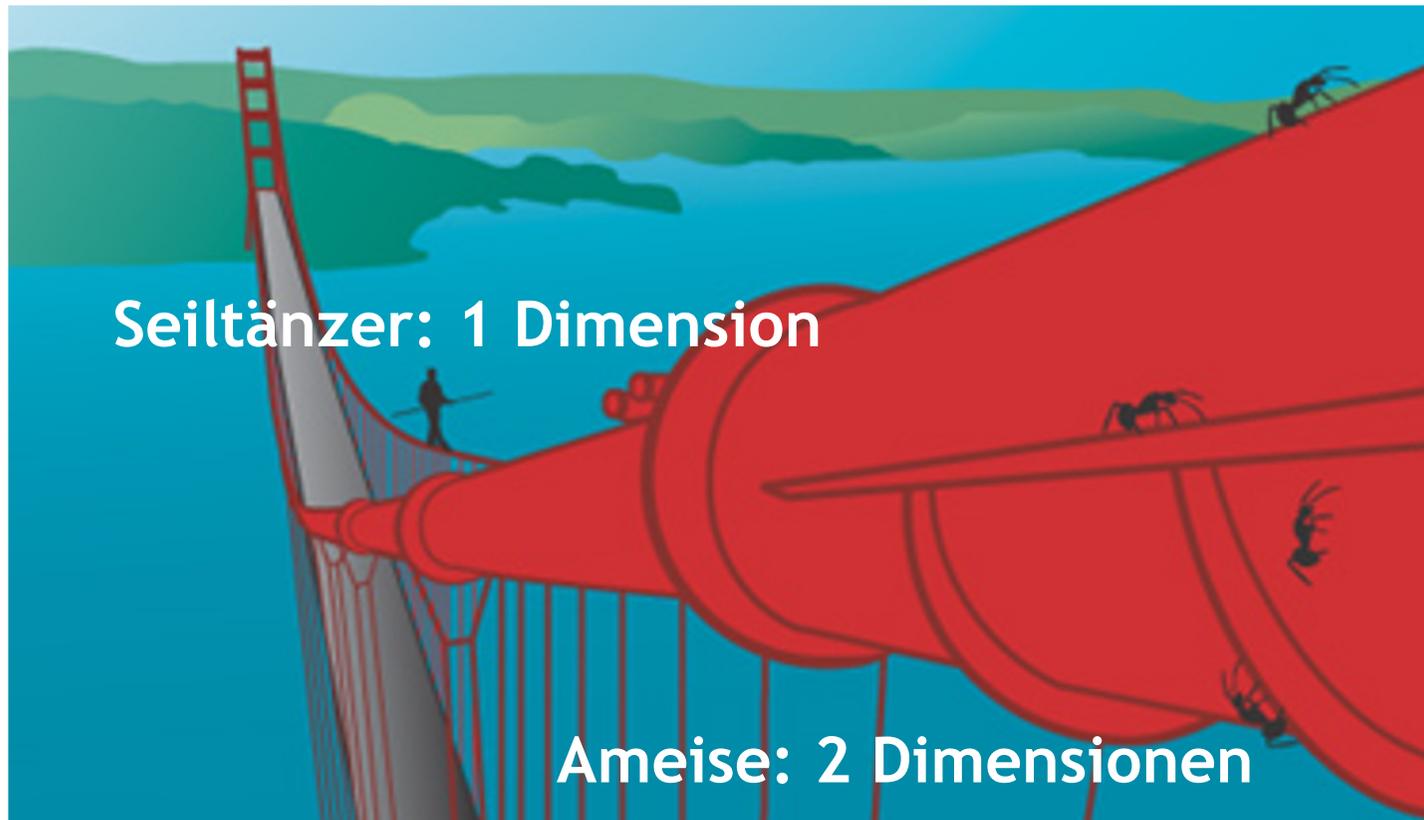
- Bekannte Teilchen leben im 3+1-dimensionalen Universum (Brane)
- **Gravitation lebt in einem höherdimensionalen Universum (Bulk)**
- Extra-Dimensionen sind aufgerollt mit Radius R





Extradimensionen

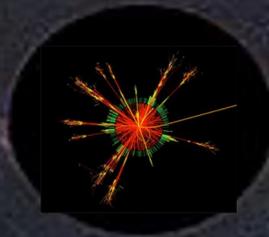
Unser bekanntes Universum: 3 Raumdimensionen + 1 Zeitdimension
Stringtheorie: mindestens 9 + 1 Dimensionen



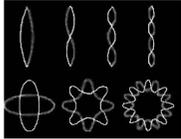
2. Dimension: aufgerollt

Schwarze Löcher am LHC

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

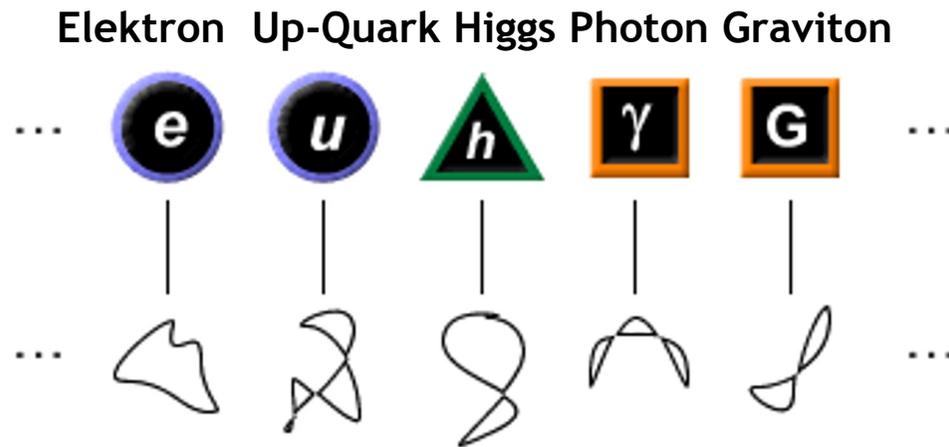


Sie sollten jedoch durch quantenmechanische Effekte sehr schnell ($\sim 10^{-35}$ s) verdampfen (Hawking-Strahlung), unter Erzeugung aller möglichen Standardmodellteilchen.
Bisher wurden jedoch keine solchen schwarzen Löcher gefunden.



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.

Zusammenfassung

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

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

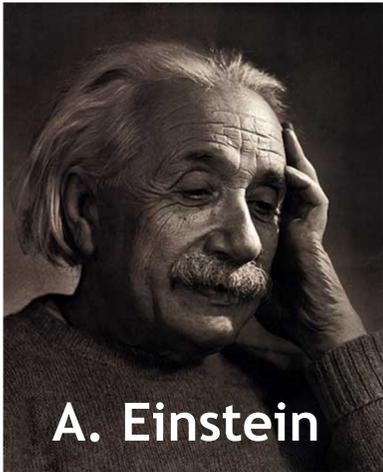
Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie müssen gemeinsam zu ihrer Beantwortung beitragen.

WIR LEBEN IN INTERESSANTEN ZEITEN!



Grundlagenforschung

Sie war stets eine Voraussetzung für technischen Fortschritt!

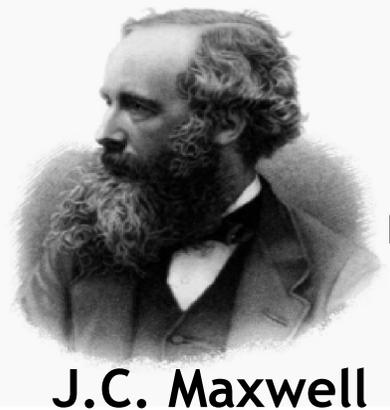


A. Einstein

→ Relativitätstheorie →



100% Grundlagenforschung



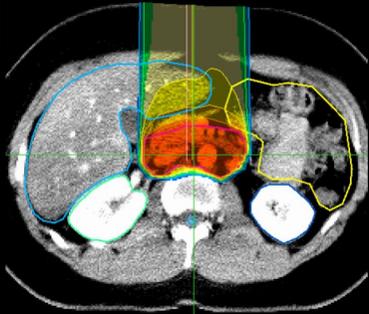
J.C. Maxwell

→ Elektromagnetismus →

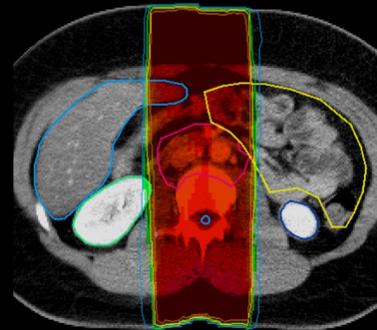




Beschleuniger und Antimaterie



Krebstherapie mit Kohlenstoffionen



Konventionelle
Krebstherapie mit
Photonen

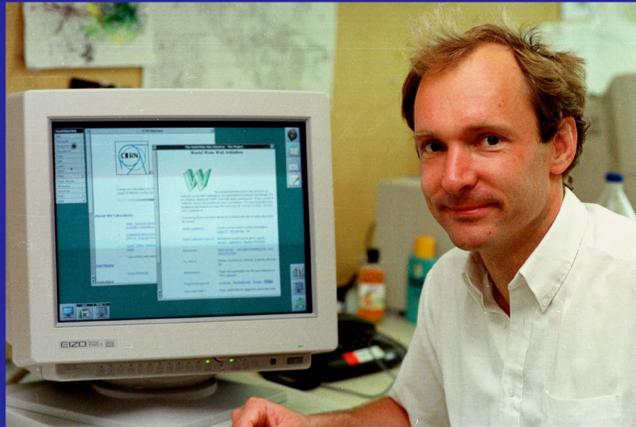


Ca. 9000 der 17000 Beschleuniger weltweit für
medizinische Zwecke

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.”

Vague but exciting ...

CERN DD/OC
Information Management: A Proposal
Tim Berners-Lee, CERN/DD
March 1989

Information Management: A Proposal

Abstract

This proposal concerns the management of general information about accelerators and experiments at CERN. It discusses the problems of loss of information about complex evolving systems and derives a solution based on a distributed hypertext system.

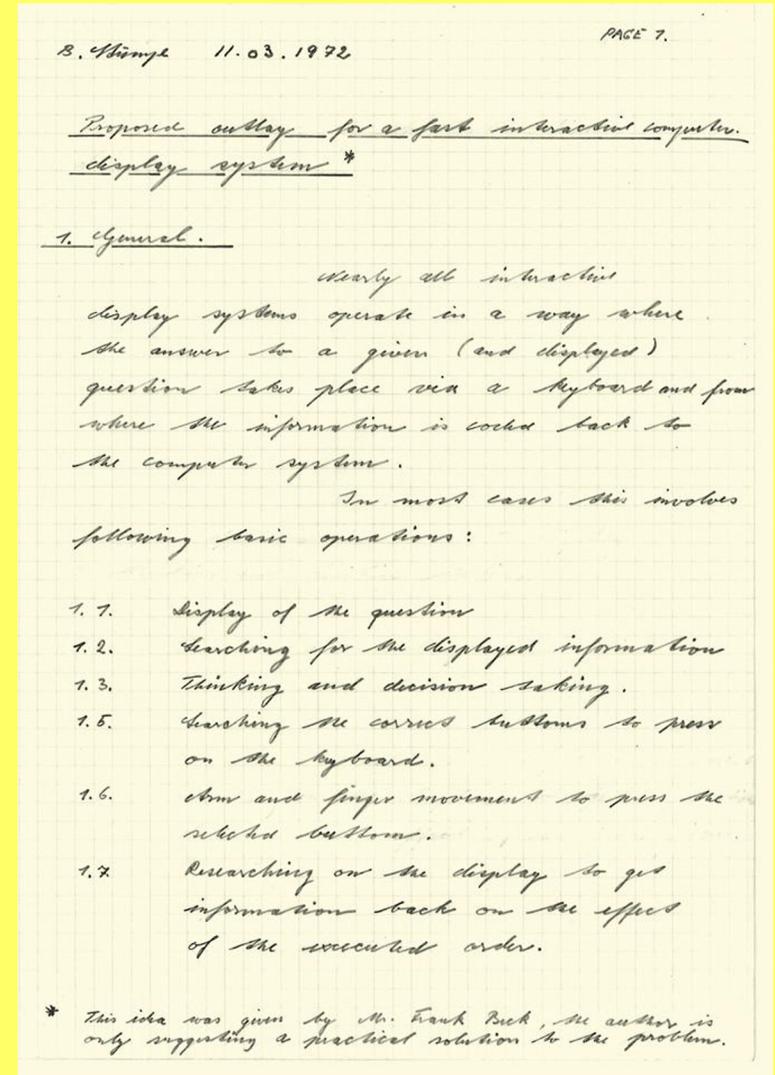
Keywords: Hypertext, Computer conferencing, Document retrieval, Information management, Project control



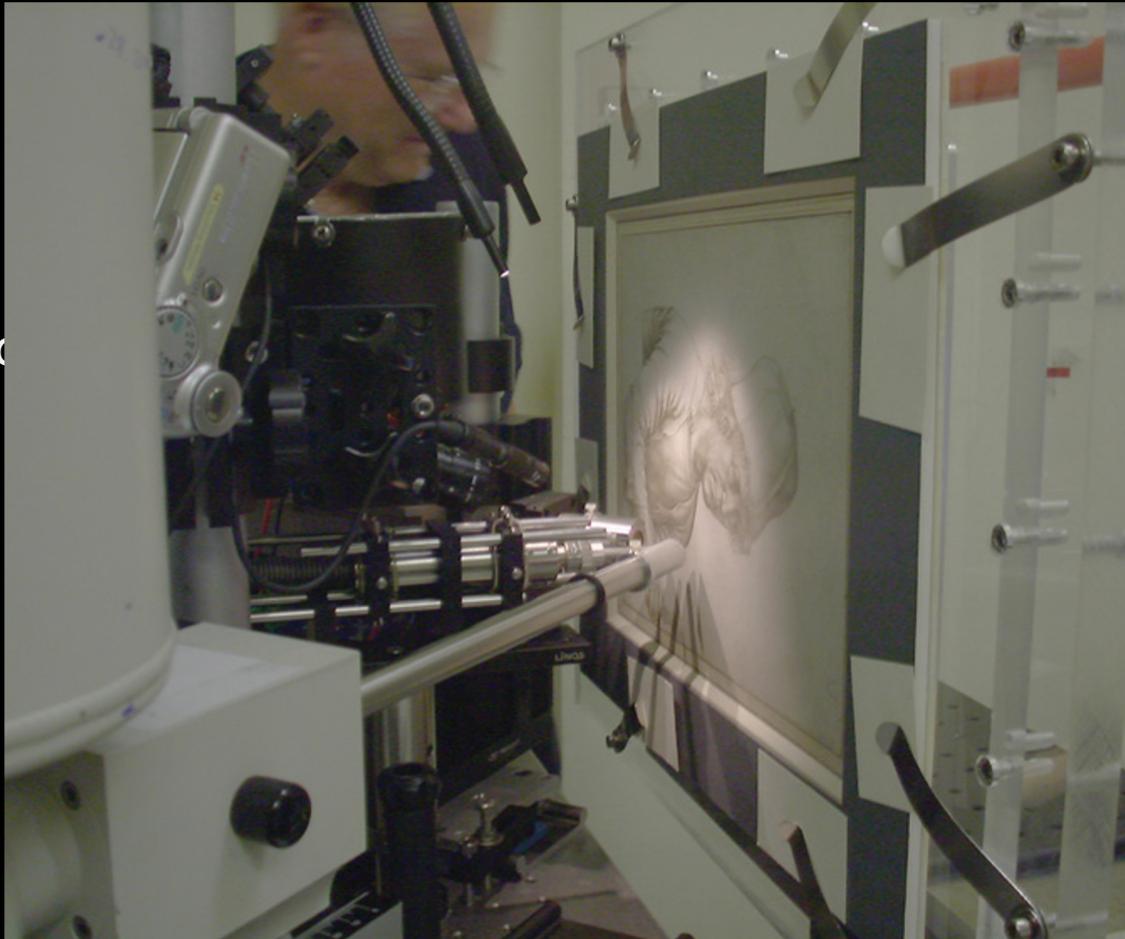
Der erste kapazitive Touchscreen



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



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

Geschichte des Universums

