



Teilchenphysik

CERN
Lehrerprogramm
11. Nov. 2022

Claudia-Elisabeth Wulz
Institut für Hochenergiephysik
Österreichische Akademie der Wissenschaften

**Woraus besteht das Universum?
Welche Kräfte wirken zwischen seinen Bestandteilen?**



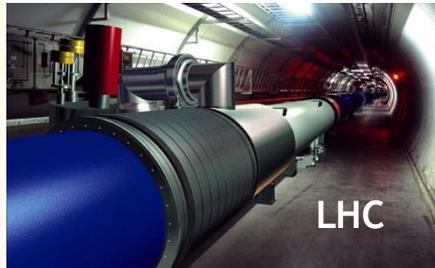
*Wie trägt die Teilchenphysik bei?
Was bringt sie uns?*

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

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, Atominstitut



Terrestrische Teleskope

z.B. ALMA, VLT



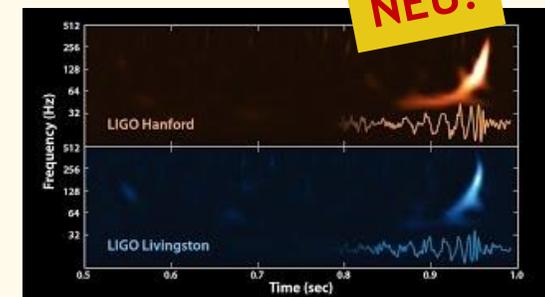
Raumsonden

z.B. Hubble, Planck



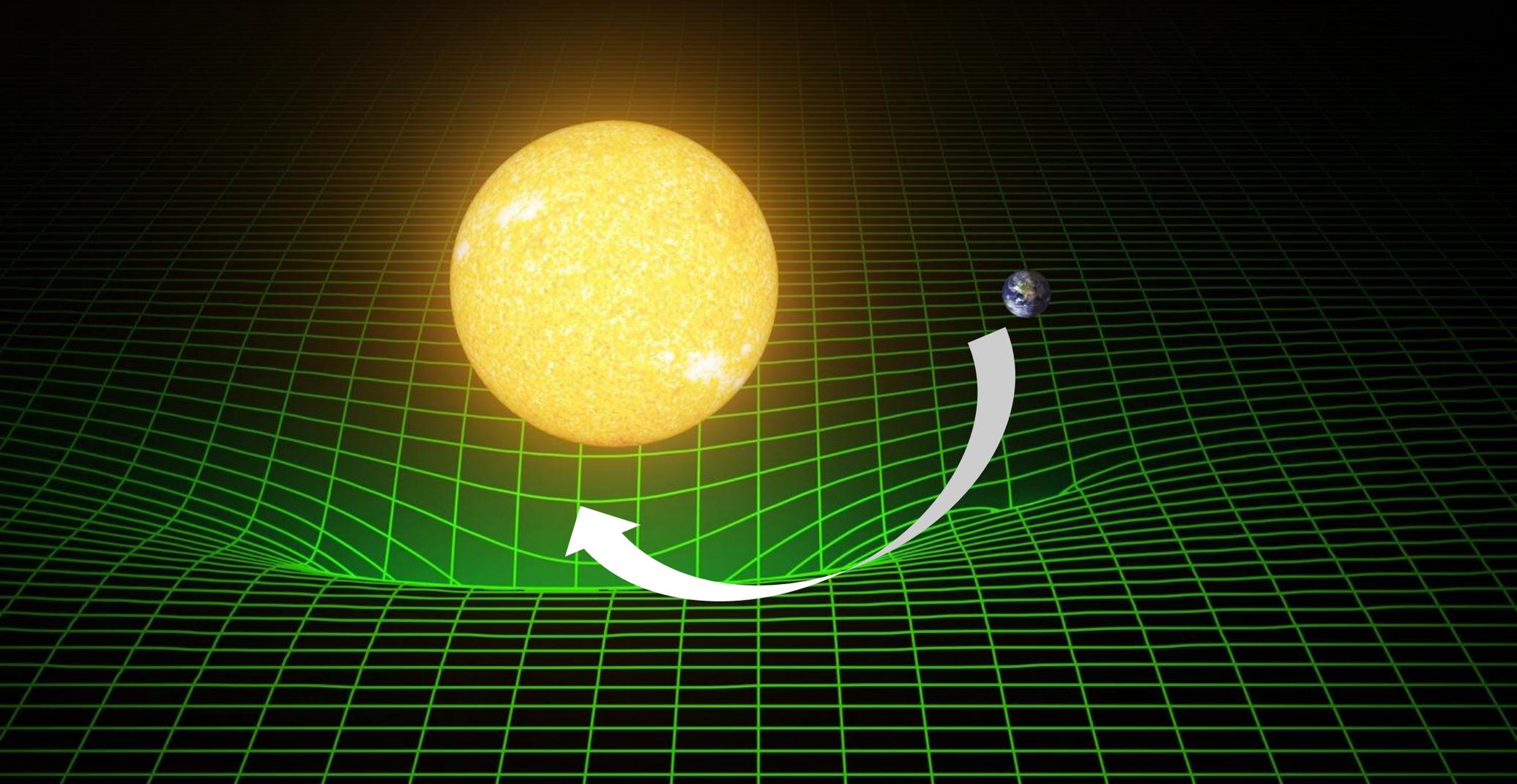
Gravitationswellenexperimente

z.B. LIGO, VIRGO



Allgemeine Relativitätstheorie - Einstein

Krümmung der Raumzeit

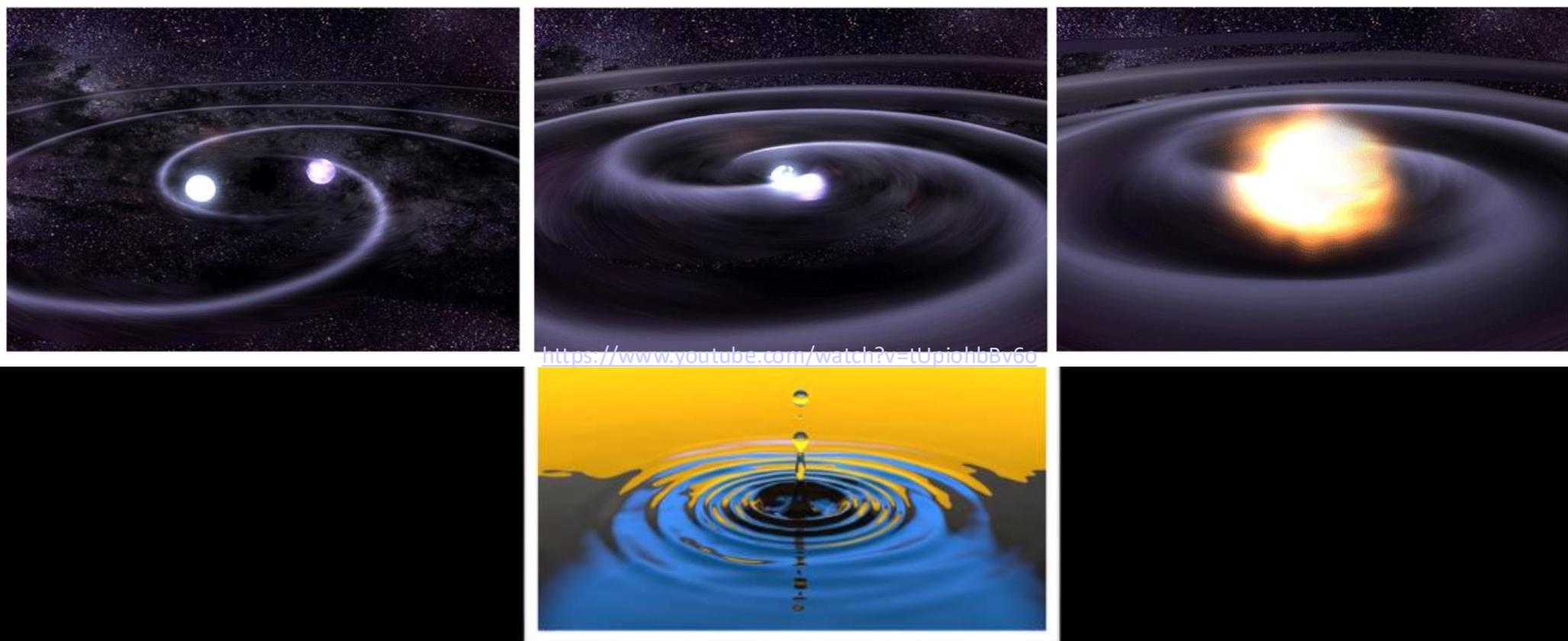


Gravitationswellen - eine neue Ära der Physik

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)

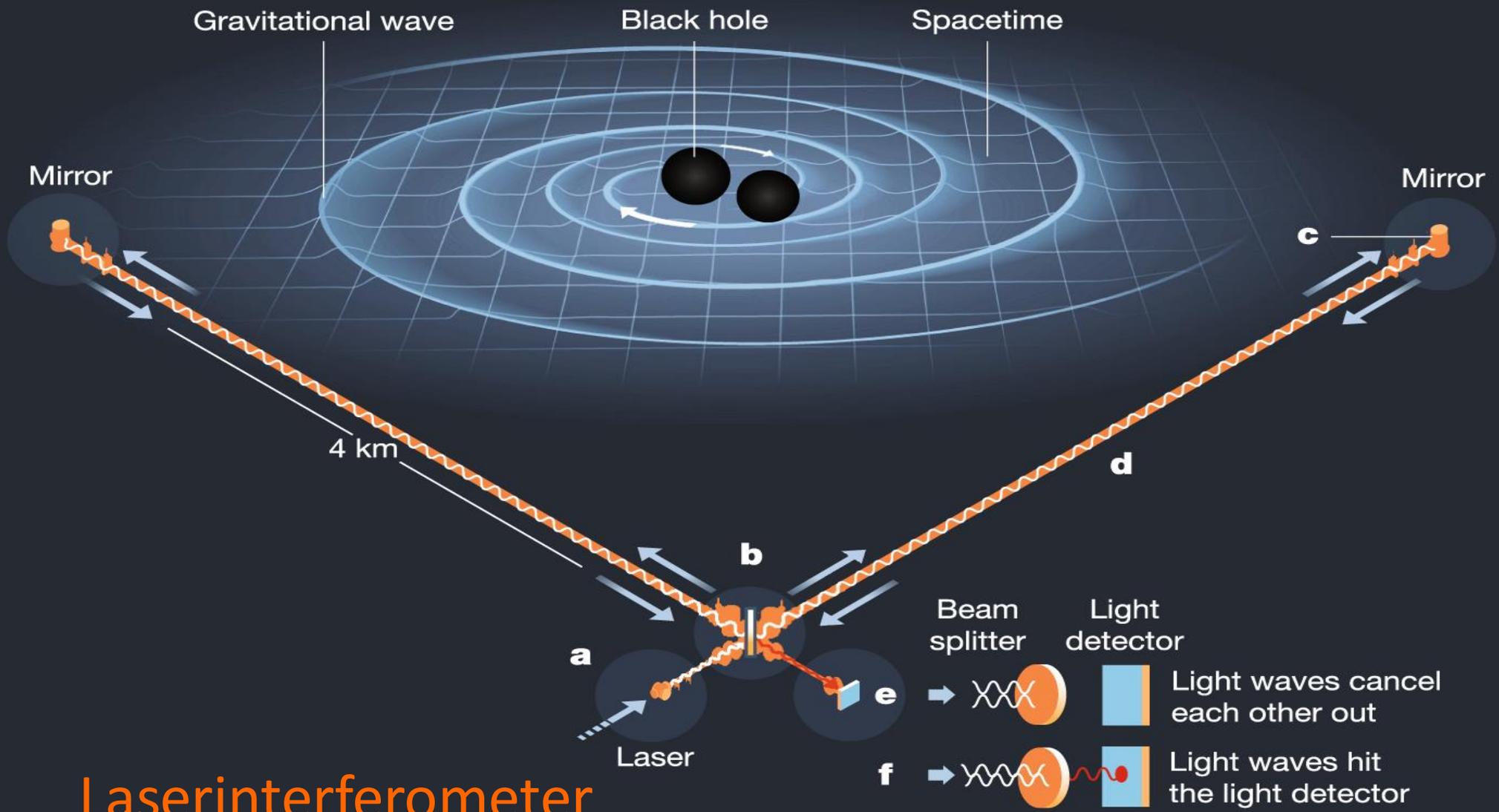


LIGO-Livingston (USA)



2017

Rainer Weiss
Barry Barish
Kip Thorne

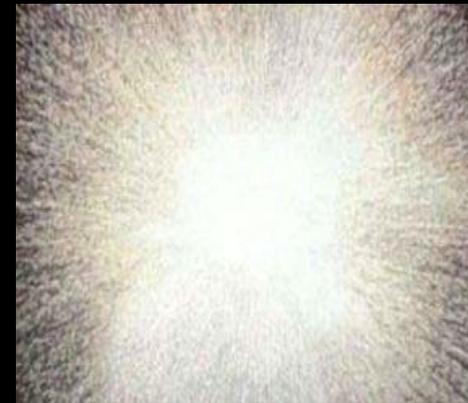


Laserinterferometer

Wie und wann ist das Universum entstanden?

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

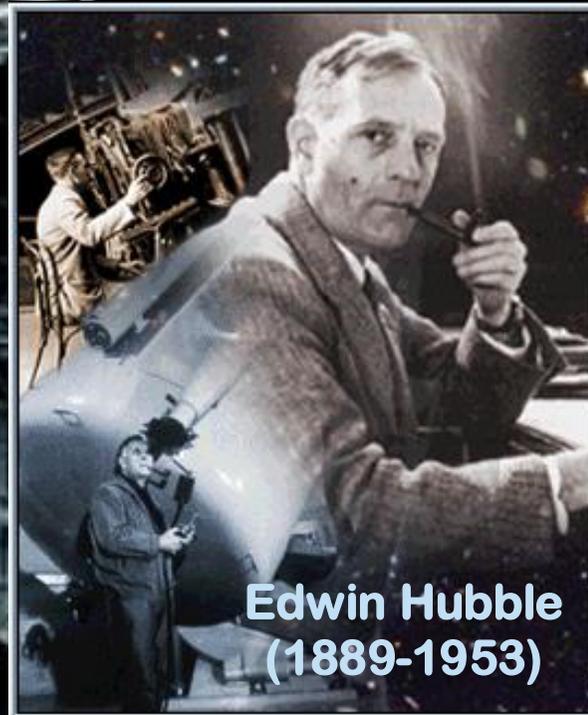
Seither dehnt es sich aus und kühlt sich ab.



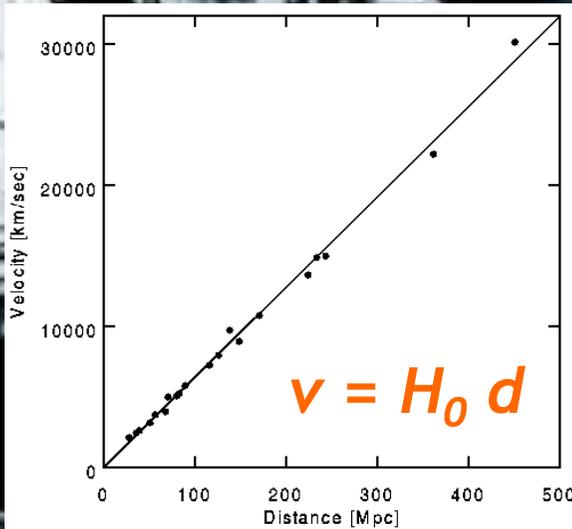
Woher wissen wir das?

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:

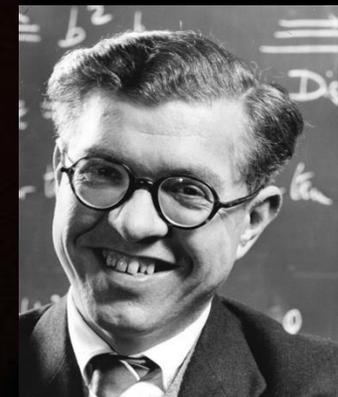
Das Universum begann in einem Punkt

Big Bang

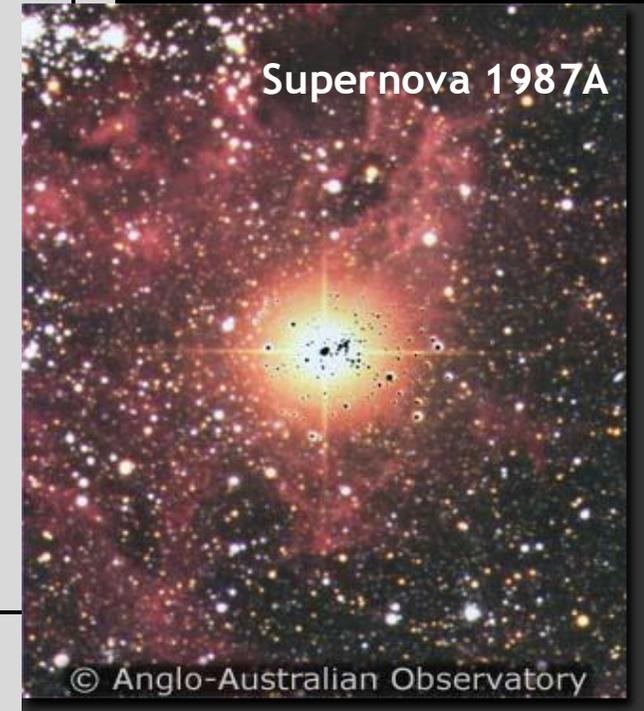
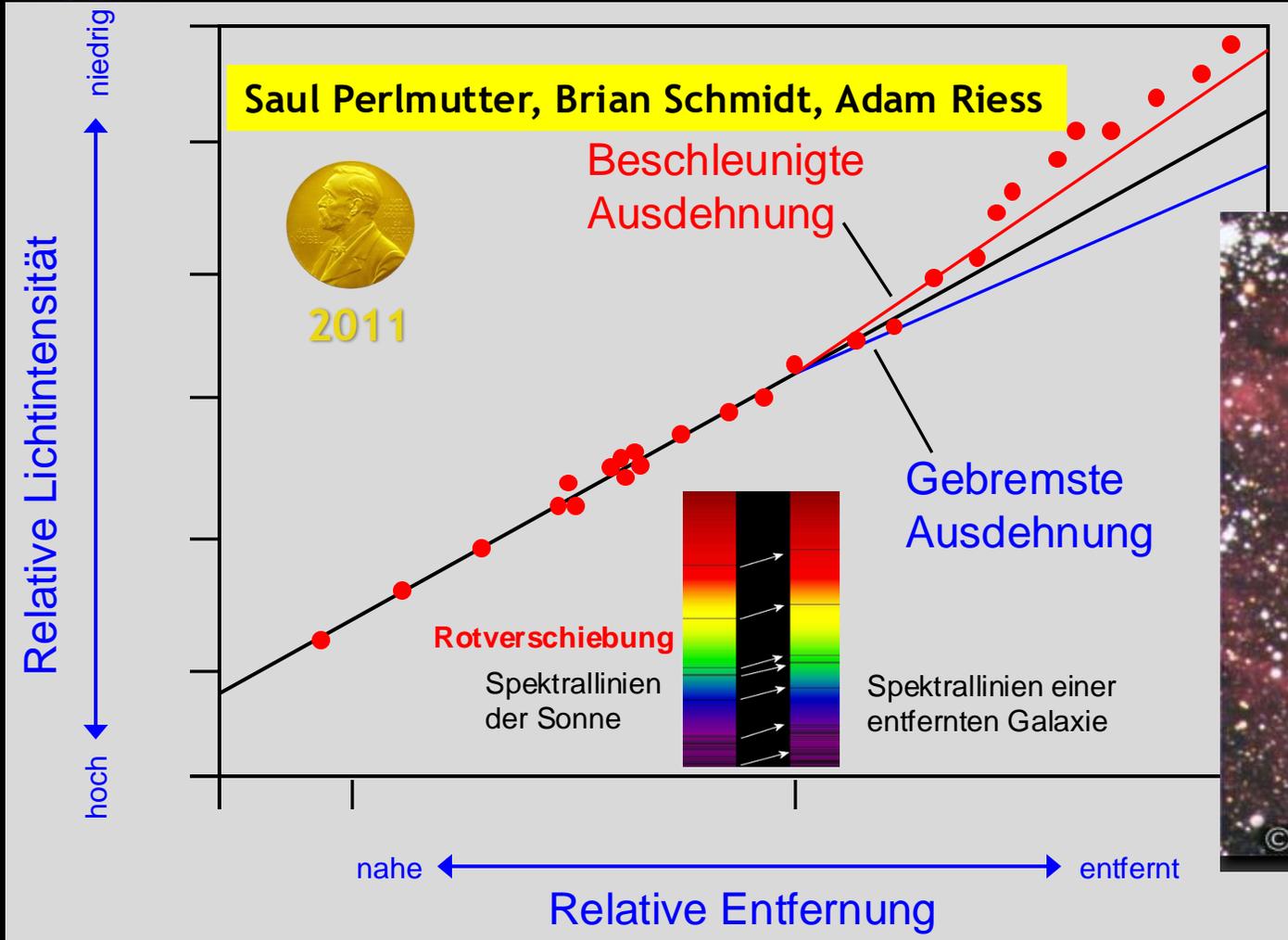


Albert Einstein,
Georges Lemaître

Fred Hoyle

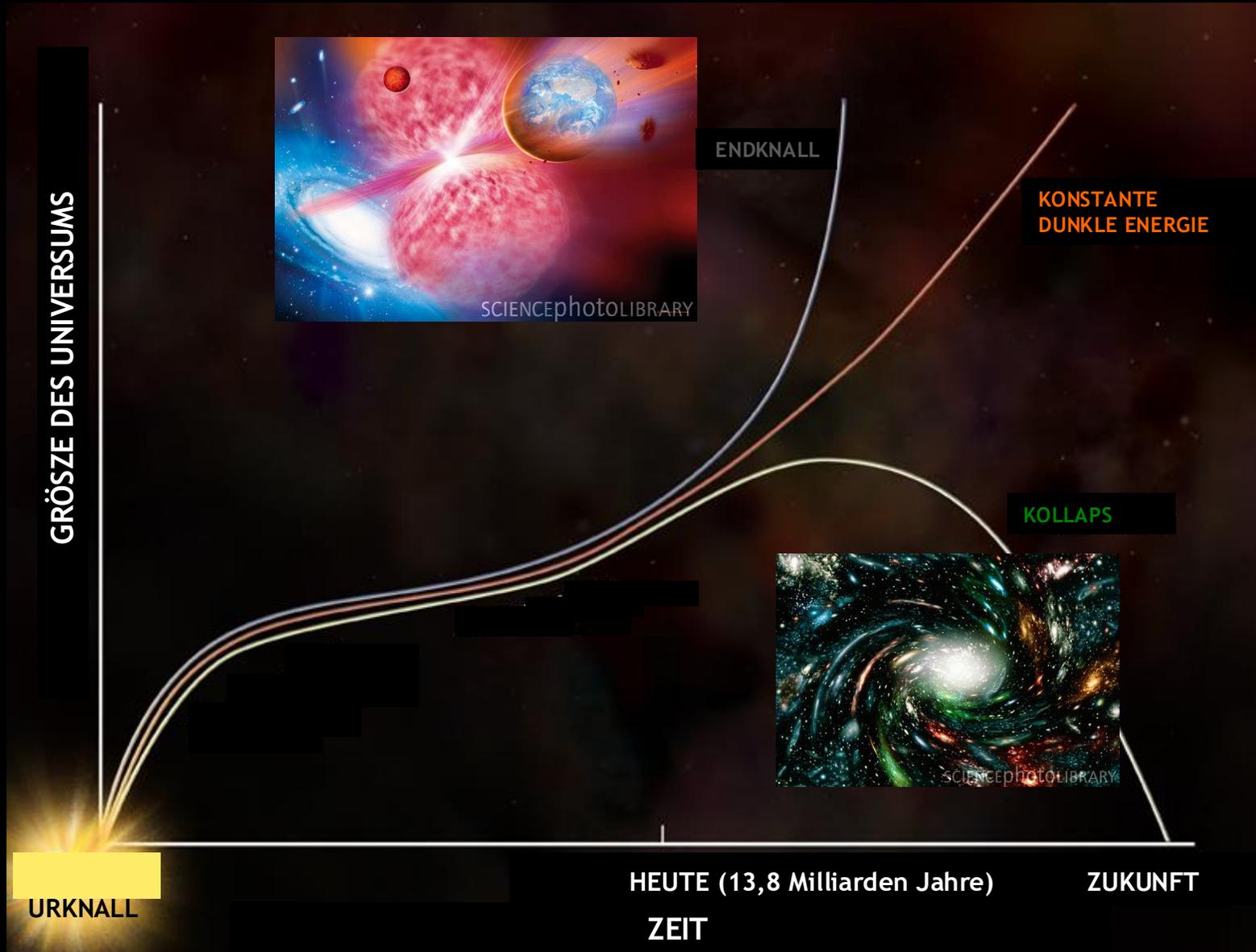


Entdeckung der dunklen Energie 1998

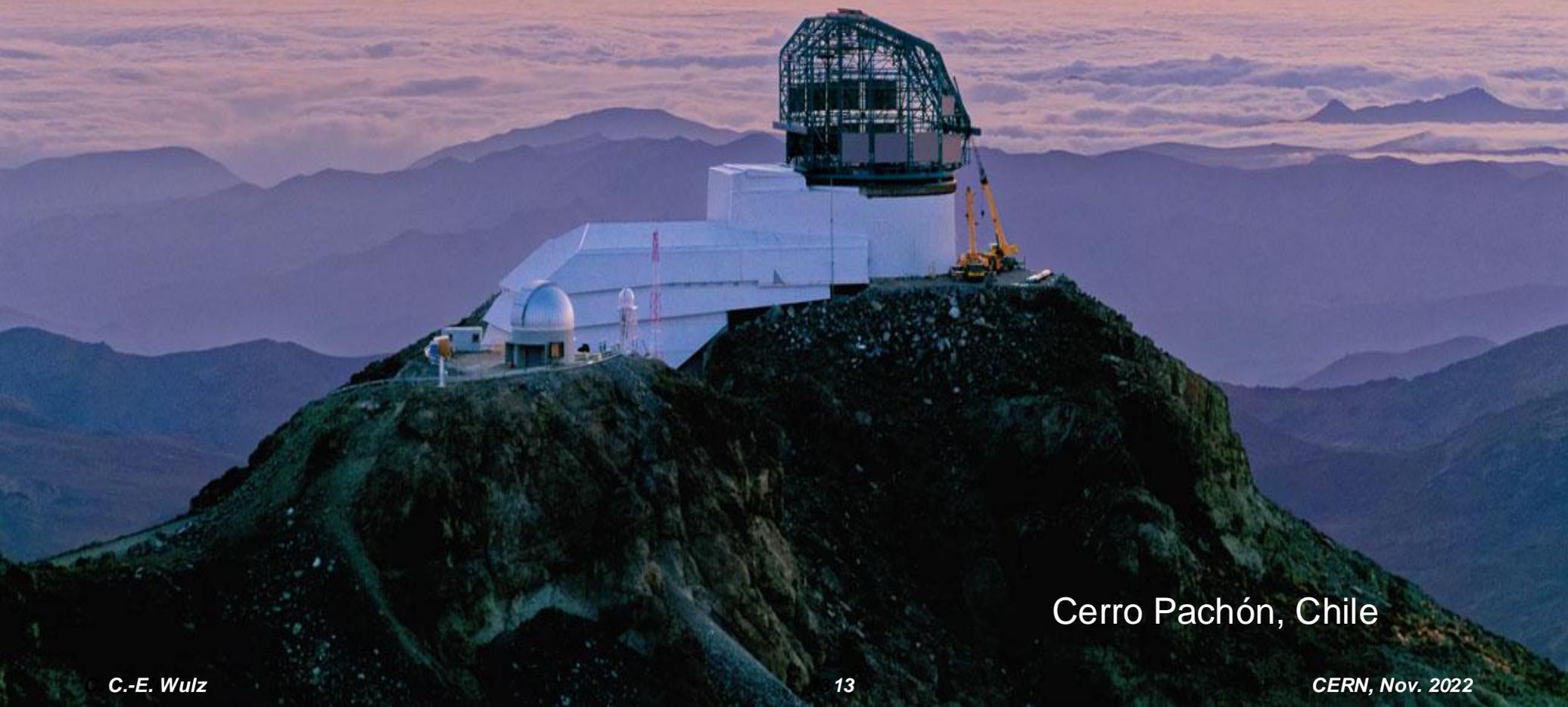


Beobachtungen von Supernovae ergaben, dass eine mysteriöse Kraft - dunkle Energie - das Universum immer schneller auseinander treibt!

Entwicklung des Universums



Vera Rubin Observatorium



Cerro Pachón, Chile

Was sind die Bestandteile des Universums?

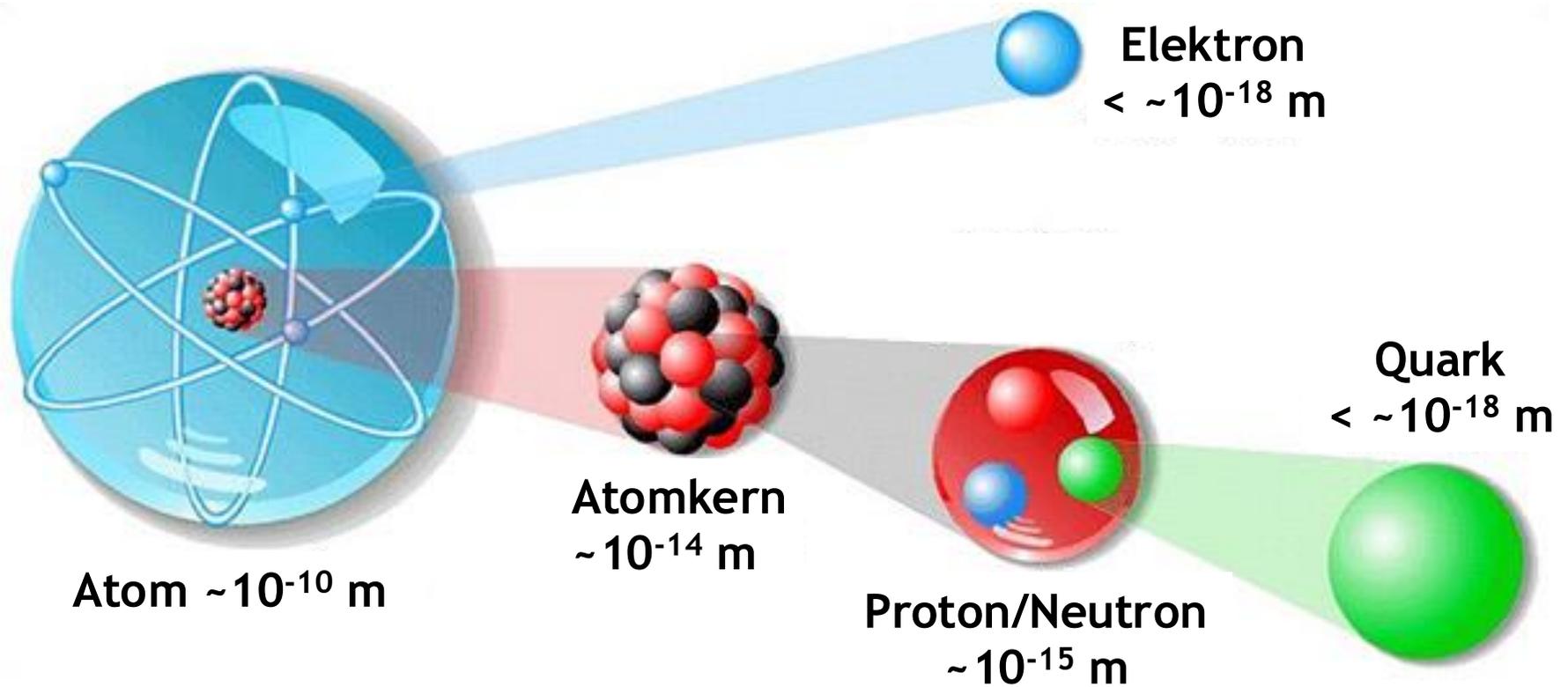
Normale Materie (Atome, “baryonische Materie”): Quarks, Leptonen
Dunkle Materie
Dunkle Energie

Welche Kräfte herrschen im Universum?

Schwerkraft
Elektromagnetische Kraft
Starke Kraft (Kernkraft)
Schwache Kraft

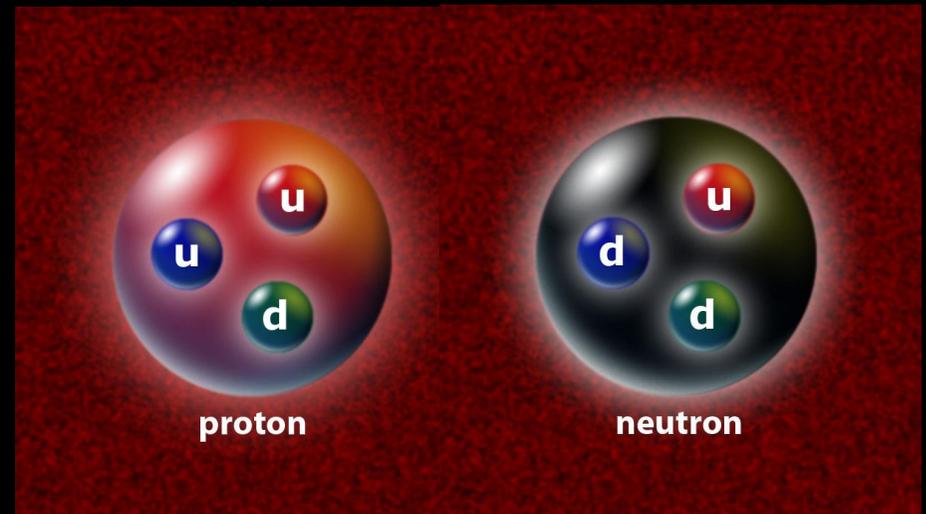
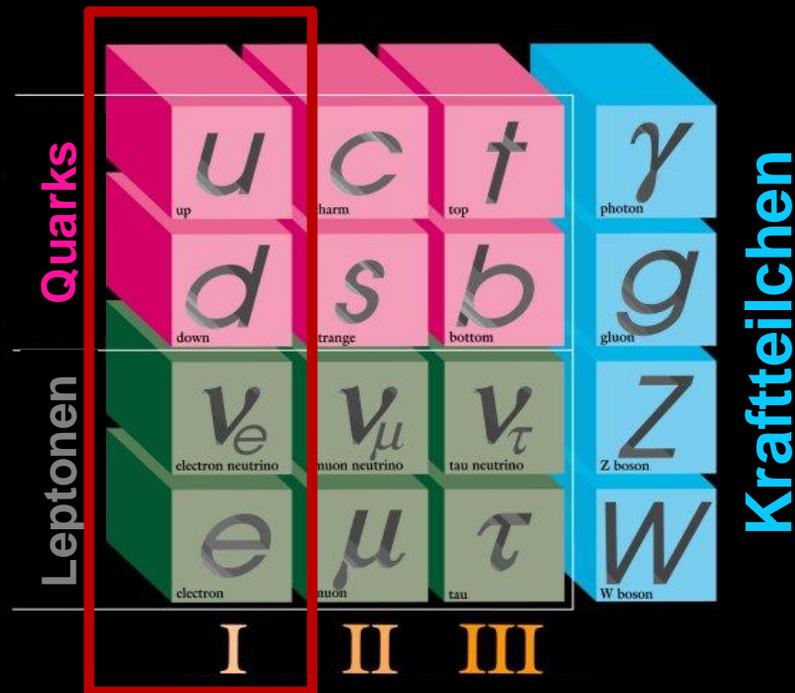
Kräfte werden durch Austausch von Teilchen (Bosonen) vermittelt.

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™

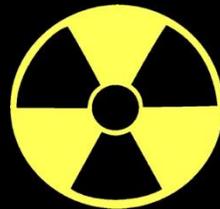


Der LHC ist eine Zeitmaschine,
genau so wie Teleskope oder
Raumsonden!

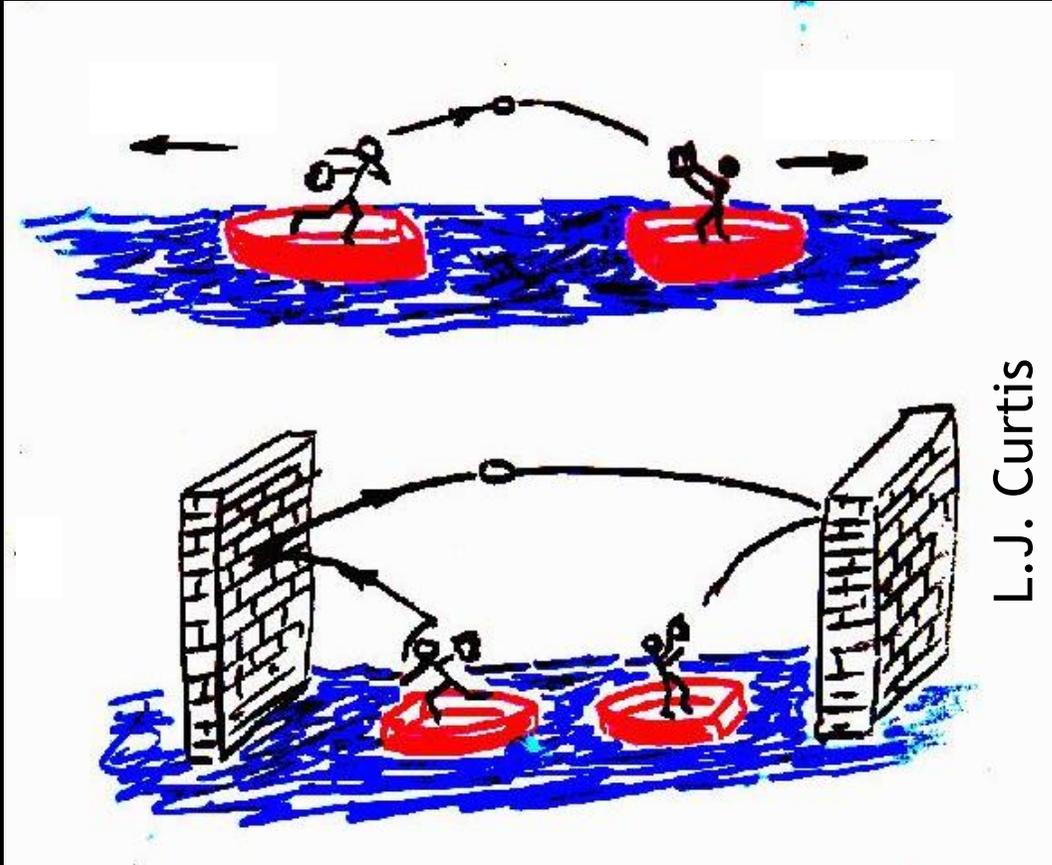
LICENSED BY
Nintendo
THE SOFTWARE TOOLWORKS

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.



Schwache Wechselwirkung

Sehr schwach

Sehr kurze Reichweite

Einzige Kraft, die Quarkflavors ändern kann (z.B. $d \rightarrow u$)

Vereint mit der elektromagnetischen Kraft

CP-Verletzung (Ladungskonjugation und Parität nicht erhalten)

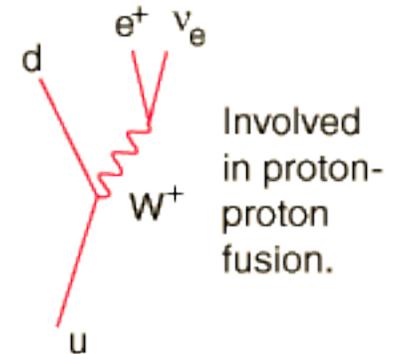
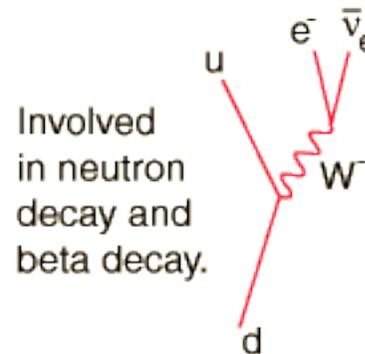
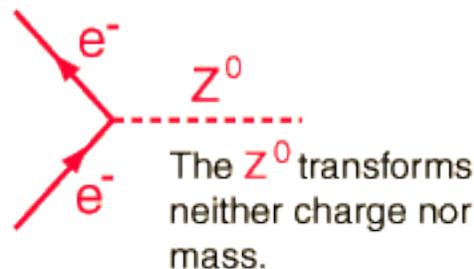
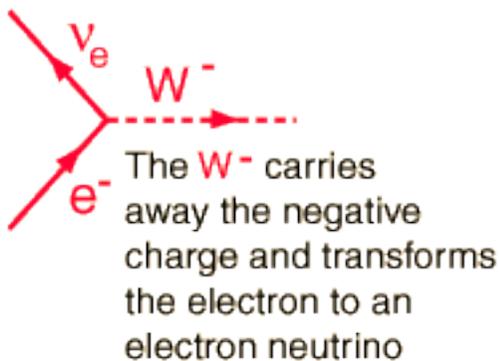
Beispiele

Neutrinowechselwirkungen

Betazerfall

Kernfusion

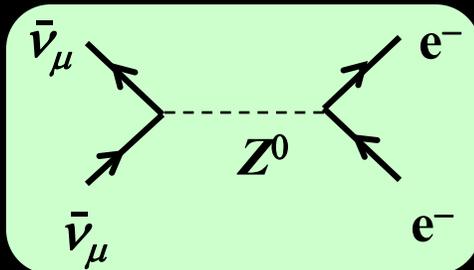
Weak interaction transformations of u and d quarks



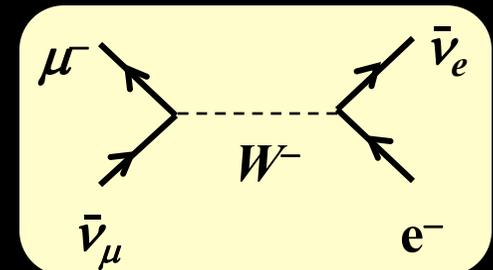
Elektroschwache Theorie – Entdeckung der neutralen Ströme am CERN 1973

- Signifikanter Schritt zur Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Kräfte, vor der Entdeckung der W- und Z-Teilchen, der Vermittlerteilchen der schwachen Kraft, auch am CERN, im Jahr 1983
- Eine Theorie, die diese Kräfte vereint, wurde von Sheldon Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg entwickelt (Nobelpreis 1979)

Reaktion mit neutralem Strom:



Zum Vergleich: Ein geladener Strom würde zu einem Myon im Endzustand führen



Blasenkammer Gargamelle

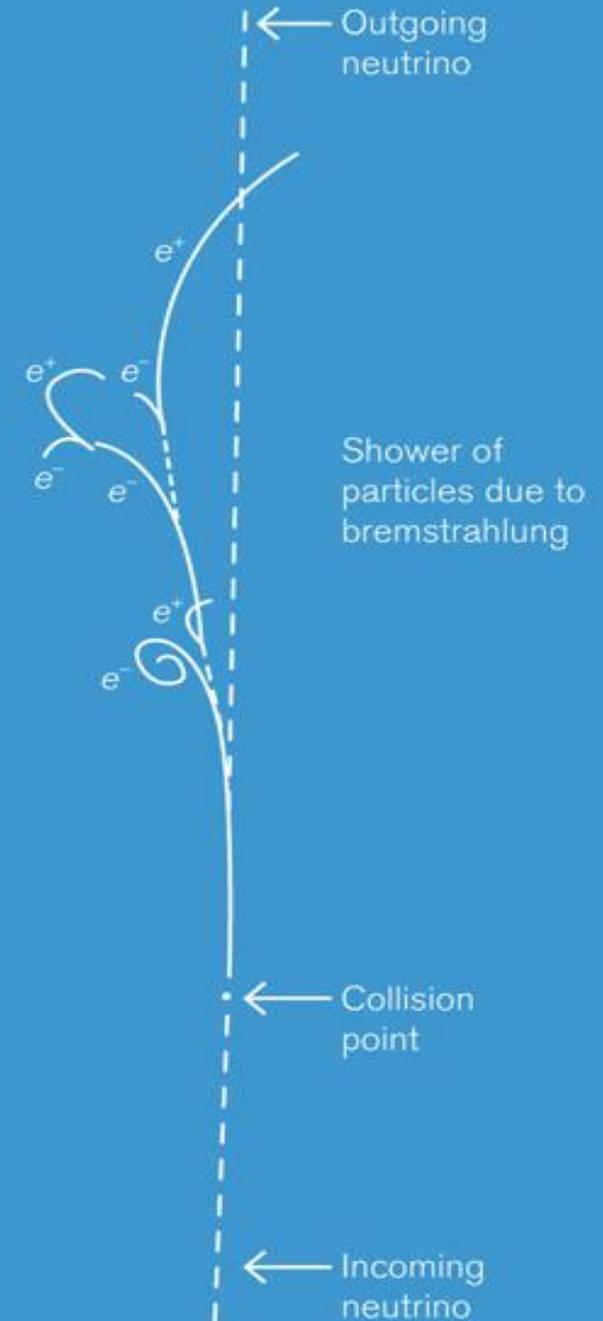
- Mit flüssigem Freongas gefüllt
- Geladene Teilchen hinterlassen eine Ionisationsspur, entlang derer die Flüssigkeit verdampft, so dass Blasen entstehen, die man photographieren kann
- Magnetfeld krümmt Spuren geladener Teilchen

Ereignis mit neutralem Strom

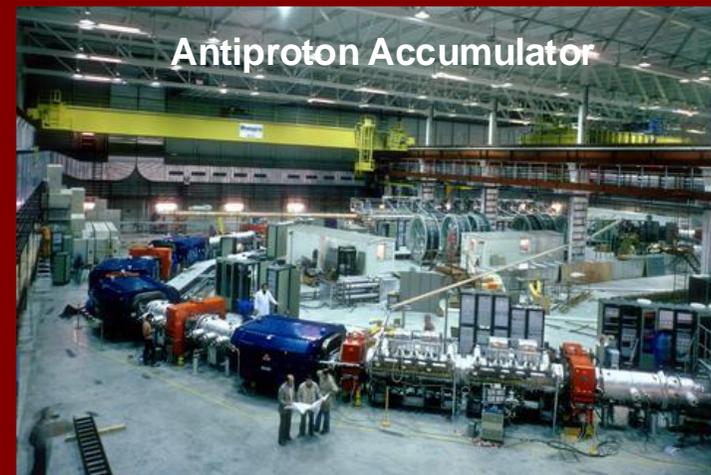
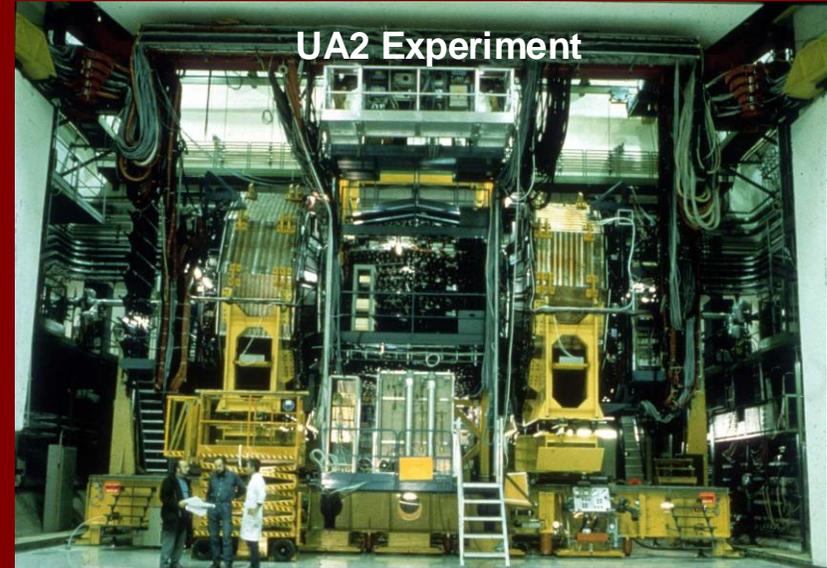
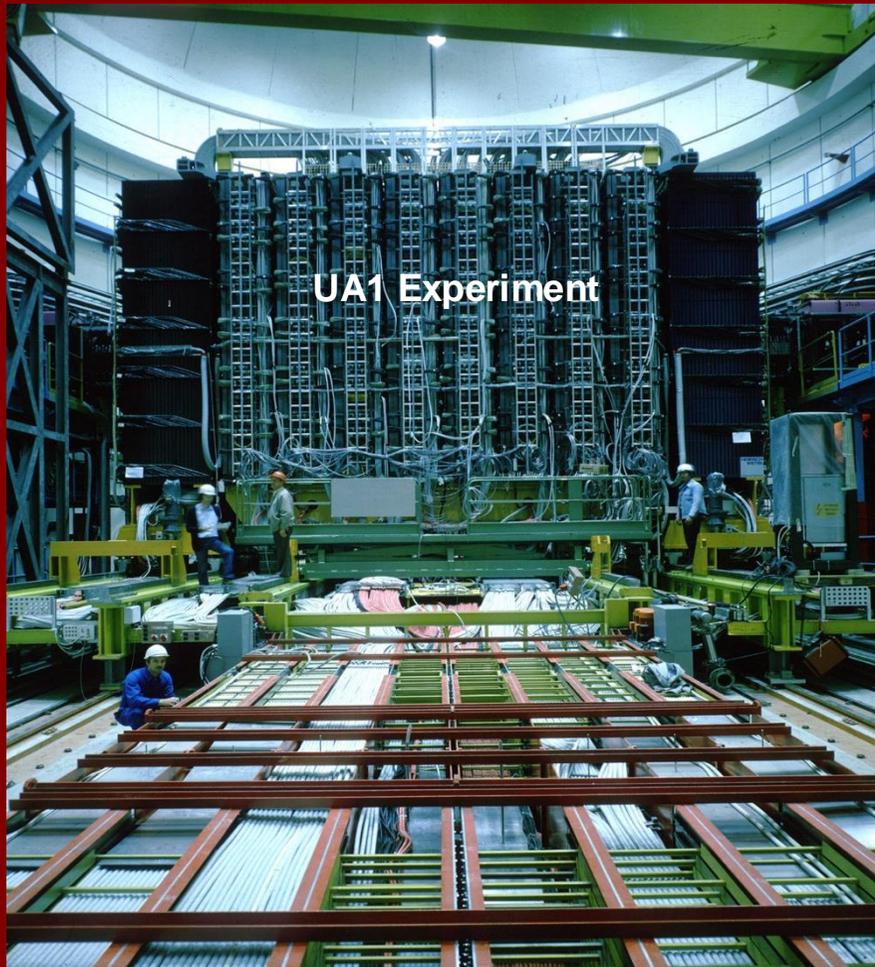


$\bar{\nu}_{\mu}$

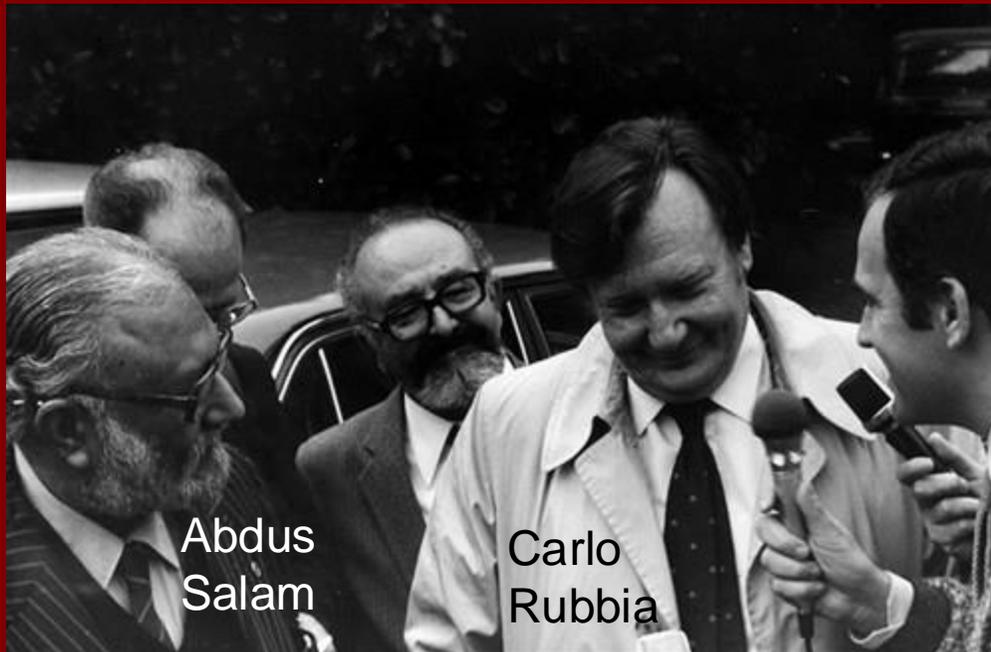
F. J. Hasert et al. (1973)



Entdeckung der W - und Z -Teilchen am Super-Proton-Antiproton Collider



Entdeckung der W- und Z-Teilchen am Super-Proton-Antiproton Collider



Abdus Salam

Carlo Rubbia



Simon van der Meer

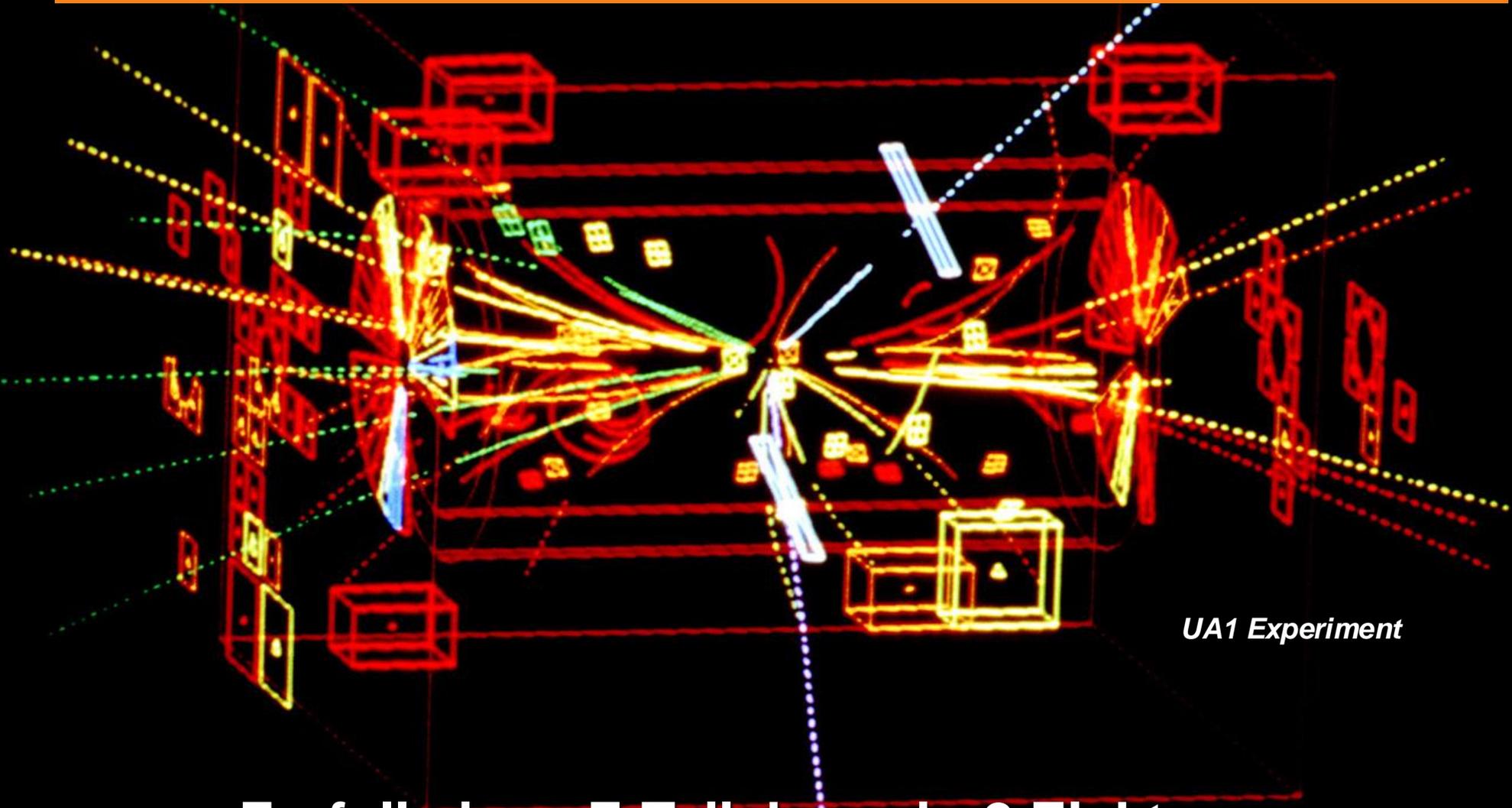


Nobelpreis für Physik 1984
Rubbia, van der Meer

“For their decisive contributions to the discovery of the W and Z particles”



Entdeckung der W- und Z-Teilchen am CERN



UA1 Experiment

Zerfall eines Z-Teilchens in 2 Elektronen

Willis Lamb in seiner Nobelpreisrede 1955:

Als 1901 zum ersten Mal die Nobelpreise verliehen wurden, wußten die Physiker nur von zwei Objekten, die jetzt “Elementarteilchen” genannt werden: dem Elektron und dem Proton. Eine Flut von anderen “elementaren Teilchen” kam nach 1930 zutage - Neutron, Neutrino, μ -Meson, π -Meson, schwerere Mesonen und verschiedene Hyperonen. Ich hörte, wie jemand sagte, daß ein Entdecker eines neuen Elementarteilchens normalerweise mit einem Nobelpreis belohnt wurde, nun aber mit einer Geldstrafe von 10000 \$ belegt werden sollte.

Ähnliches sagte Enrico Fermi im Zusammenhang mit der Hadronspektroskopie, die sich mit dem im folgenden vorgestellten Quarkmodell ergab:

Junger Mann, wenn ich mir die Namen aller dieser Teilchen merken könnte, wäre ich Botaniker geworden.

Das Quarkmodell

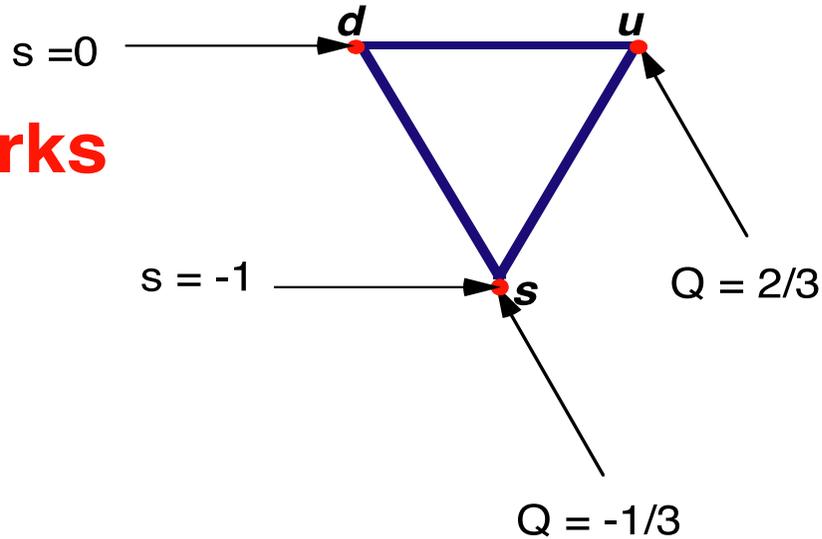
1964: Gell-Mann, Zweig



Elementare Bausteine der Materie:

Quarks in 3 "Flavors"

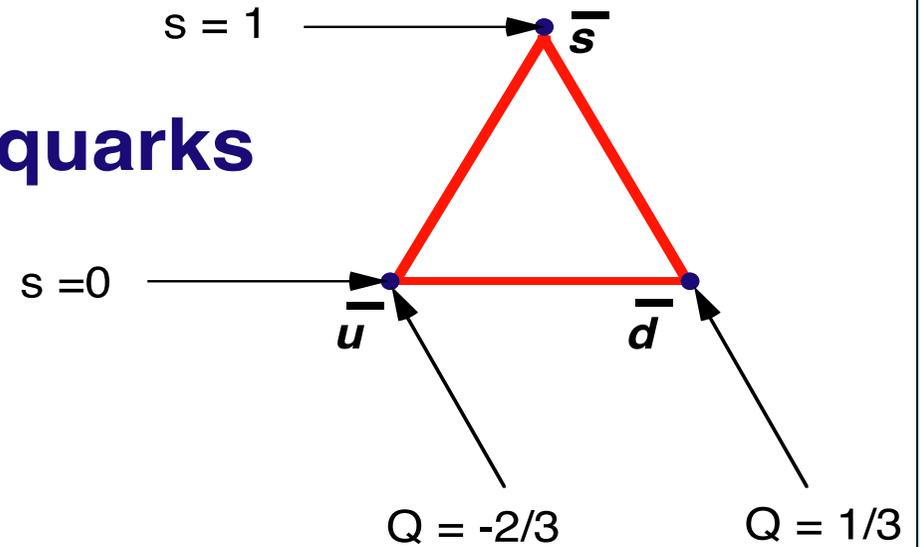
Quarks



Das Quarkmodell

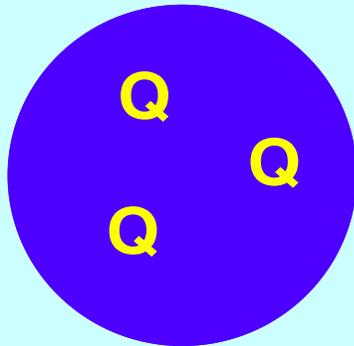
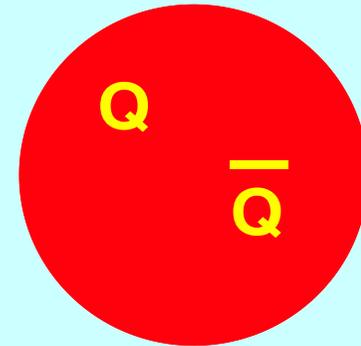
s: Strangeness (s-Quark: $s = -1$)

Antiquarks



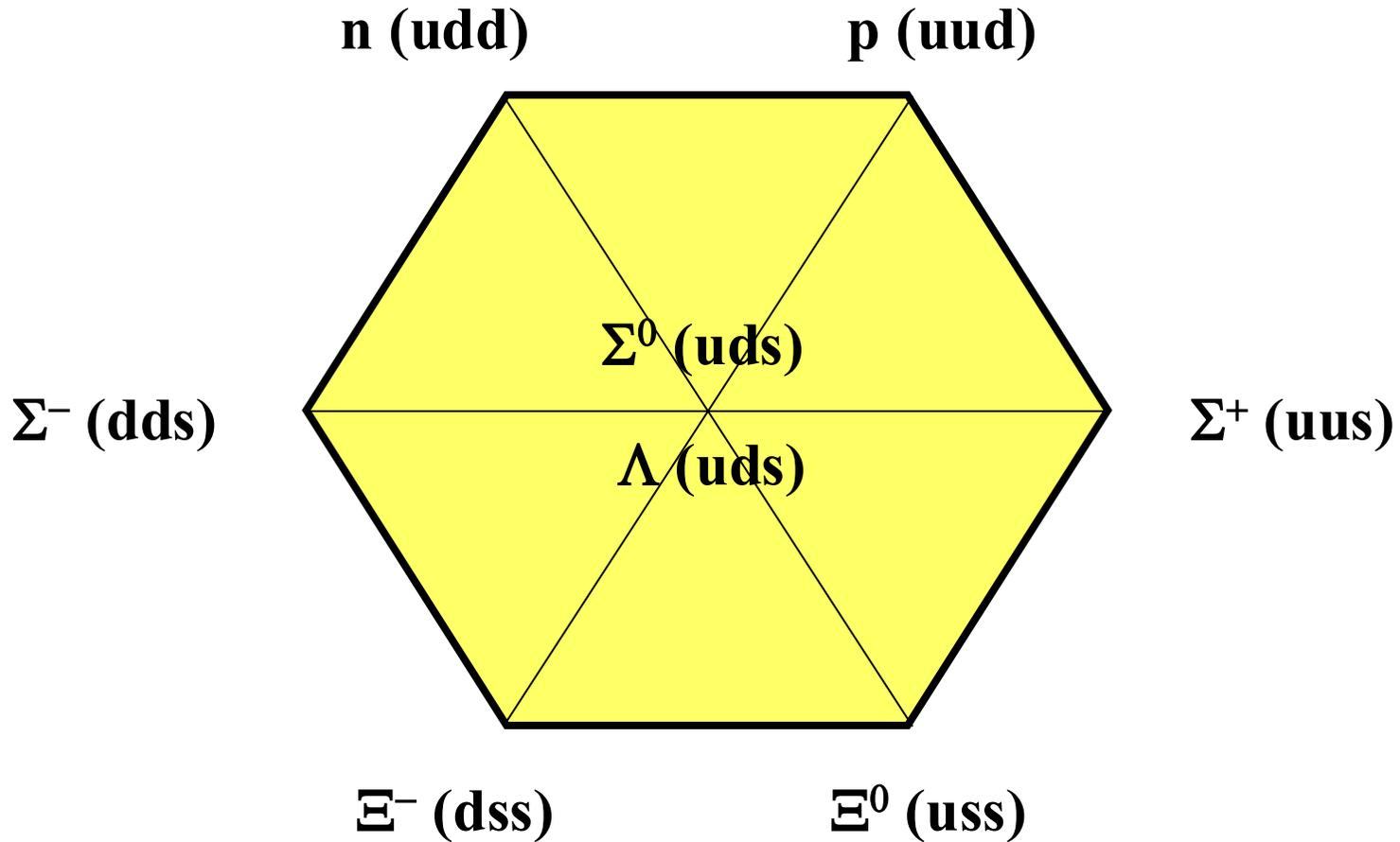
Mesonen, Baryonen

Jedes Meson besteht aus 1 Quark und 1 Antiquark.



Jedes Baryon besteht aus 3 Quarks.

Der achtfache Weg



Baryonenoktett

Der achtfache Weg

Λ^- (ddd)

Λ^0 (udd)

Λ^+ (uud)

Λ^{++} (uuu)

Σ^{*-} (dds)

Σ^{*0} (uds)

Σ^{*+} (uus)

Ξ^{*-} (dss)

Ξ^{*0} (uss)

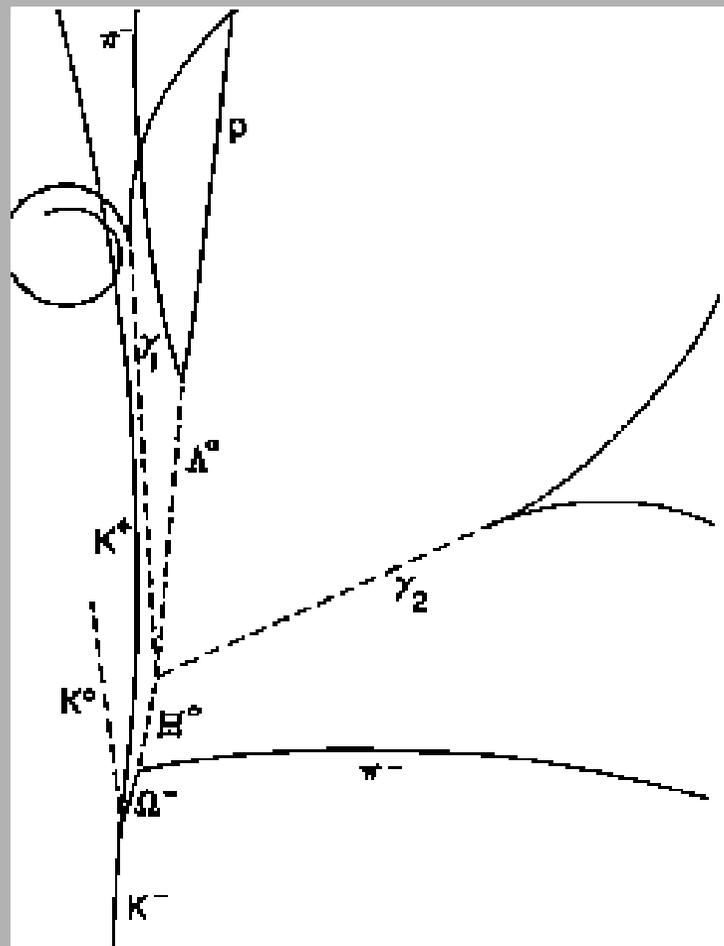
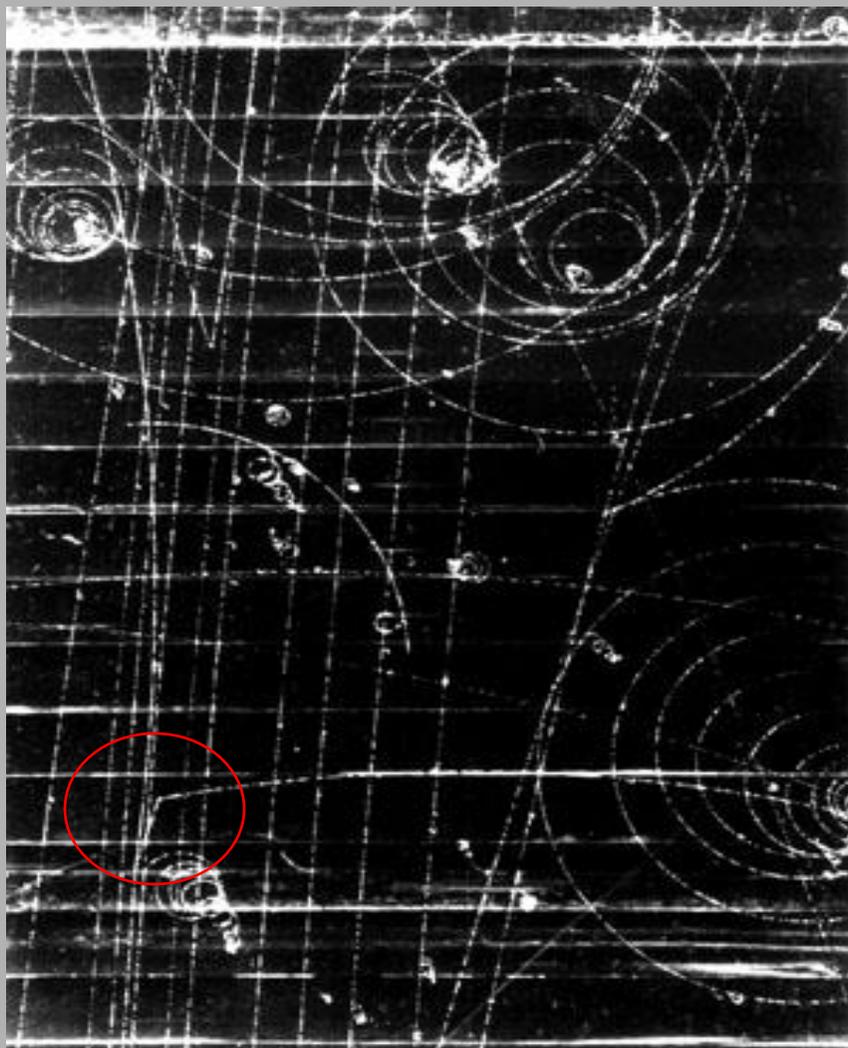
Ω^- (sss)

Λ^+ hat gleichen Quarkgehalt wie Proton, aber höheres Energieniveau, analog H-Atom in verschiedenen Anregungszuständen.

Quarks: Spin 1/2!
Pauli-Prinzip
-> **COLOR**
(O.W. Greenberg)

Baryonendekuplett

Das Omega-Minus



Brookhaven, 1964

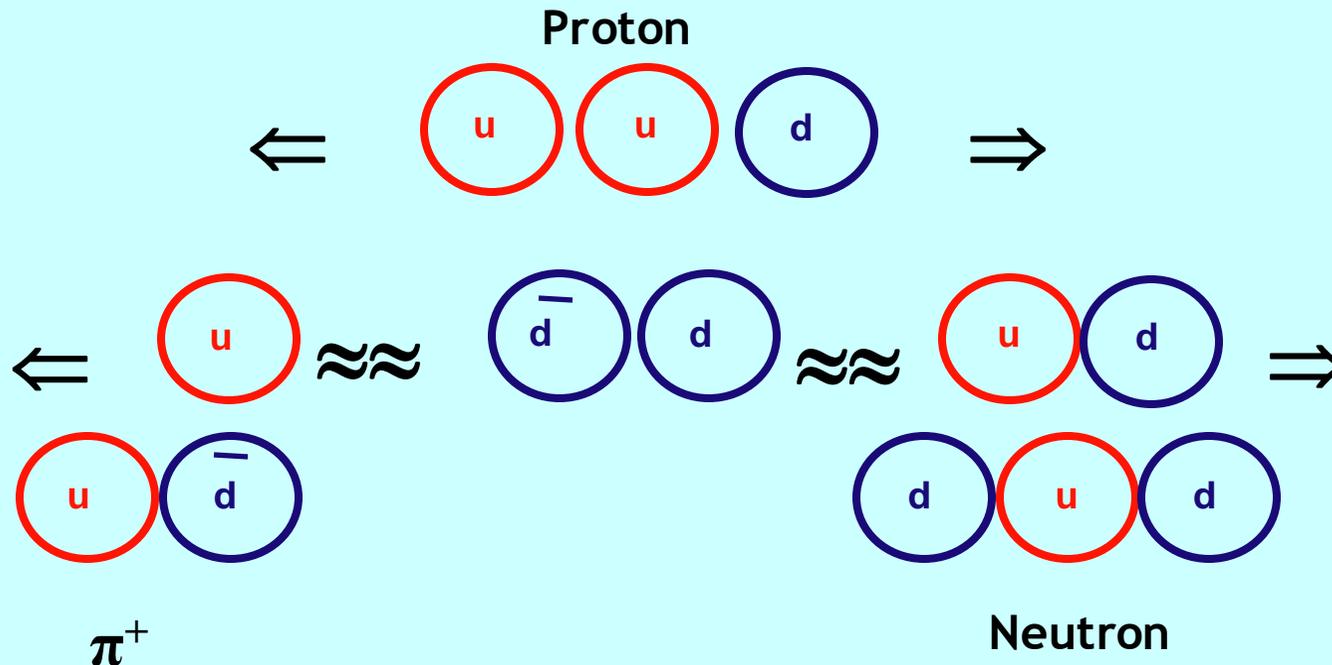


Starke Wechselwirkung

Glukonen und Quarks tragen eine "Farbladung" (COLOR)

→ QUANTENCHROMODYNAMIK (QCD)

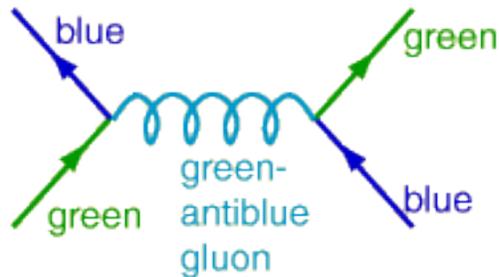
Reelle Teilchen sind jedoch "farbneutral".





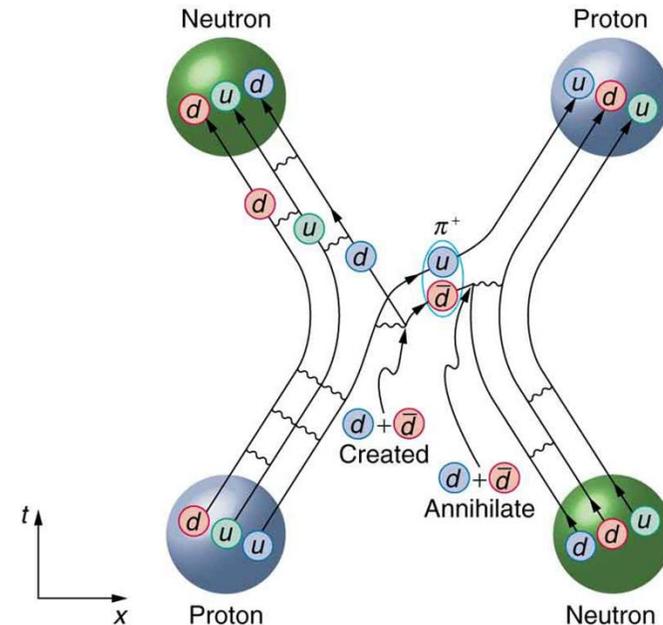
Starke Wechselwirkung

- Sehr stark
- Sehr kurze Reichweite
- Hält Quarks (und Atomkerne) zusammen
- Durch Gluonen vermittelt
- Weder Gluonen noch Quarks sind freie Teilchen (“Confinement”)
- Teilchen mit starker Wechselwirkung nennt man Hadronen

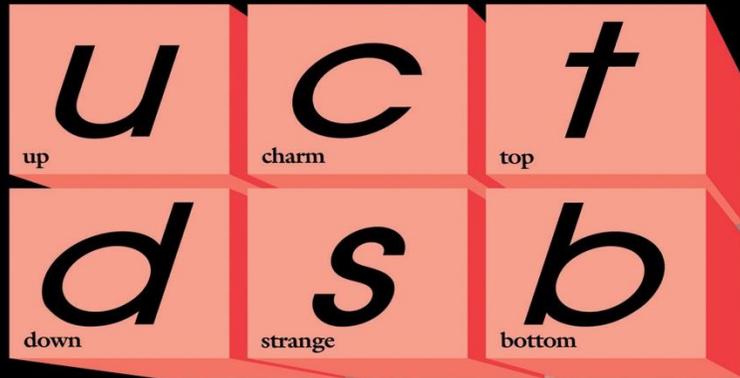


Gluon-mediated interaction between two quarks.

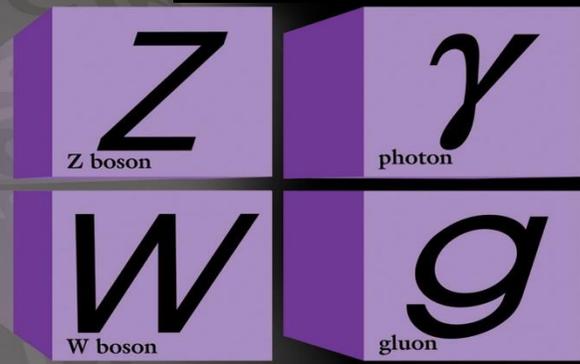
Beispiele
Proton und andere Atomkerne



Quarks



Kraftteilchen



Leptonen

Standardmodell

Das Standardmodell

Glashow, Salam, Weinberg (1978)

3 Familien (Generationen) von Quarks und Leptonen:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix} + \text{Antiteilchen} \longrightarrow 12 \text{ Leptonen}$$

$$\left[\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} + \text{Antiteilchen} \right] \times 3 \text{ Farben} \longrightarrow 36 \text{ Quarks}$$

4 Vermittlerteilchen der elektroschwachen Wechselwirkung:

3 I.V.B. (W^\pm, Z) + 1 Photon (γ)

8 Vermittlerteilchen der starken Wechselwirkung:

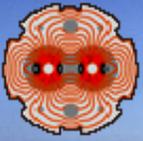
8 Gluonen (g)

Erzeugung von Masse durch Higgs-Mechanismus

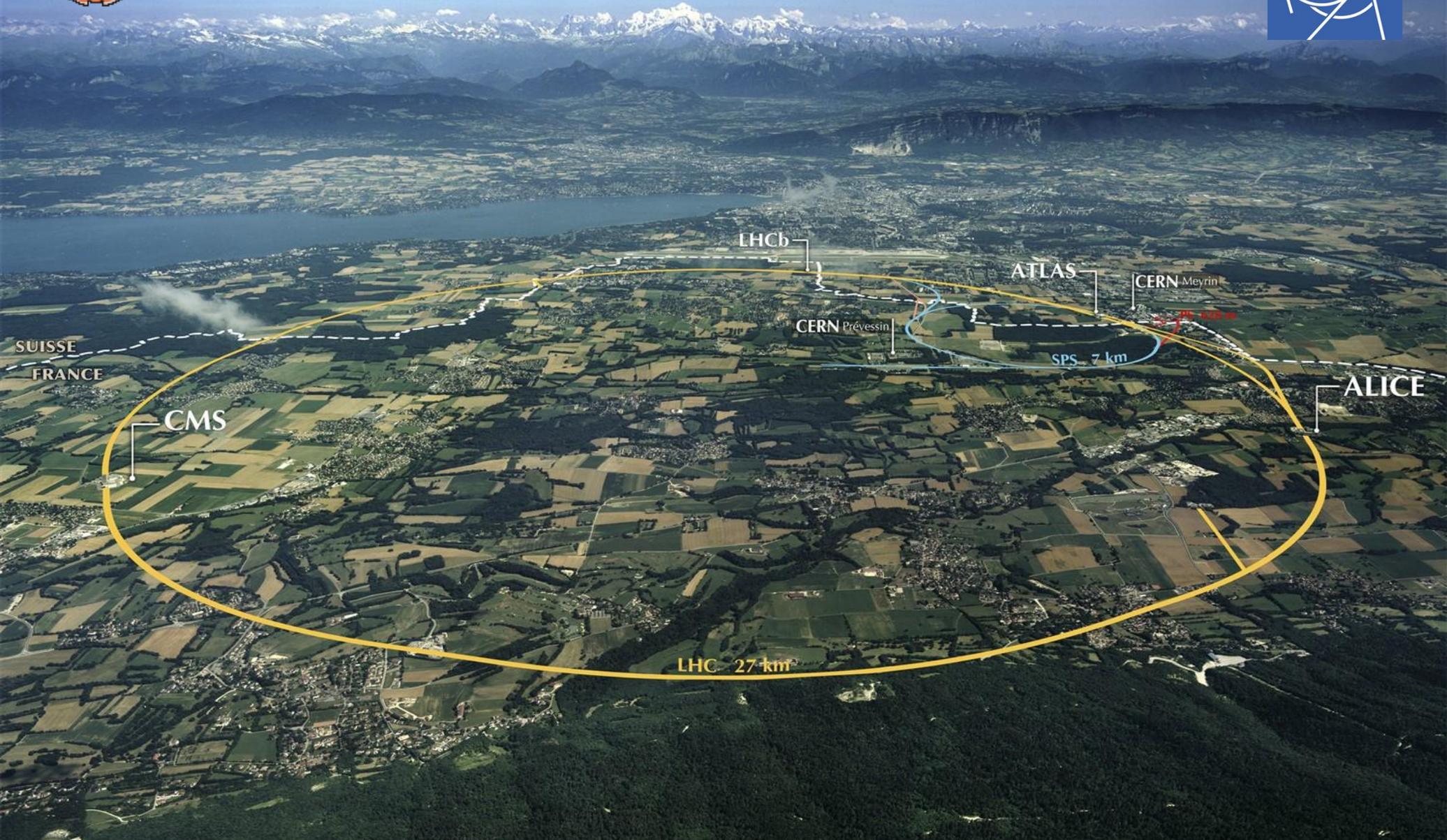
$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger D^\mu \phi - \mathcal{V}(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

- 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

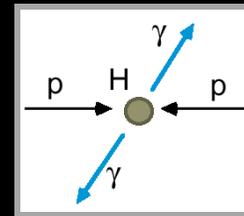


LHC und die Experimente



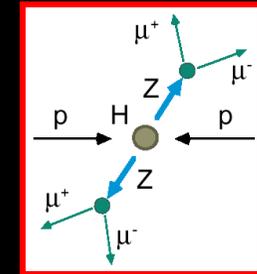
Wie sucht man nach dem Higgs-Teilchen?

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:



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

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



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

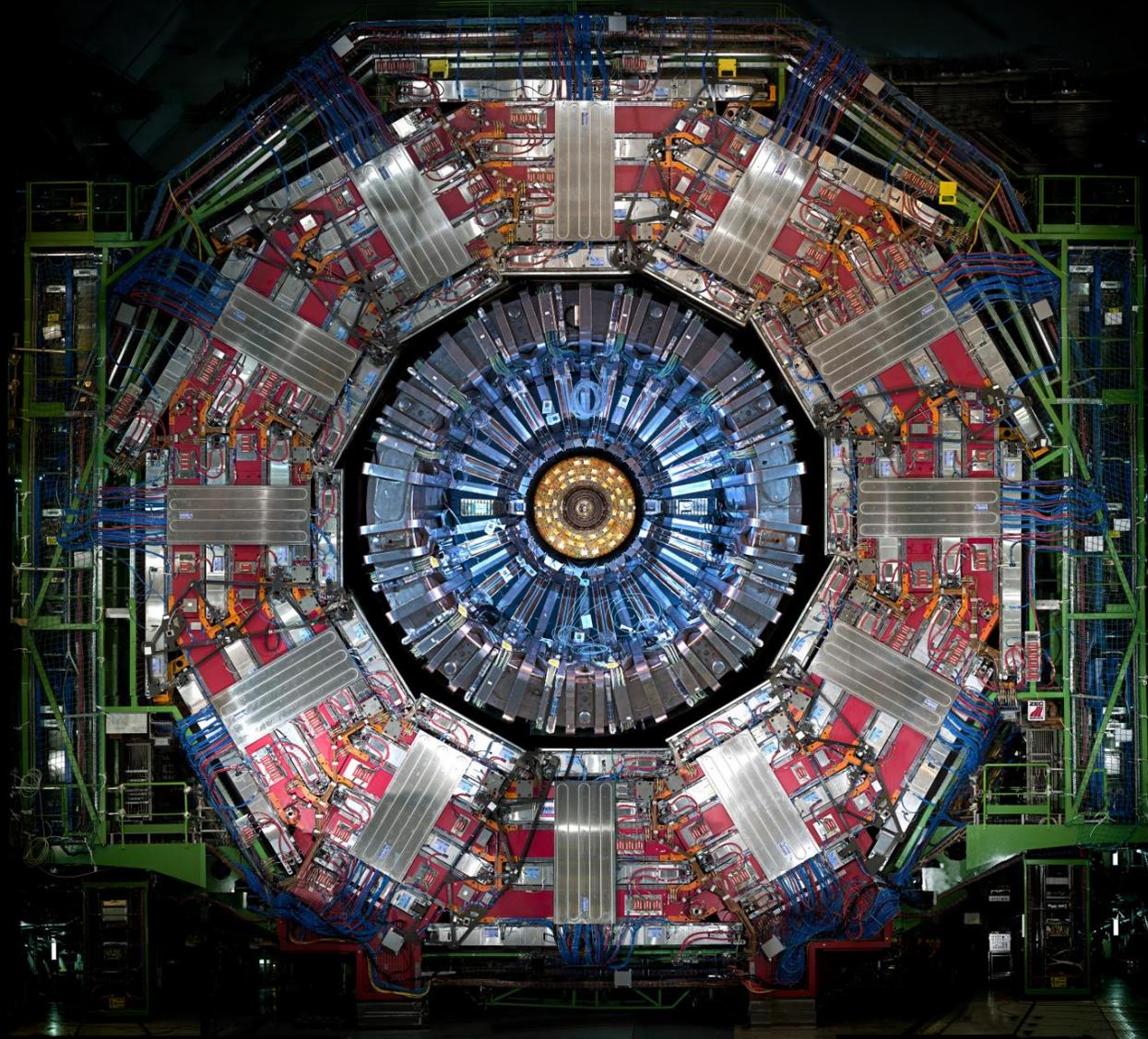
$$H \rightarrow bb, H \rightarrow cc$$

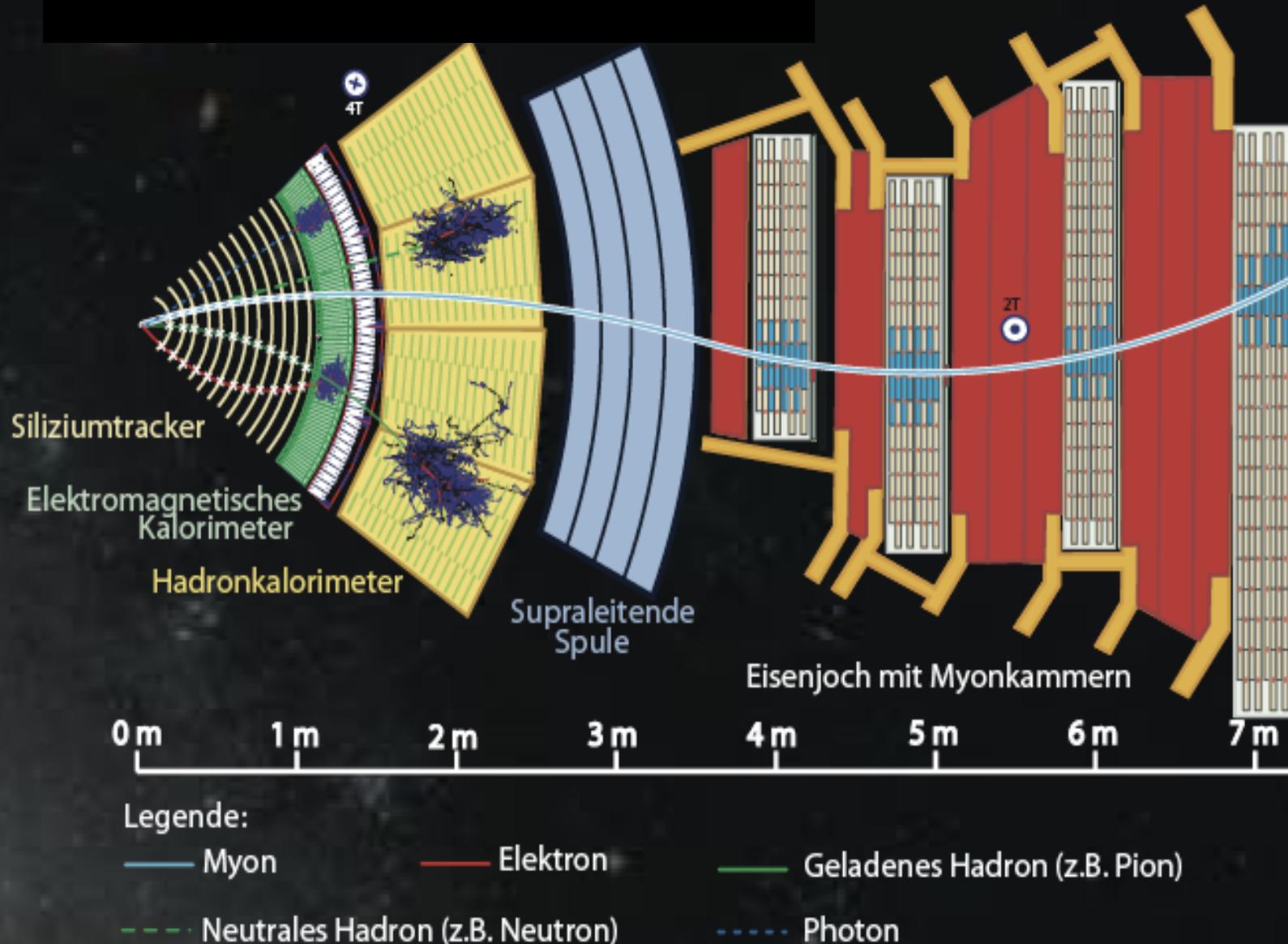
$$H \rightarrow \tau\tau$$

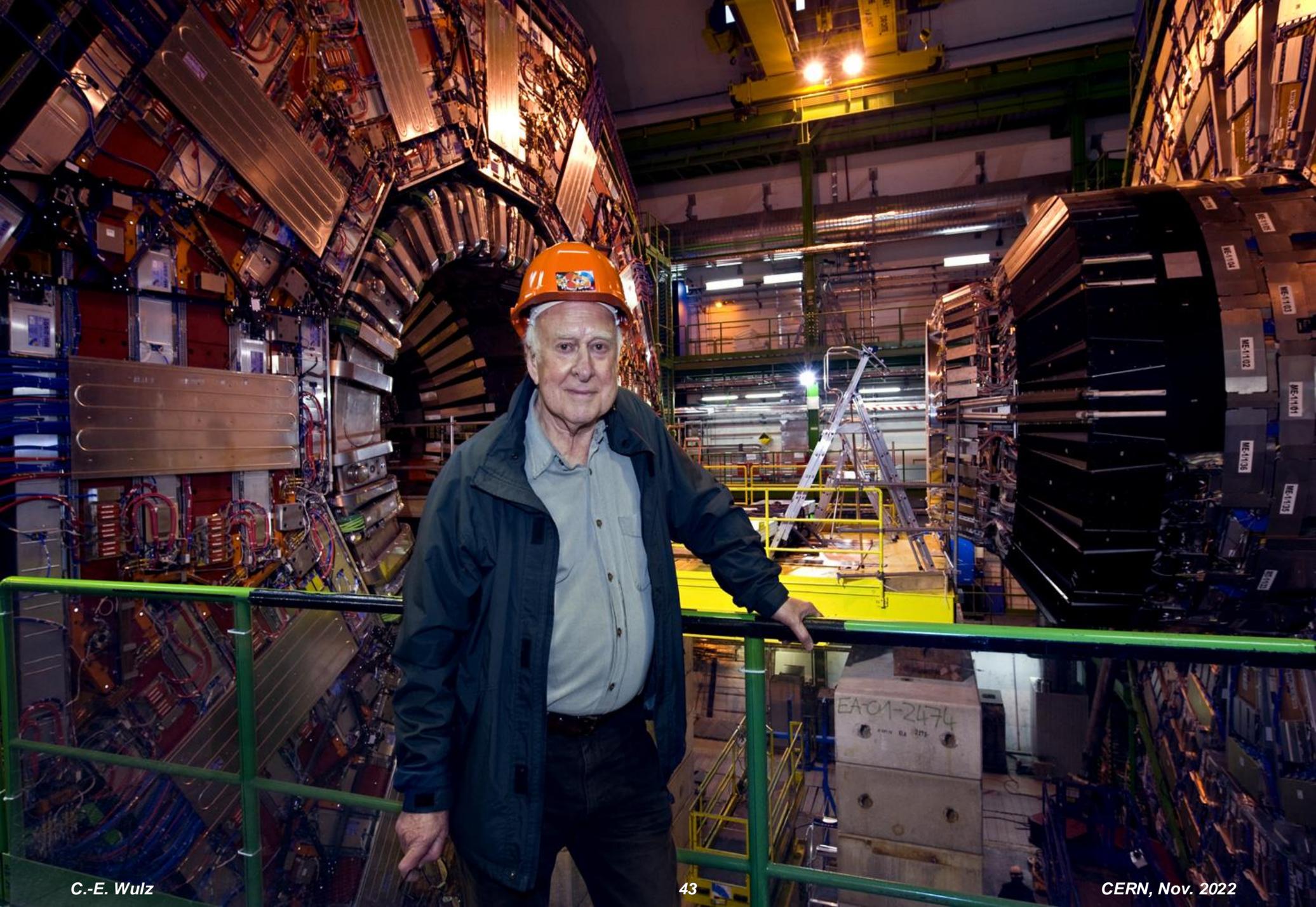
Andere Teilchen können im Detektor wie ein Higgs-Boson aussehen und somit ein “Signal” vortäuschen \rightarrow **Untergrund**.

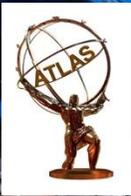


CMS-Experiment

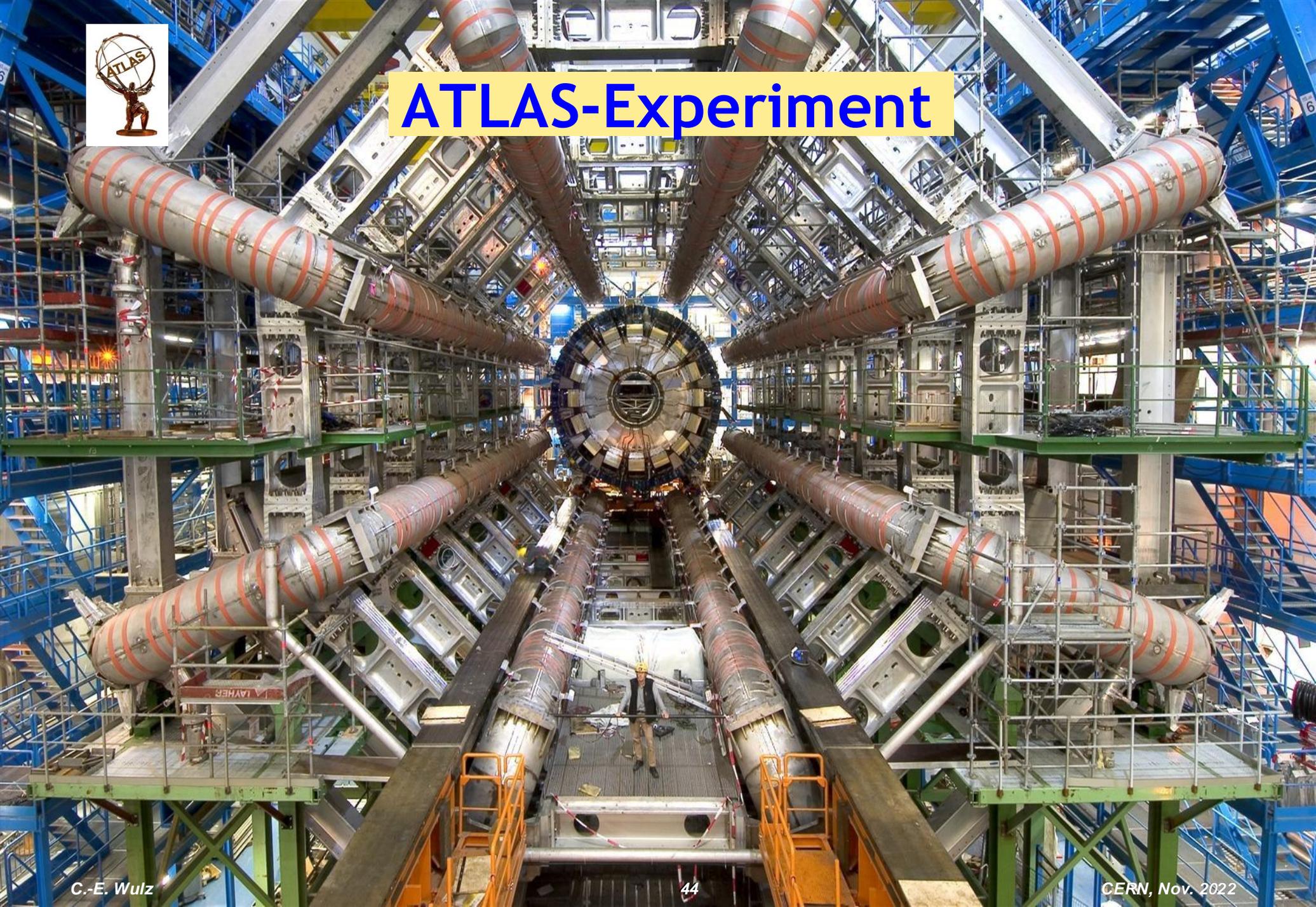






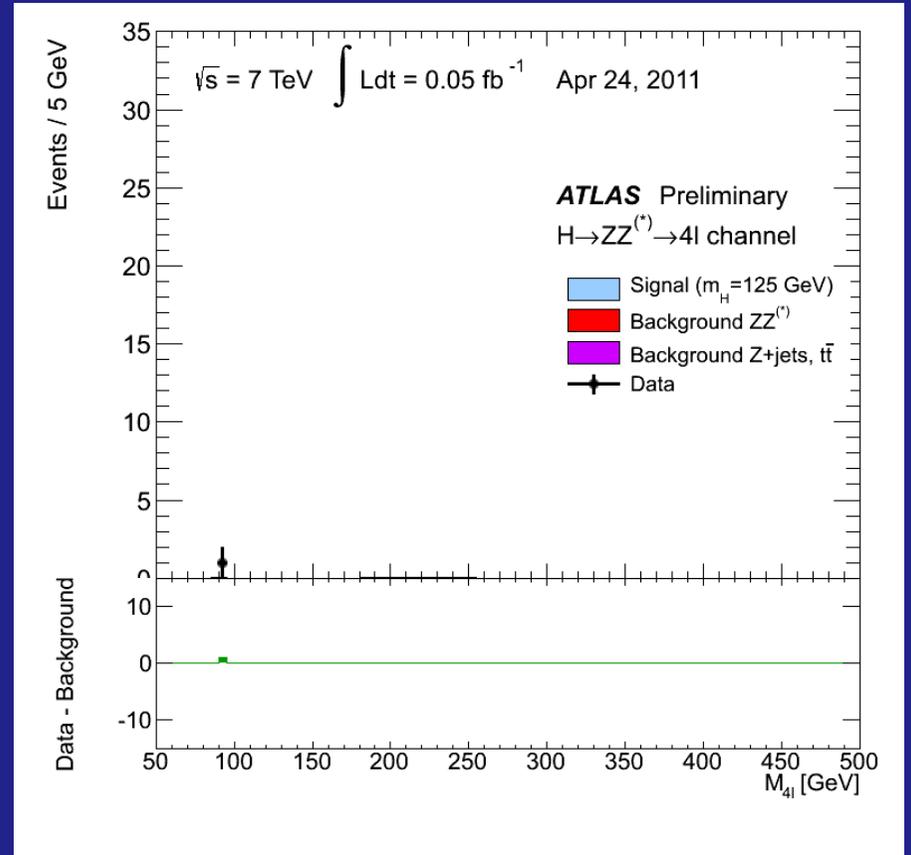
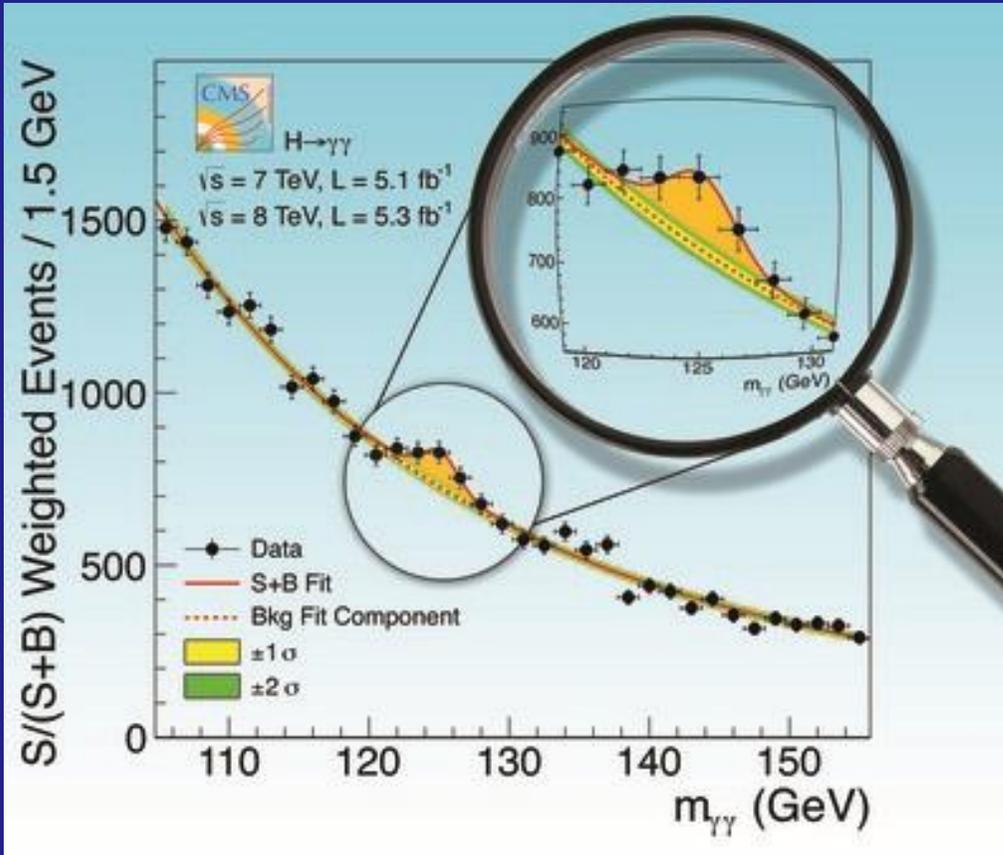


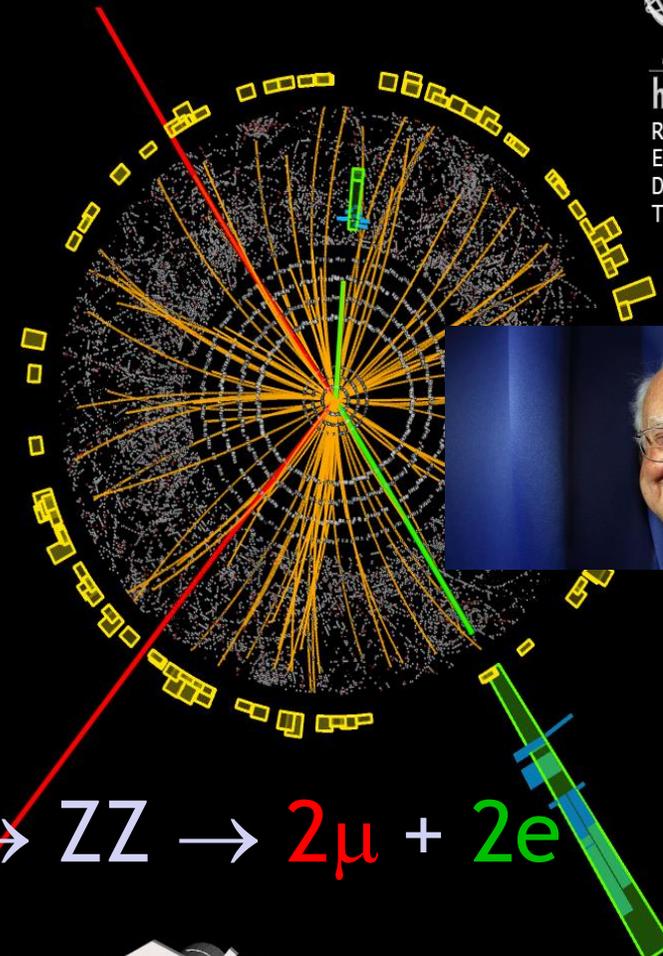
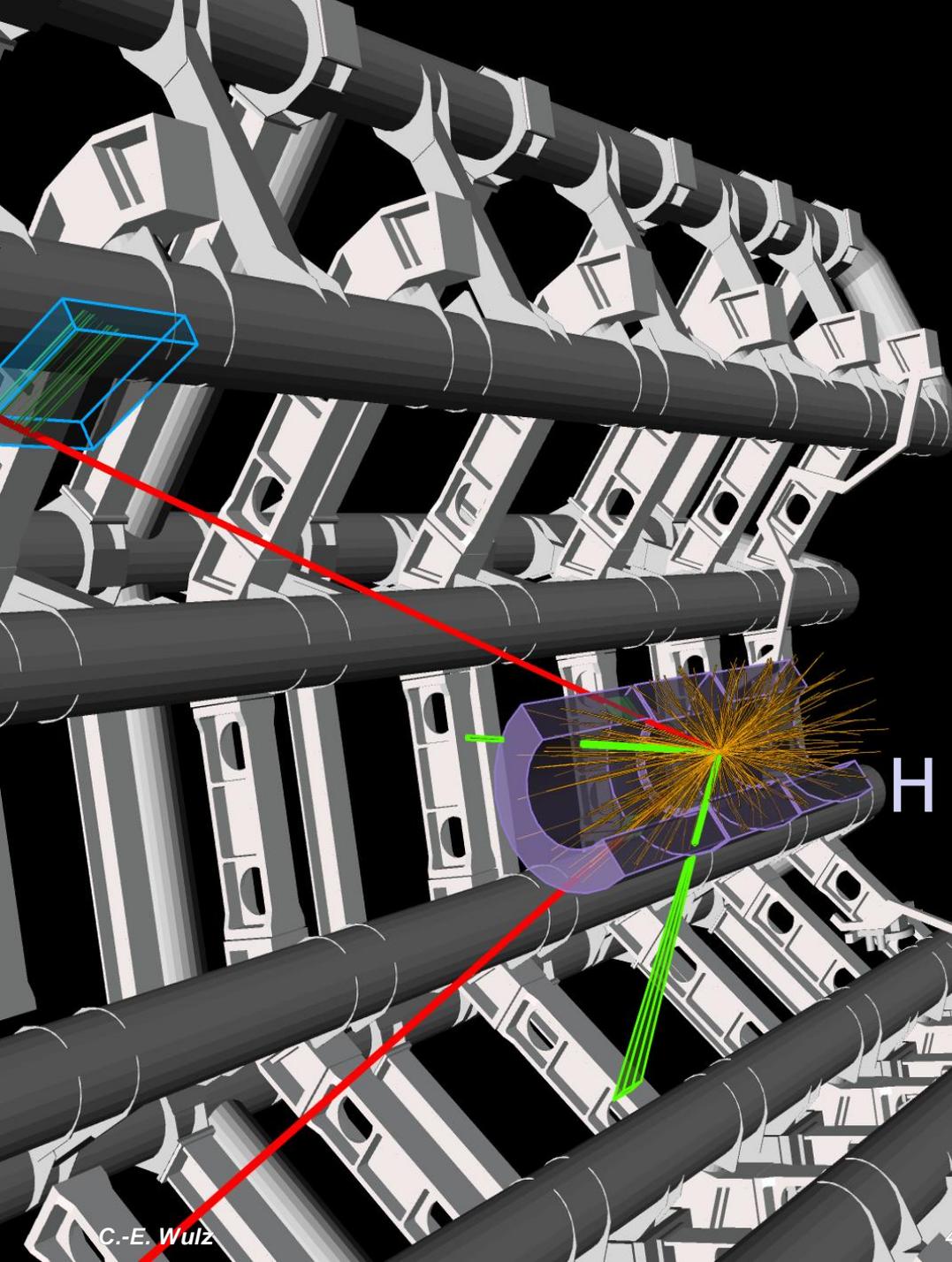
ATLAS-Experiment



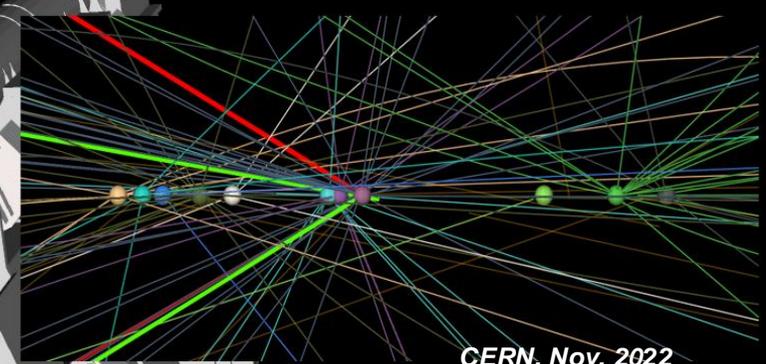
Masse des Higgs-Bosons (≈ 125 GeV)

Das Higgs-Boson ist jetzt zehn Jahre alt!





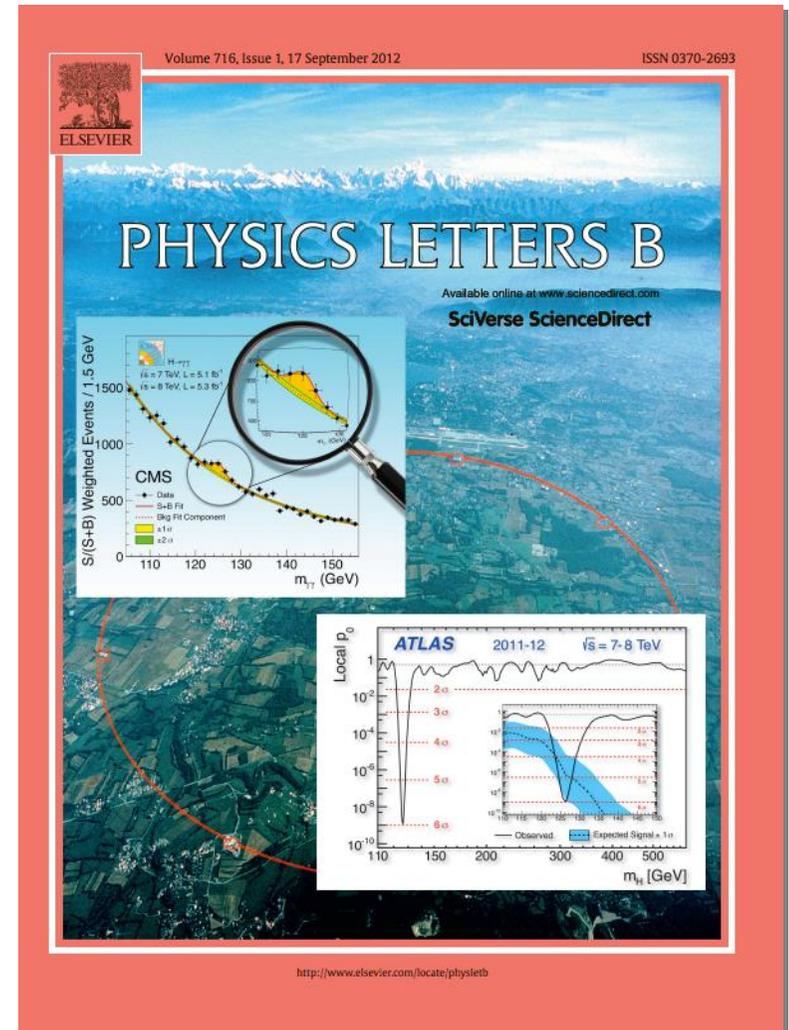
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\mu + 2e$$



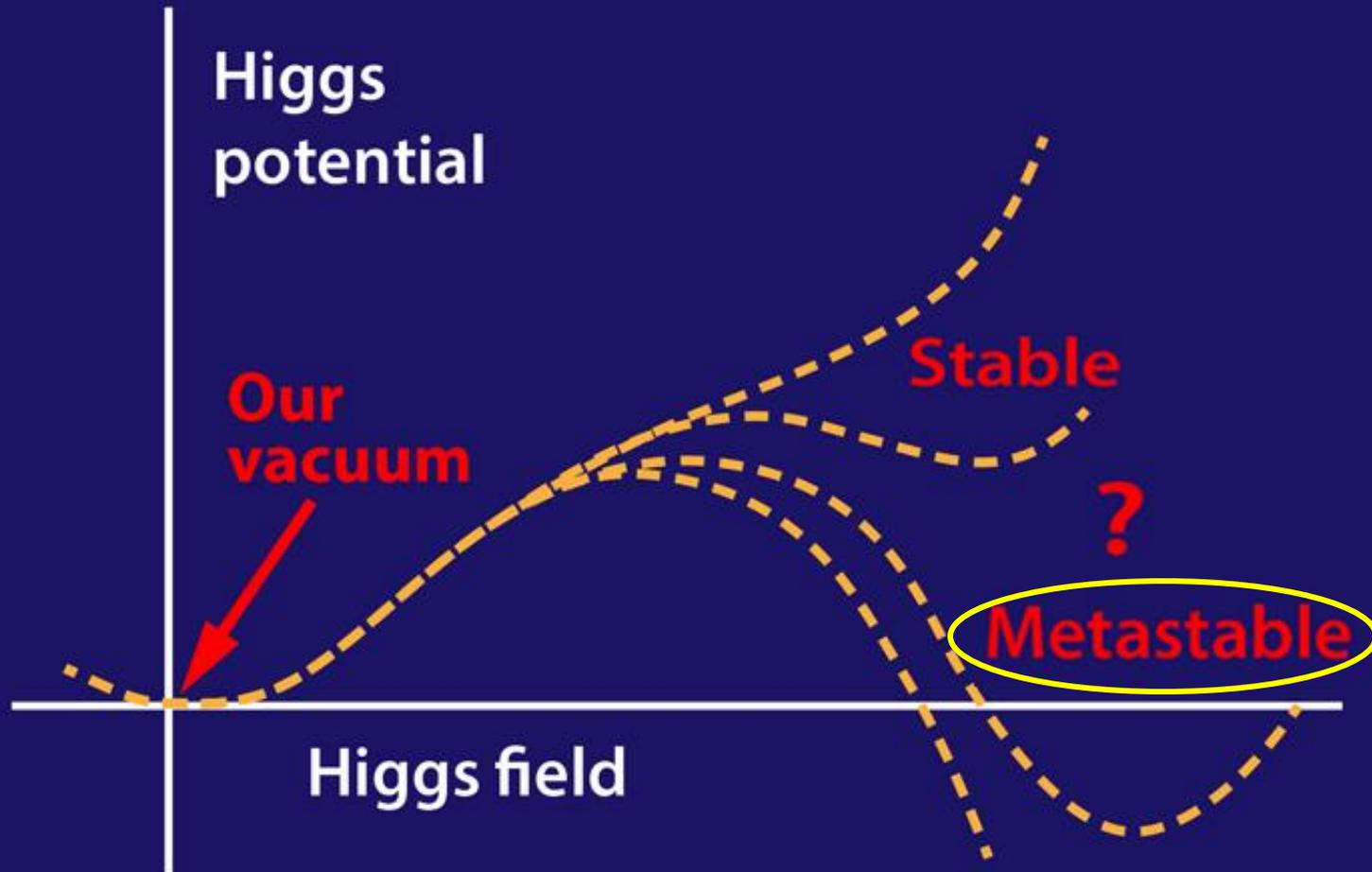
Stand der Erkenntnisse über das Higgs-Boson

- Entdeckung eines **neuen Teilchens** im **Juli 2012**
 - Es ist **ein Boson** (Spin 0 oder 2)
 - Damals nicht klar: ist es ein Higgs-Boson?
- Klar seit **März 2013**
 - Ja, es ist **ein Higgs-Boson**
 - Spin 0 (konsistent mit Higgs)
- Noch nicht klar (wird noch Jahre dauern...)
 - **Welche Art Higgs-Boson?**
 - ein **Standardmodell-Higgs-Boson?**
 - dann gibt es nur ein Higgs-Boson,
DAS “Peter Higgs”-Boson
 - ein **SUSY-Higgsteilchen oder komplizierter?**
 - dann sollte es mehrere verschiedene
Higgsteilchen geben

vielleicht haben wir gerade nur das erste gefunden und es kommen noch mehr...



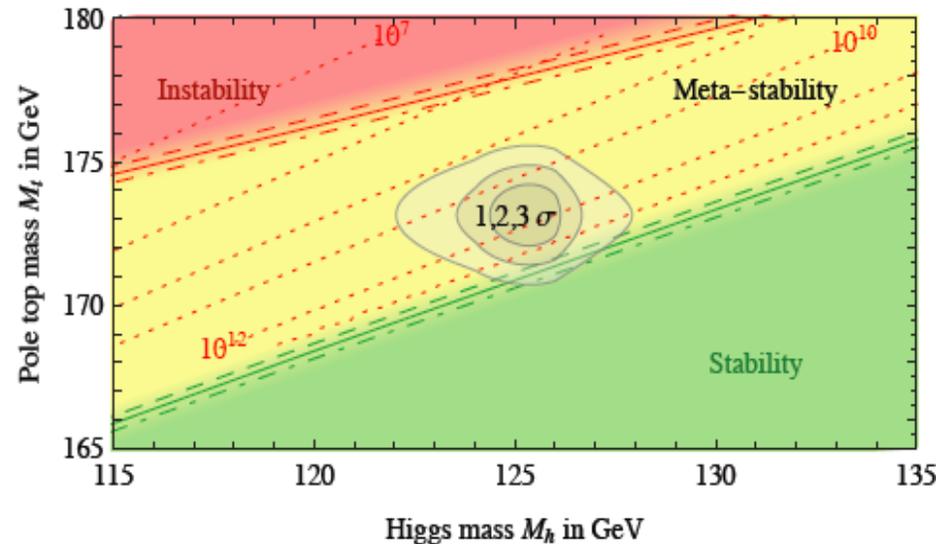
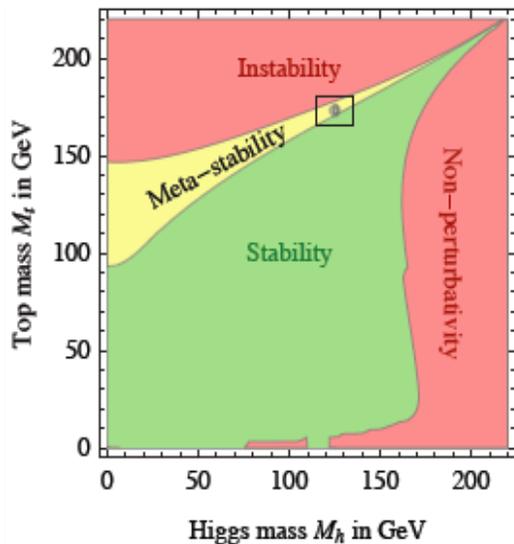
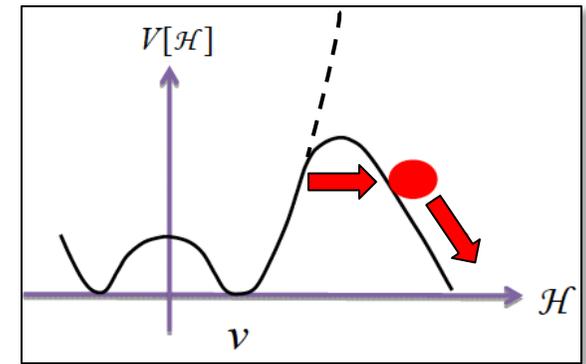
(Meta)stabilität des Universums



APS/Alan Stonebraker

Stabilität des Vakuums

- Ist das Vakuum (= unser Universum) stabil?
 - entspricht die Vakuumenergie (durch das Higgs-Feld) nur einem lokalen Minimum des Higgs-Potentials?
 - gibt es evtl. einen Zustand geringerer Energie?
 - könnte das Vakuum zu diesem Zustand durchtunneln?
- hängt ab von Top- und **Higgs-Masse**
- Vorläufiges Ergebnis: Das Vakuum ist **meta-stabil**
 - Aber: **Durchtunnelzeit** im Bereich von 10^{100} Jahren...



Ungelöste (und ein gelöstes) Rätsel

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

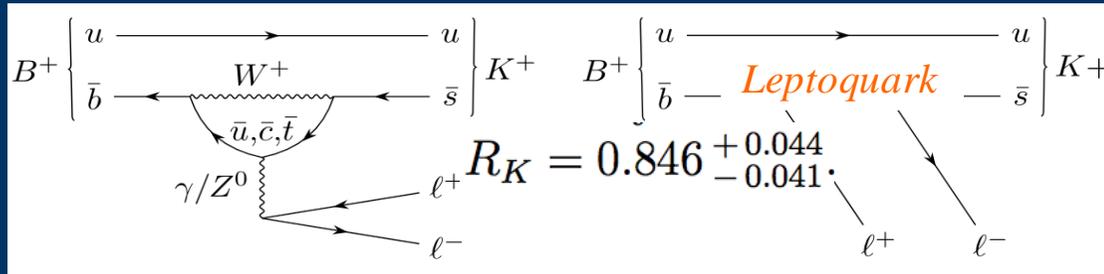
- Woraus besteht das Universum? -> Wir kennen nur 5% (baryonische Materie), Rest ist dunkle Materie und dunkle Energie.

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

Gibt es Risse im Standardmodell?

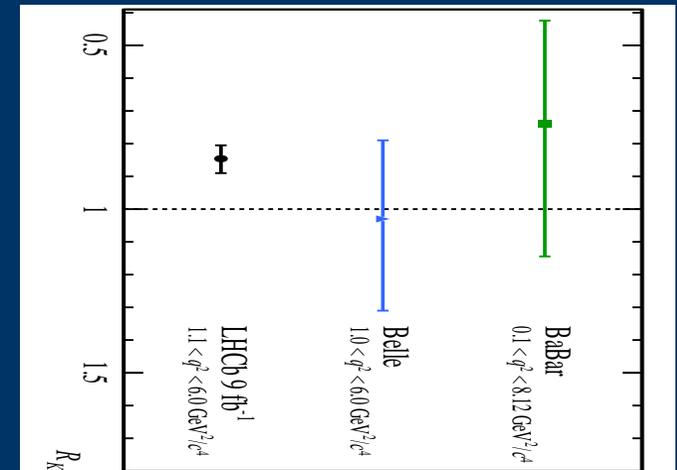
Leptonuniversalität im Standardmodell: Elektronen, Myonen, Taus haben gleiche Wechselwirkungen

Leptoquark: neues Teilchen, das verschieden oft in Elektronen und Myonen zerfallen könnte



$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-) K^+)} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi (\rightarrow e^+ e^-) K^+)}$$

$$R_K = 0.846^{+0.044}_{-0.041}$$



Neutrinos – historische Übersicht

- 1930:** Pauli postuliert Neutrino (Energieerhaltung in β -Zerfällen)
- 1934:** Fermi-Theorie des β -Zerfalls
- 1956:** Paritätsverletzung der schwachen Wechselwirkung (Lee, Yang, exp. Wu 1957)
 K^+ (“ θ^+ ”) $\rightarrow \pi^+ + \pi^0$ ($P = +1$), K^+ (“ τ^+ ”) $\rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ ($P = -1$)
V-A theory: nur linkshändige Neutrinos nehmen an schwacher WW teil.
Entdeckung des Neutrinos durch Cowan und Reines (Reaktor)
Inverser β -Zerfall $\nu_e + p^+ \rightarrow n + e^+$; Nachweise von e^+ und n
- 1957:** Pontecorvo postuliert Neutrino-Oszillationen (Neutrino – Antineutrino)
- 1962:** Entdeckung einer 2. Neutrino-Art (flavor): ν_μ $\bar{\nu}_e$
(Lederman, Schwartz, Steinberger) ($\nu_\mu + p^+ \rightarrow \mu^+ + n$; $\nu_\mu + p^+ \rightarrow e^+ + n$)
- 1990:** 3 Familien von leichten Neutrinos aus Zerfallsbreite des Z (LEP)
- 1994-1998:** Neutrino-Oszillationen: Neutrinos haben Masse!
- 2000:** 3. Neutrino-Art (ν_τ) wird bestätigt (DONUT-Fermilab)
- 2012:** Neutrino-Mischungswinkel $\theta_{13} > 0$ (Daya Bay und andere)

Rätsel der solaren Neutrinos

- Sonne “scheint” (Elektron-) Neutrinos
- Ray Davis (Nobelpreis 2002) will Neutrinos in den 1960er Jahren messen

- Tank mit 380 m³ Perchlorethylen in der Homestake Goldmine (Tiefe 1478 m)

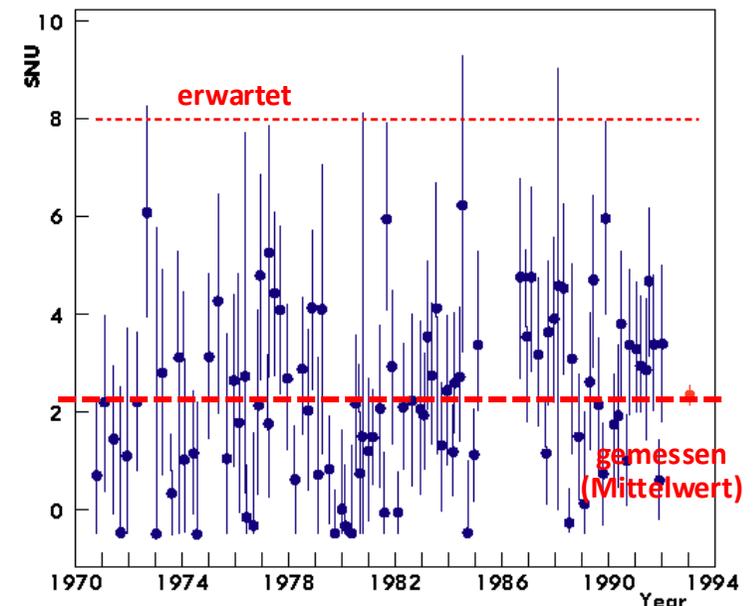
- Abschirmung kosmischer Strahlung
- Argon wird chemisch extrahiert und durch radioaktiven Zerfall nachgewiesen



- Fand nur $34 \pm 6\%$ des erwarteten Neutrinoflusses

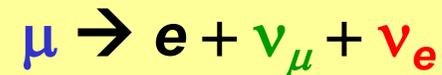
- **Messung falsch?**
- **Solarmodell falsch (Neutrinofluss)?**
- ~~beides falsch??~~

beides RICHTIG!



Erzeugung atmosphärischer Neutrinos

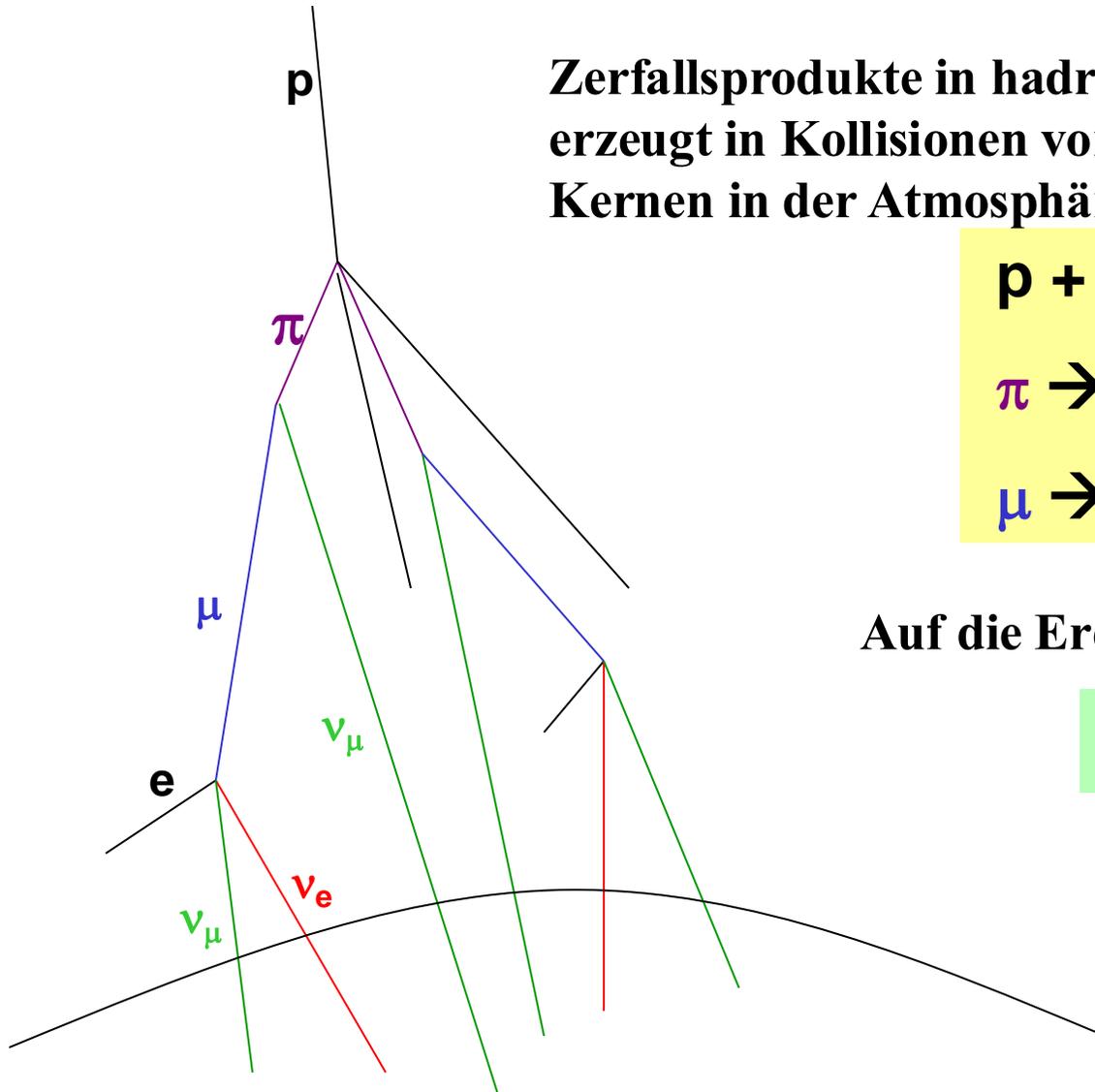
Zerfallsprodukte in hadronischen Teilchenschauern, erzeugt in Kollisionen von kosmischen Strahlen mit Kernen in der Atmosphäre:

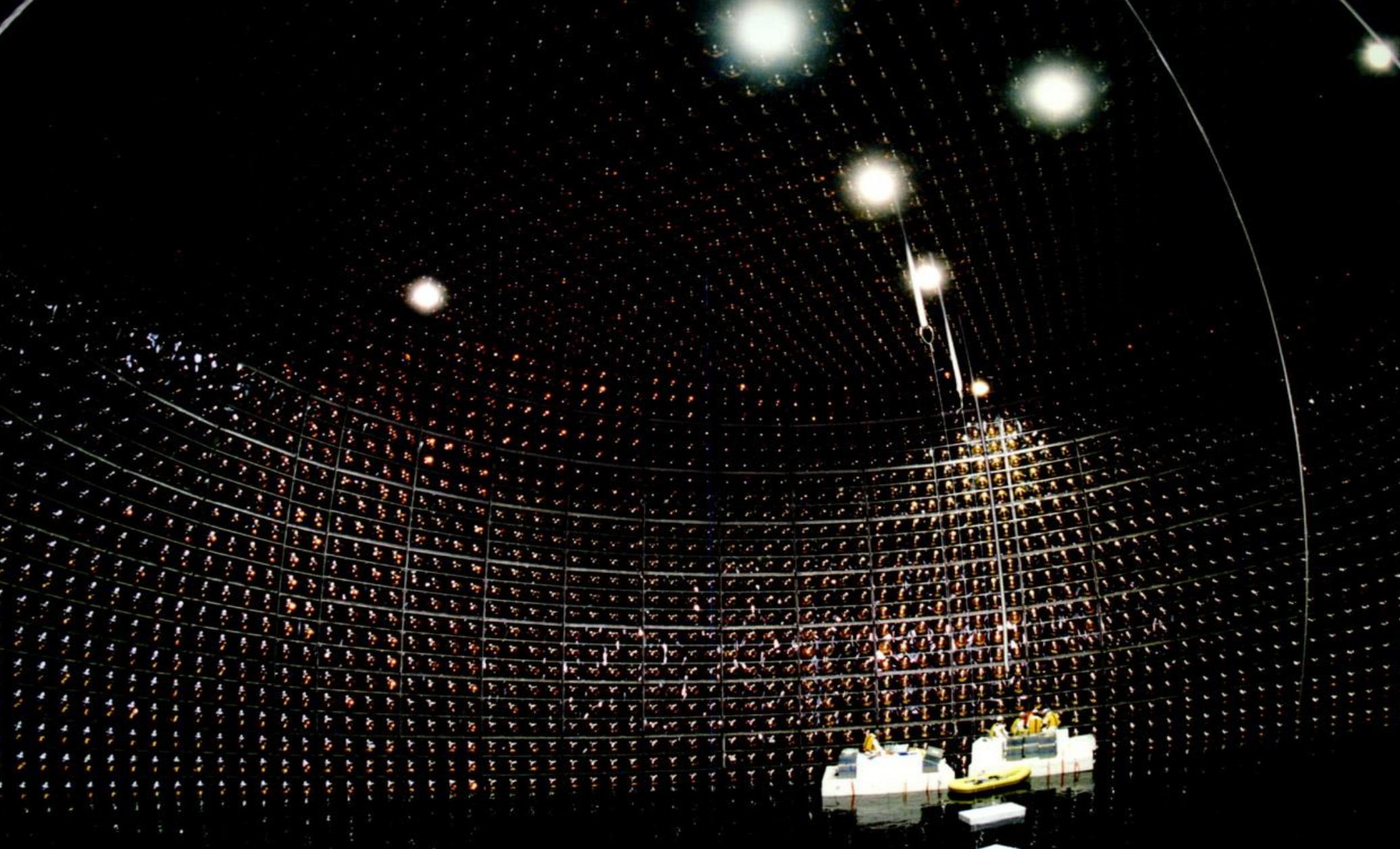


Auf die Erde sollten treffen:

$$2 \nu_{\mu} \text{ pro } \nu_e$$

$$R_{\mu/e}^{\text{MC}} = \frac{N_{\nu_{\mu}} + N_{\bar{\nu}_{\mu}}}{N_{\nu_e} + N_{\bar{\nu}_e}} \approx 2$$

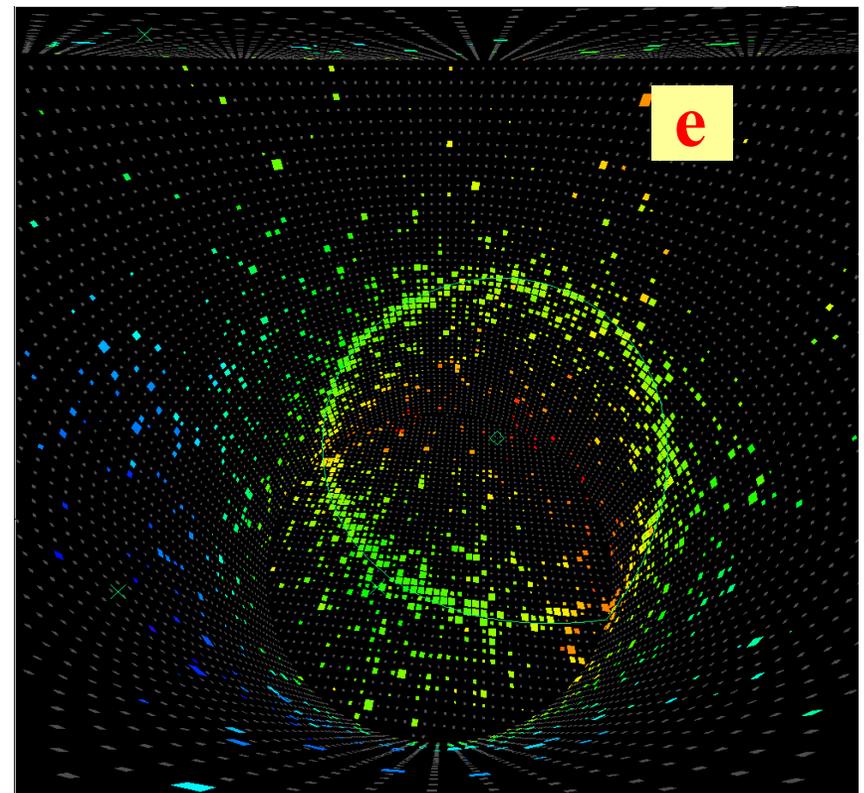
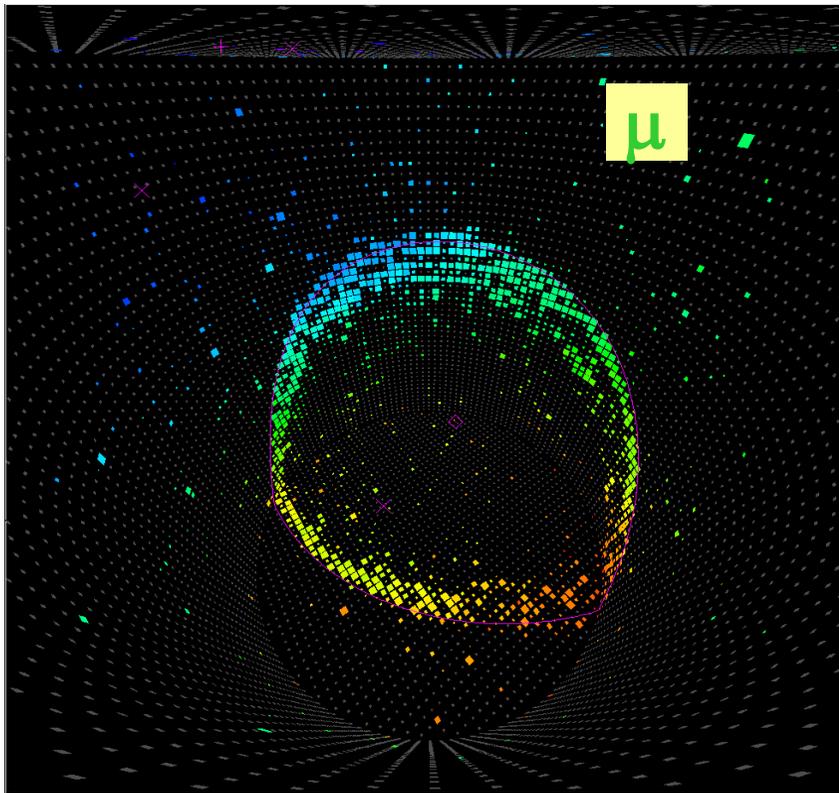




Superkamiokande (Japan)

Unterscheidung von μ und e

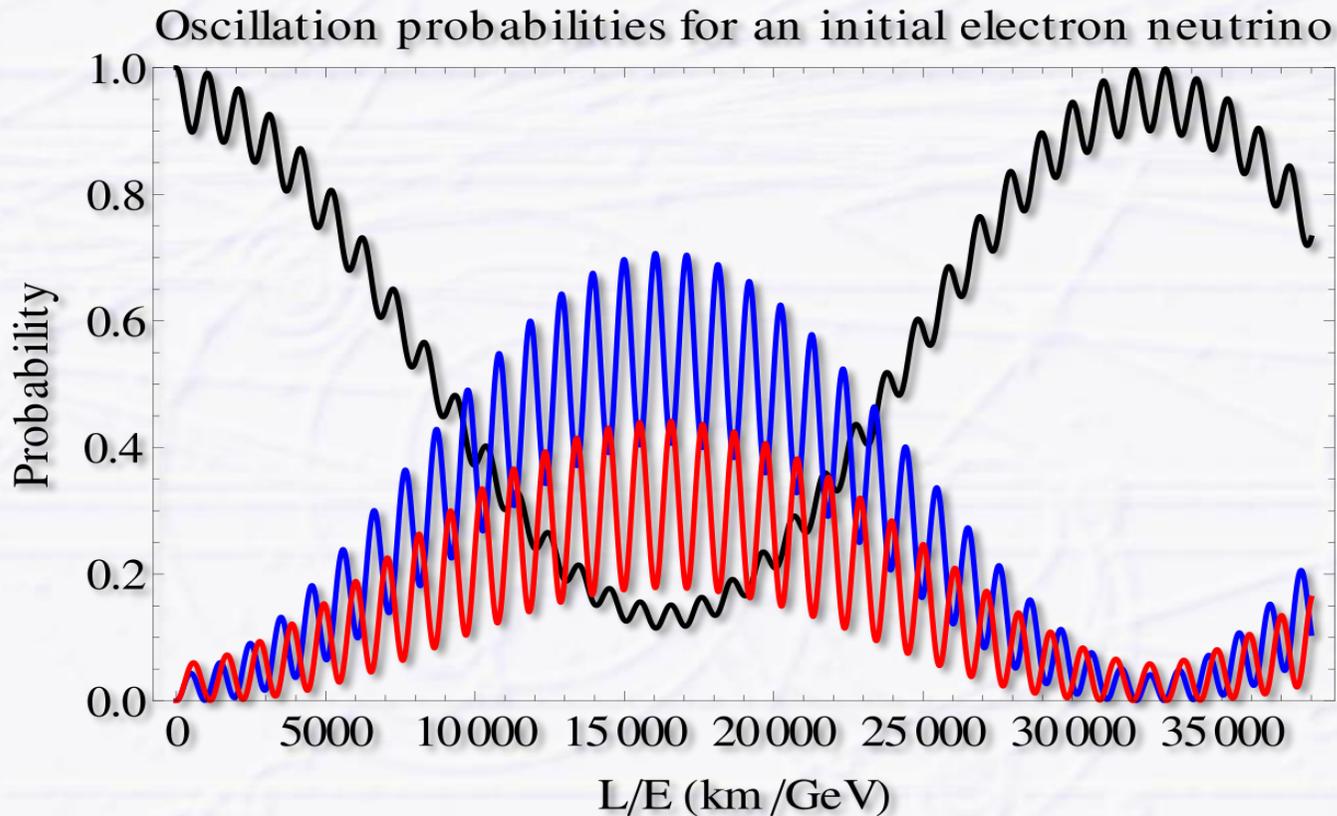
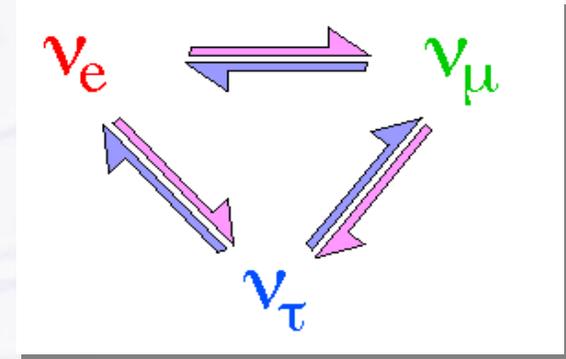
Elektronen streuen stärker als Myonen in Wasser, da sie leichter sind. Ihr Cerenkovkegel ist diffuser als der von Myonen.



Lösung: Neutrino-Oszillationen

Neutrinos verändern ihre Art mit der Zeit

→ 3 bekannte Neutrino-Arten



Reine Elektron-Neutrinos werden durch die Sonne emittiert



Erreichen die Erde jedoch als Mischung von Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos

Neutrino-Mischung

Warum können sich Neutrinos umwandeln?

- Neutrino-Arten sind nicht masselos + haben (kleine) Massendifferenzen
 - Wellenfunktionen sind **Superpositionen von 3 Neutrino-Zuständen**
 - Auftreten von Phasenverschiebungen mit der Zeit, **Zusammensetzung variiert zeitlich**
- Mischung wird durch Matrix beschrieben
 - Neutrinoart Eigenzustand (Wechselwirkung) \neq Neutrinomasse Eigenzustand (Ausbreitung)

Wie Neutrinos
wechselwirken

Wie Neutrinos
sich ausbreiten

$$\nu_l = U_{li} \nu_i$$

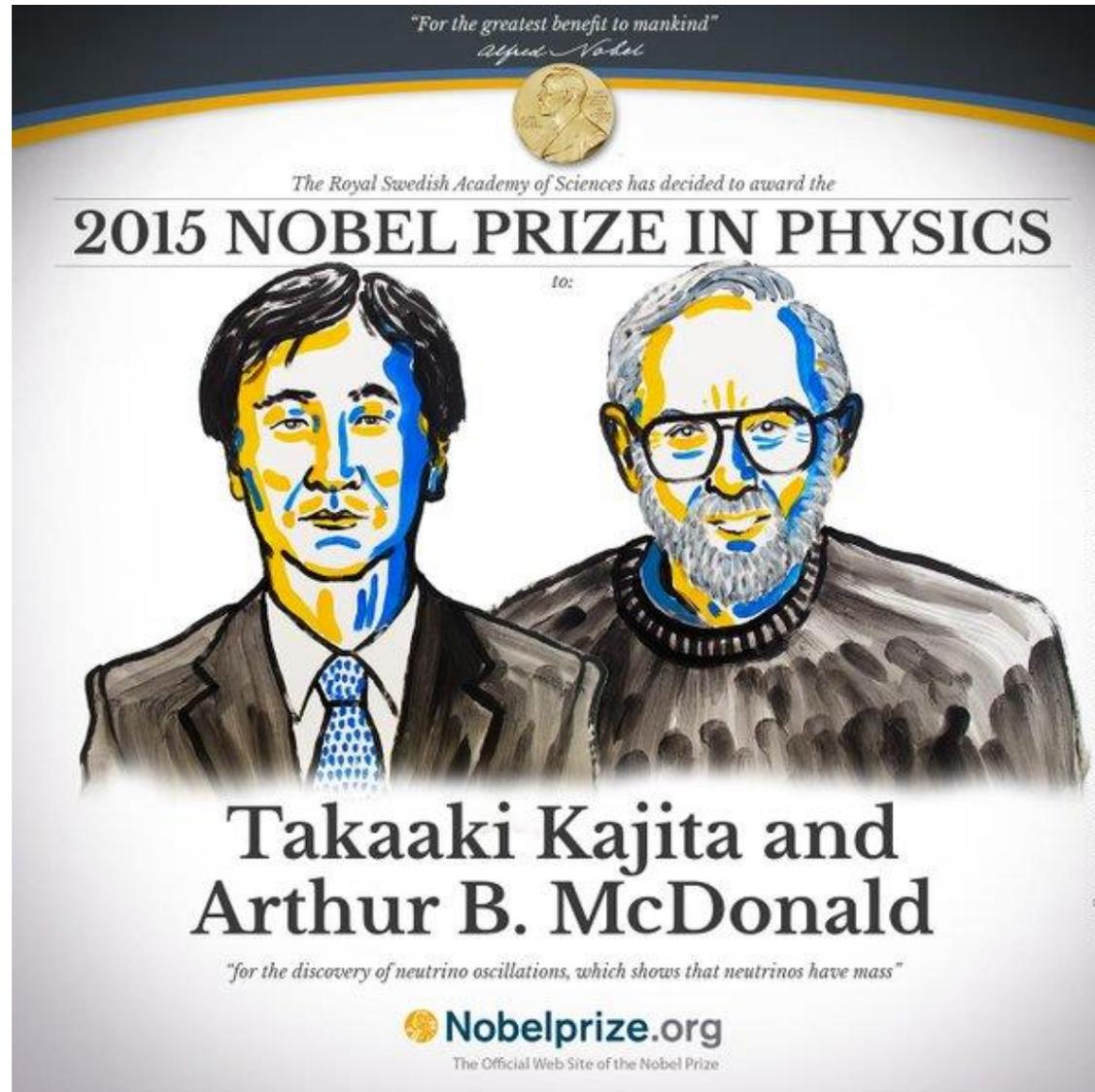
3 Neutrinoarten

3 Neutrinomassen

U Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo (MNSP) matrix

Matrix mit 3 Winkeln (θ_{12} , θ_{13} , θ_{23}) und 1 CP-verletzenden Phase δ ; $l = e, \mu, \tau$, $i=1,2,3$ falls Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind.

Nobelpreis für Neutrino-Oszillationen





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

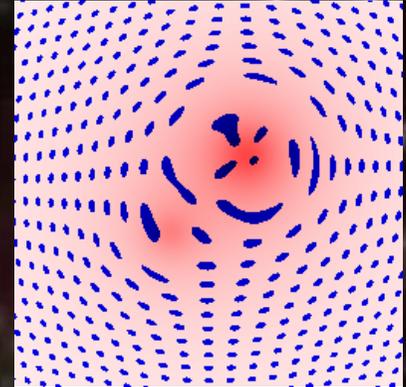
Abbild der Galaxie

Imaginärer Lichtweg

Tatsächlicher
Lichtweg

Massives
Objekt

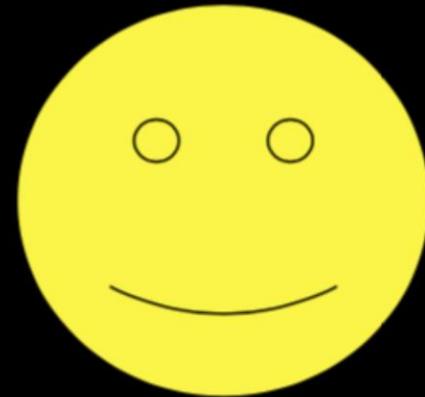
Abbild der Galaxie



Smiley

“Hubble sees a smiling lens”

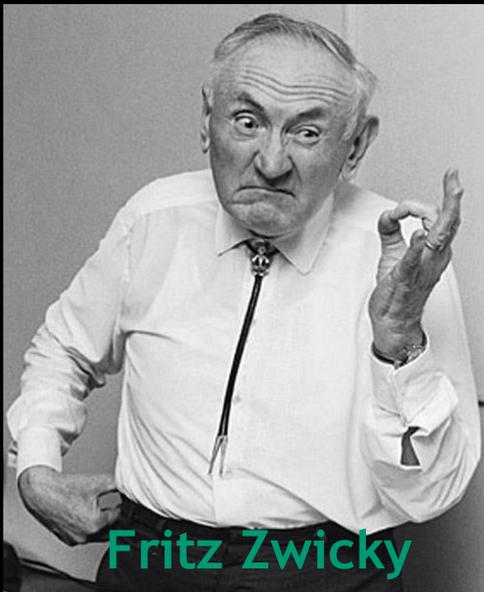
<https://www.nasa.gov/content/hubble-sees-a-smiling-lens>



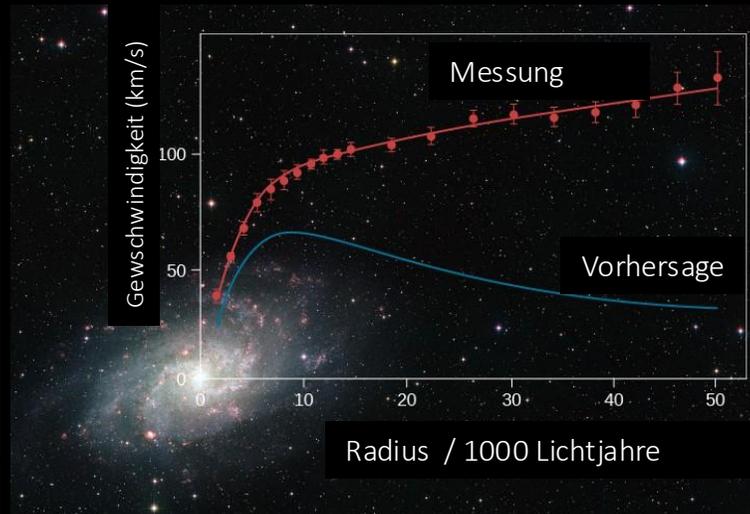


Dunkle Materie

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



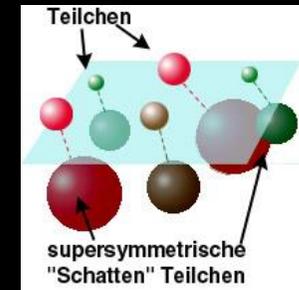
Vera Rubin

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

Was ist die dunkle Materie ?

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

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!**

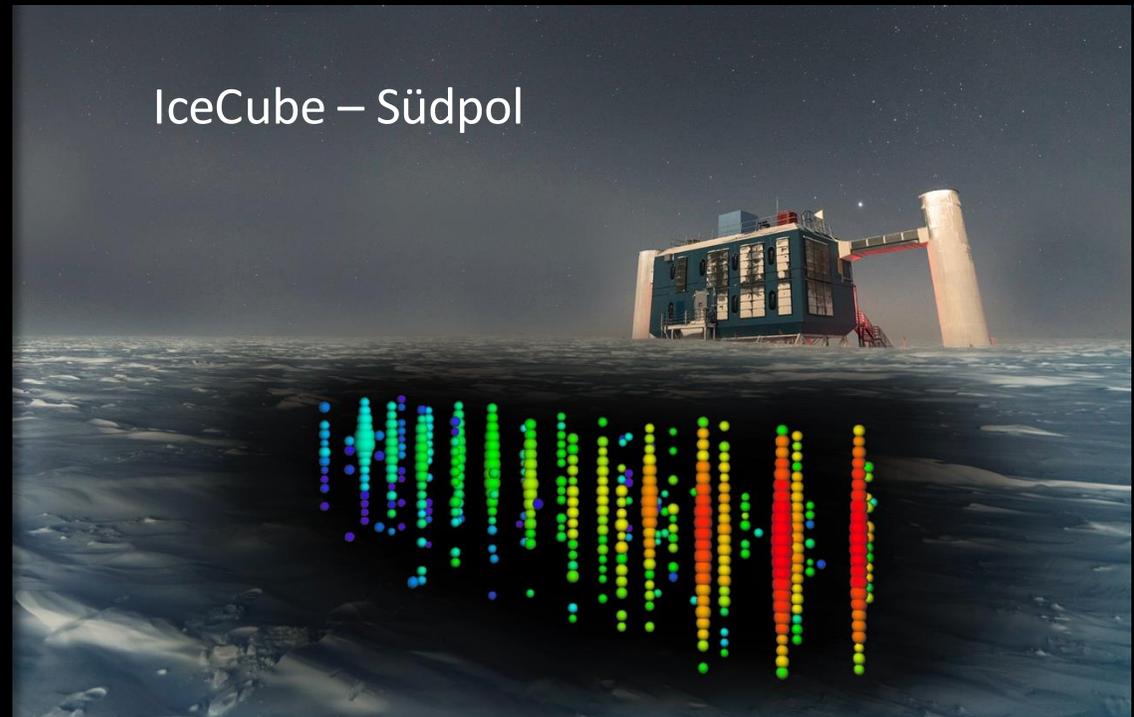


Experimente für Dunkle Materie

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

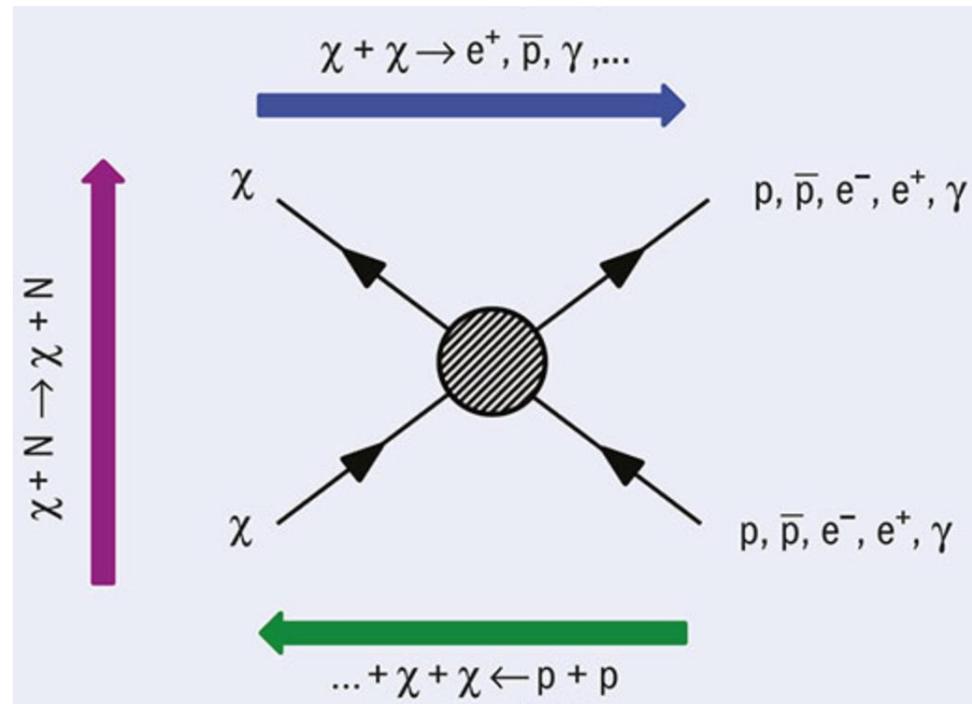


CRESST – Gran Sasso



IceCube – Südpol

Unabhängige Methoden zur Suche nach WIMPs



Direkt: Dunkle Materie (χ) -Nukleon-Streuung (Undergrundlaboratorien)

Indirekt: DM-Annihilation (AMS-02, Fermi, DM Ice, ...)

Erzeugung: bei Collidern (ATLAS, CMS, ...), direkt oder in SUSY-Kaskadenzerfällen

Für diese Methoden ist es notwendig, dass dunkle Materie eine Form von nicht-gravitationeller Wechselwirkung hat, und auch mit sich selbst wechselwirkt.

Direkter Nachweis von dunkler Materie

Elastische Streuung von dunkler Materie an Atomkernen

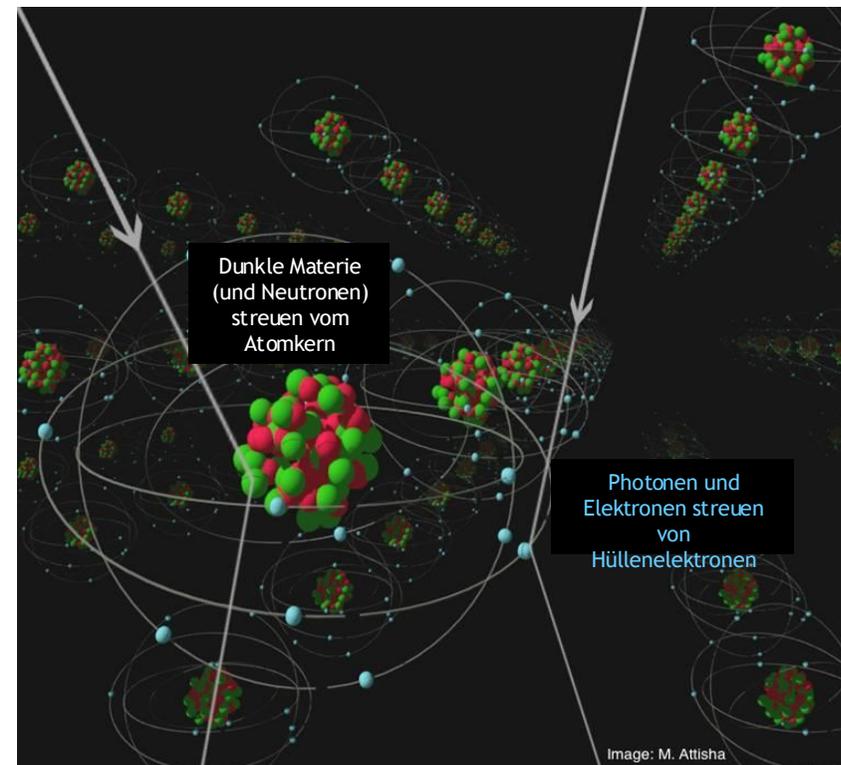
- Geschwindigkeit $\sim O(100 \text{ km/s})$, beschränkt durch Fluchtgeschwindigkeit aus der Milchstraße ($\sim 600 \text{ km/s}$)
- De Broglie Wellenlänge: $\lambda = h/mv \sim 10 \text{ fm}$, größer als Kernradien
- Deshalb erfolgt kohärente elastische Streuung am Kern als Ganzes
- Für $m_\chi = 100 \text{ GeV}$ $E_\chi^{\text{kin}} \sim O(10 \text{ keV})$ im Detektor abgegeben

Niederenergetische Kernstreuprozesse

- Können von dunkler Materie kommen, aber auch von Streuung kosmischer Neutronen aus Spallation oder Spaltung
- Undergroundlaboratorien deshalb ausgezeichnet

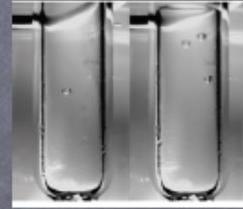
Hauptsächlichster Untergrund

- Elektronenstreuung, meist aus radioaktivem β -Zerfall oder Comptonstreuung



Dark Matter direct detection techniques

Heat and ionisation bolometers : CDMS
EDELWEISS



Bubbles and Droplets:
CUOPP
PICASSO

Light and heat Bolometers:
CRESST
ROSEBUD



Phonons/Heat

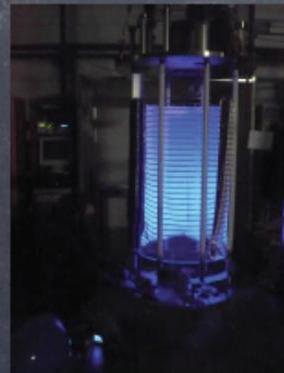


Charge

Light

Scintillation and ionisation charge detectors:

XENON
WARP
ArDM
ZEPLIN
LUX
LUX-ZEPLIN

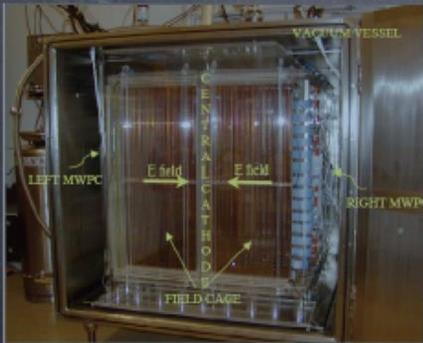


Scintillators :

DAMA
LIBRA
XMASS
CLEAN
ANAIS
KIMS
DEAP-1
DEAP-3600



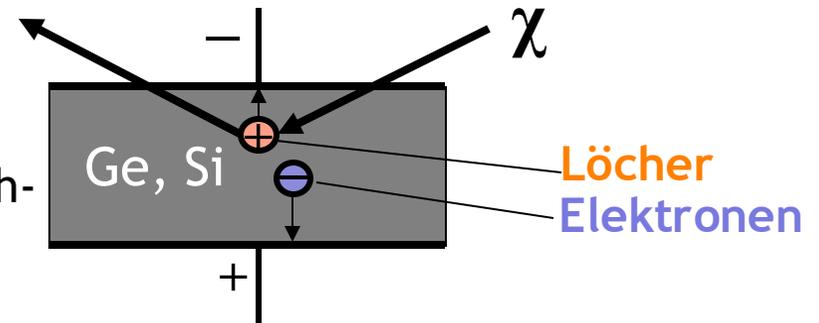
Ionisation detectors: DMTPC
DRIFT, GENIUS, NEWAGE,
HDMS, IGEX, CoGeNT



Einkanal-Nachweis

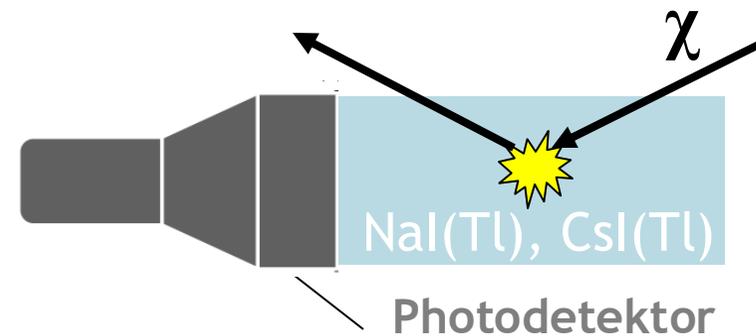
Halbleiter-Ionisationsdetektoren

- χ erzeugen Ionisationsladung
- Meist Ge und Si
- Energie zur Erzeugung eines Elektron-Loch-Paares ist klein (Ge: 2.9 eV, Si: 3.6 eV)
- Si besser für leichte WIMPs, wegen kleinerer Massenzahl A



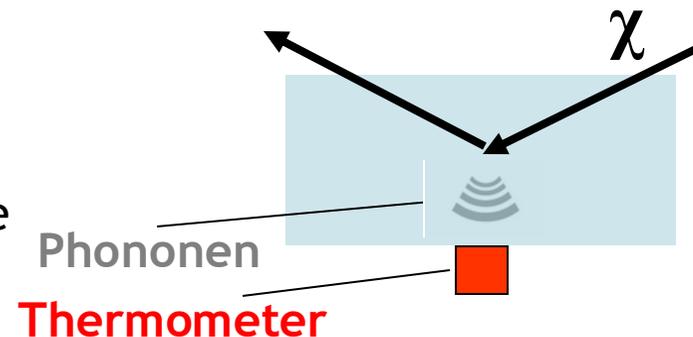
Kristallszintillatoren

- χ erzeugen Szintillationslicht
- Meist NaI(Tl)- oder CsI(Tl)-Kristalle
- Ziemlich hoher intrinsischer Untergrund
- Experimente konzentrieren sich auf Suche nach Signalen jährlicher Modulation



Bolometer

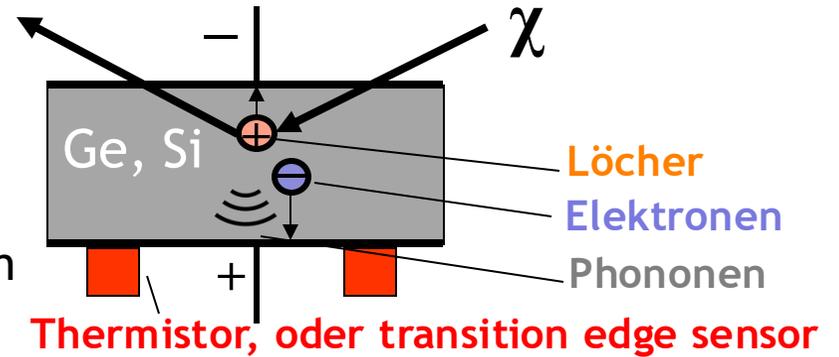
- χ erzeugen Wärme (Phononen)
- Phonon: Gitterschwingung, wobei Moleküle mit einer einzigen Frequenz schwingen



Mehrkanal-Nachweis

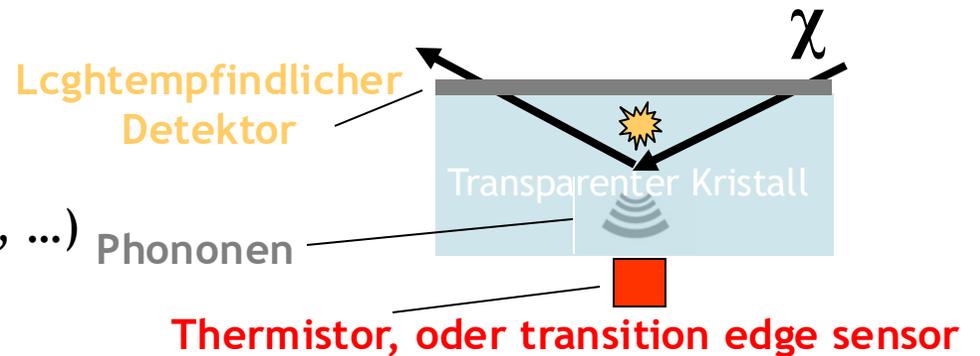
Ionisation / Wärme

- Thermistor: elektrischer Widerstand ändert sich mit Temperatur (meist NTC)
- Transition edge sensor: temperaturabhängiger Widerstand des supraleitenden Phasenübergangs
- Kristalle erwärmen sich um $O(\mu\text{K})$
- Betriebstemperatur $O(\text{mK})$



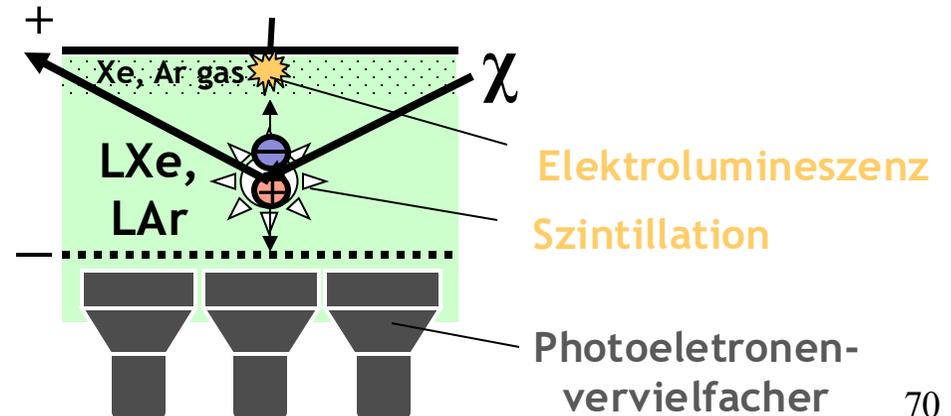
Szintillation / Wärme

- Transparente Kristalle (CaWO_4 , BGO, ...)
- Betriebstemperatur $O(\text{mK})$
- Cryo-Kristalldetektoren



Szintillation / Ionisation

- Zwei-Phasen Edelgasdetektoren
- Betriebstemperatur $O(100 \text{ K})$
- Time Projection Chamber (TPC)





AMS auf der ISS



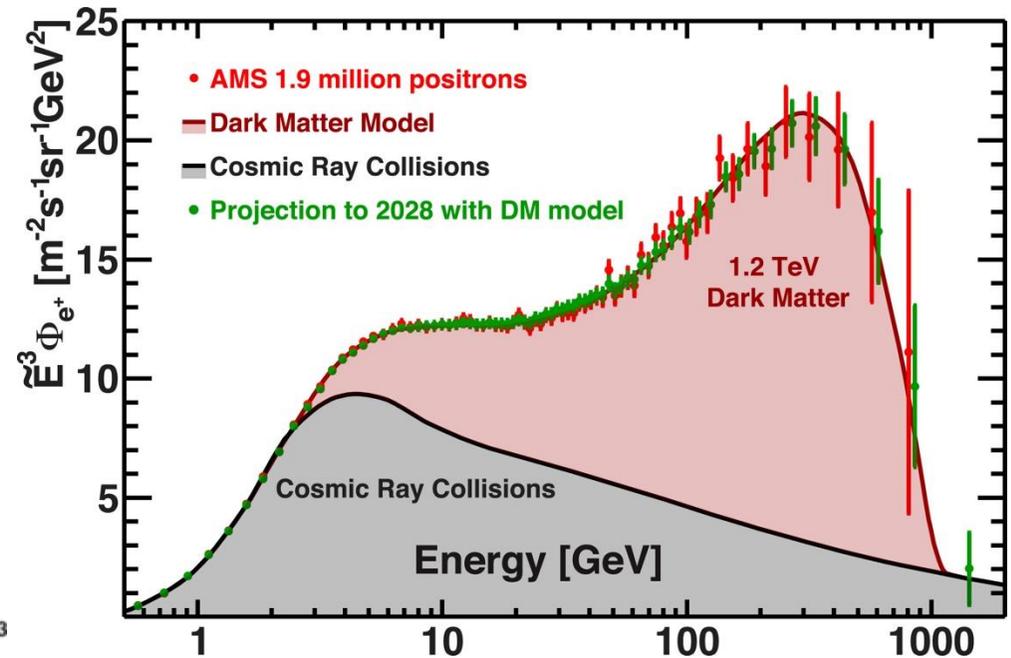
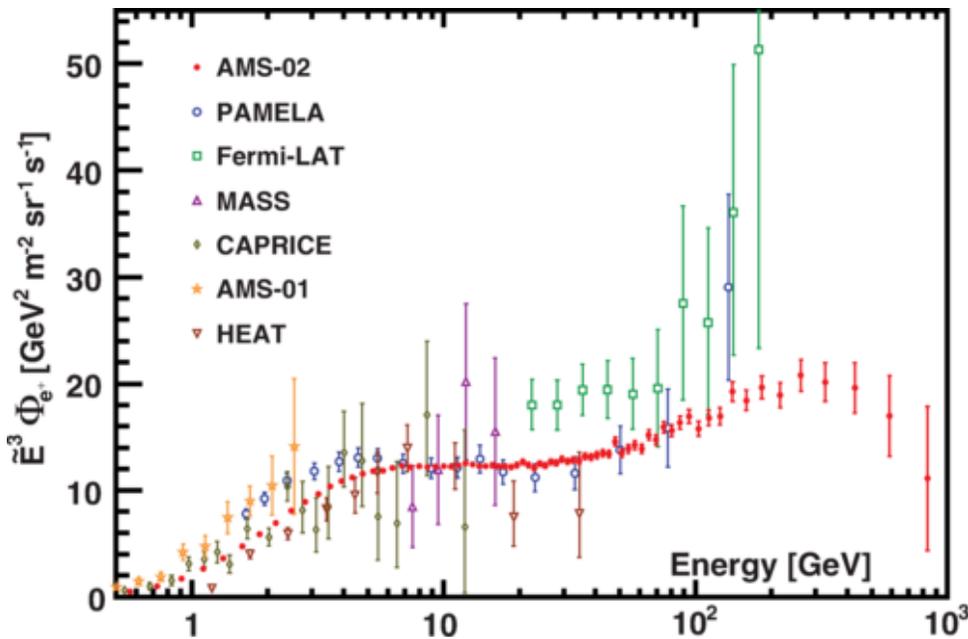


AMS-02 Resultate

$\chi + \chi \rightarrow e^+ + \square. \rightarrow$ Positronenüberschuss

PRL 122, 041102
(2019)

<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.09.003> (2021)

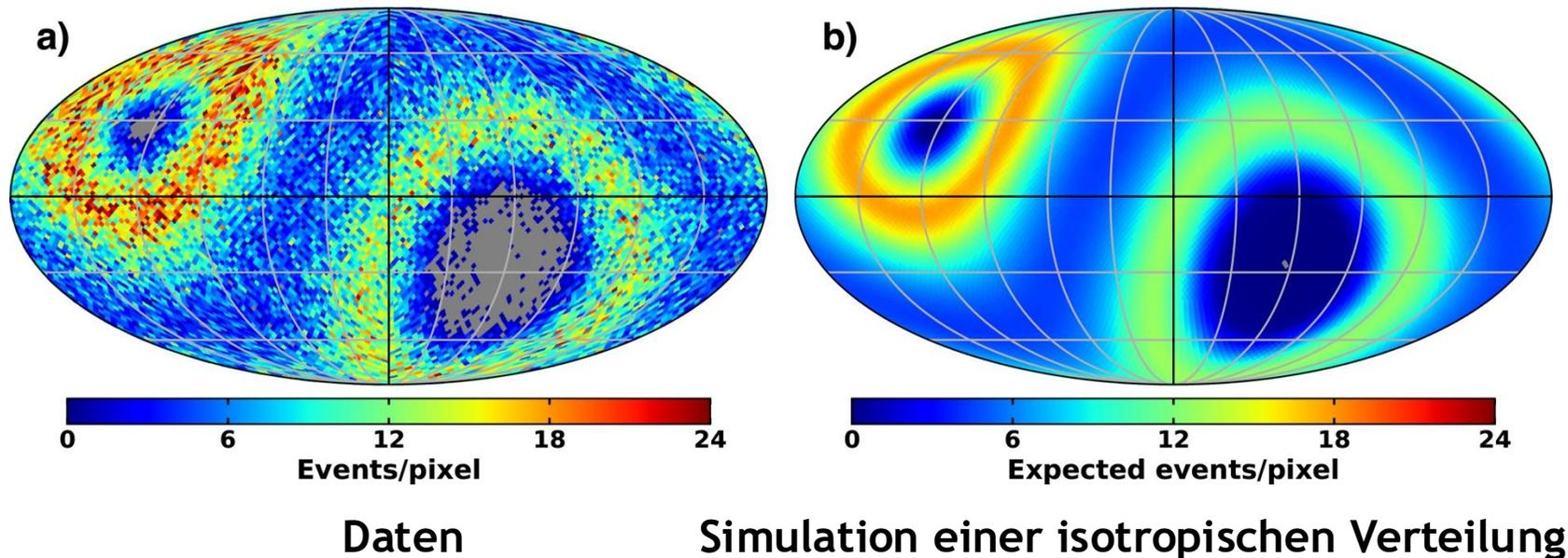




AMS-02 Dipolanisotropie

Anisotropieparameter: $\delta \leq 0.019$ (95% C.L.)

Wenn der e^+ -Überschuss keine Anisotropie zeigt, sollte er einen teilchenphysikalischen Ursprung haben (dunkle Materie?)

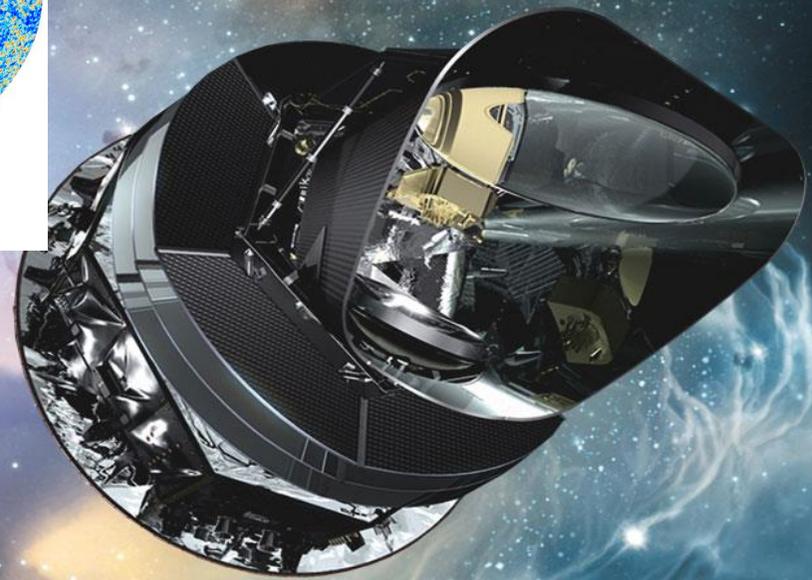
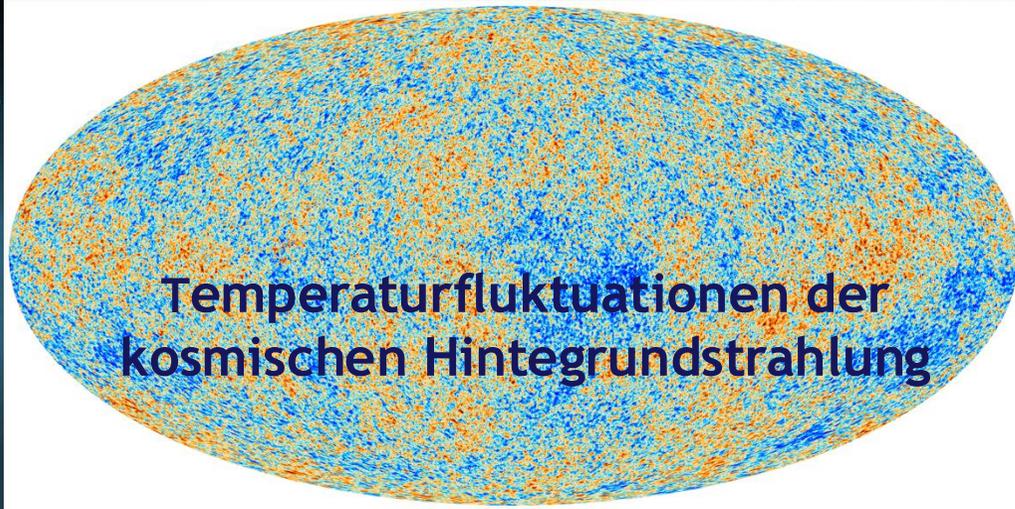


Ist es wirklich dunkle Materie? Signal stammt eher von Pulsaren ...

Pulsar: magnetisierter rotierender kompakter Stern, der gebündelte elektromagnetische Strahlung aussendet (wie ein Leuchtturm)



Planck-Satellit

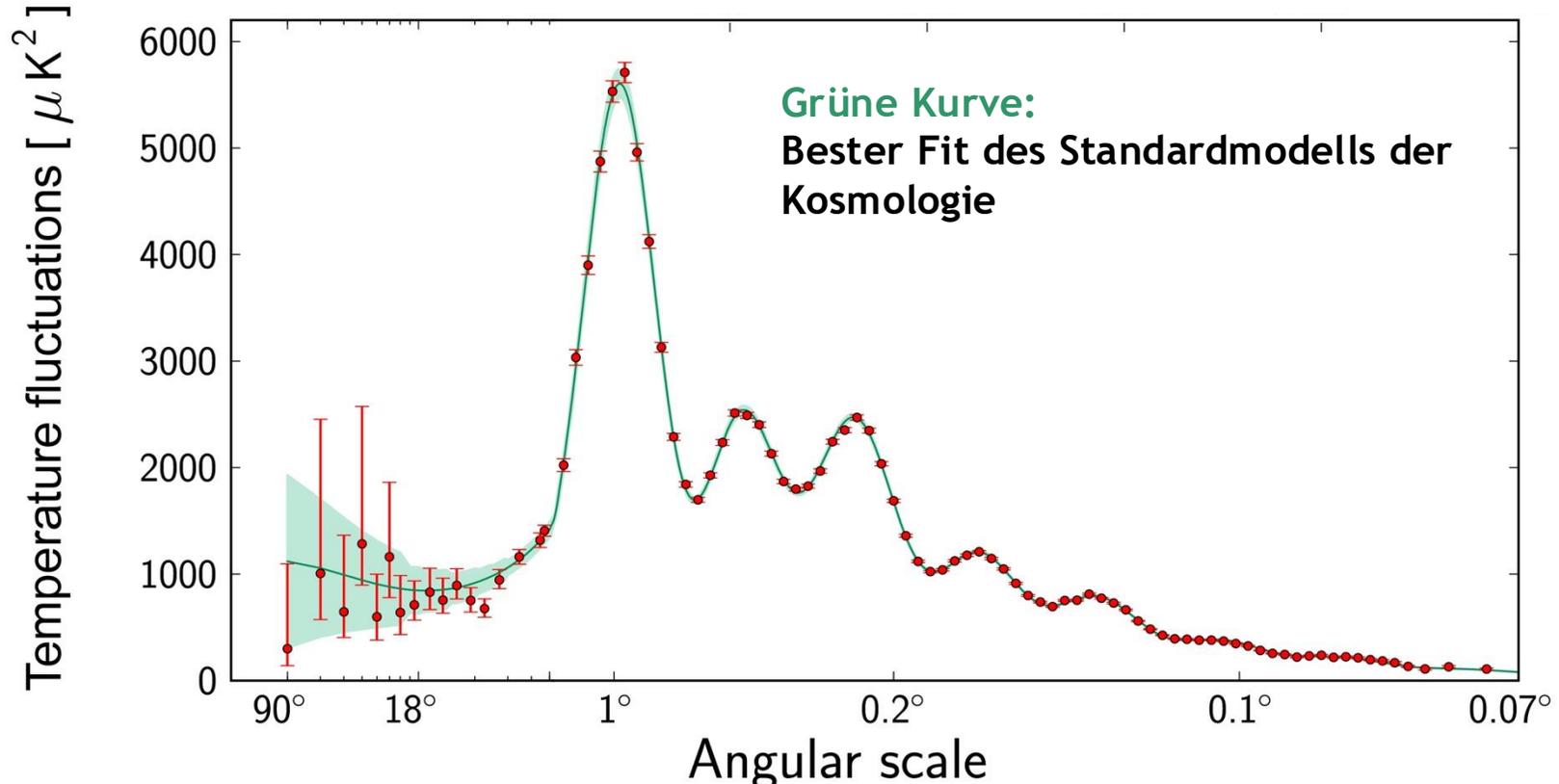


14. Mai 2009 -
23. Okt. 2013



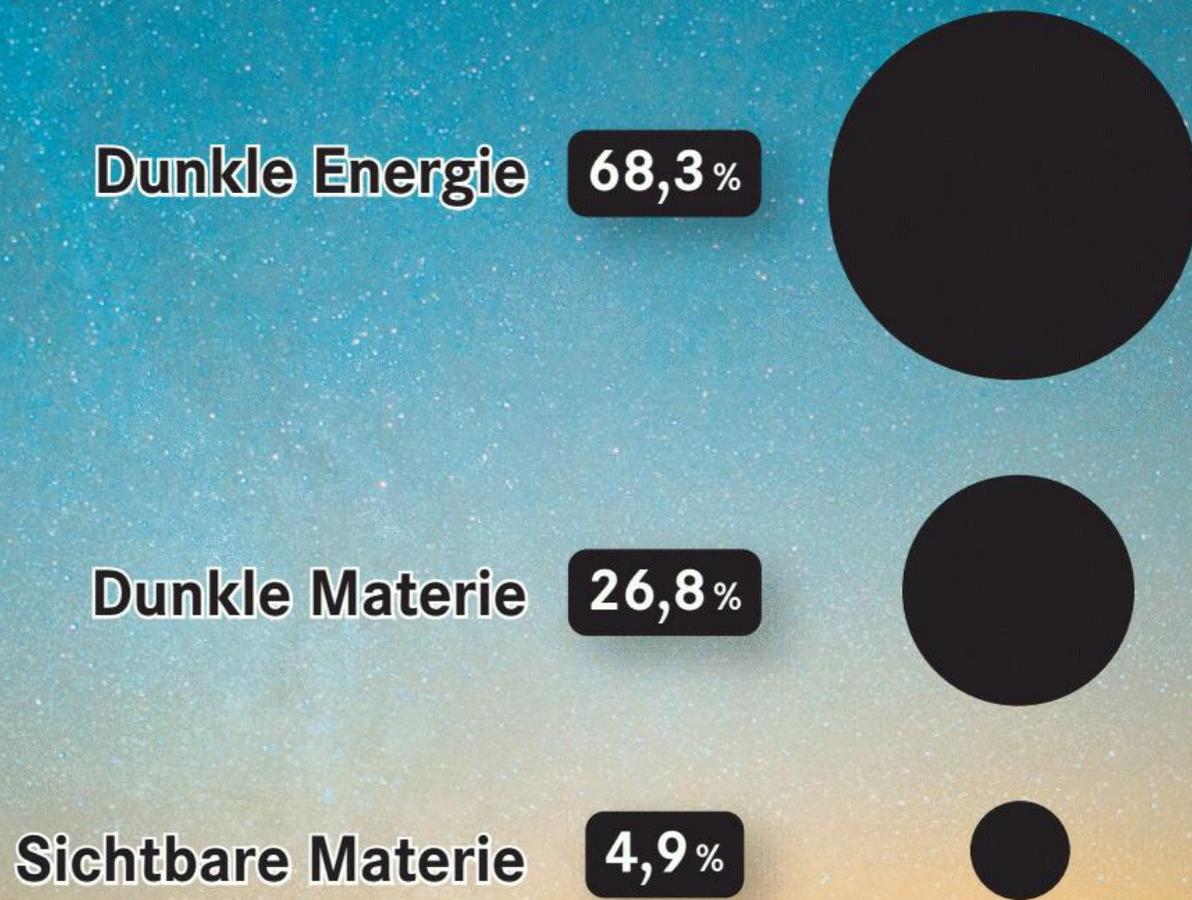


Primordiale Schallwellen



- Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung zeugen von Schallwellen im frühen Universum
- Die Analyse dieser Schallwellen, und die Polarisation der Hintergrundstrahlung, die sie erzeugen, helfen Modelle des Universums einzuschränken
- Die drei hohen Peaks reflektieren die relativen Beiträge von dunkler Energie, baryonischer Materie, und dunkler Materie.

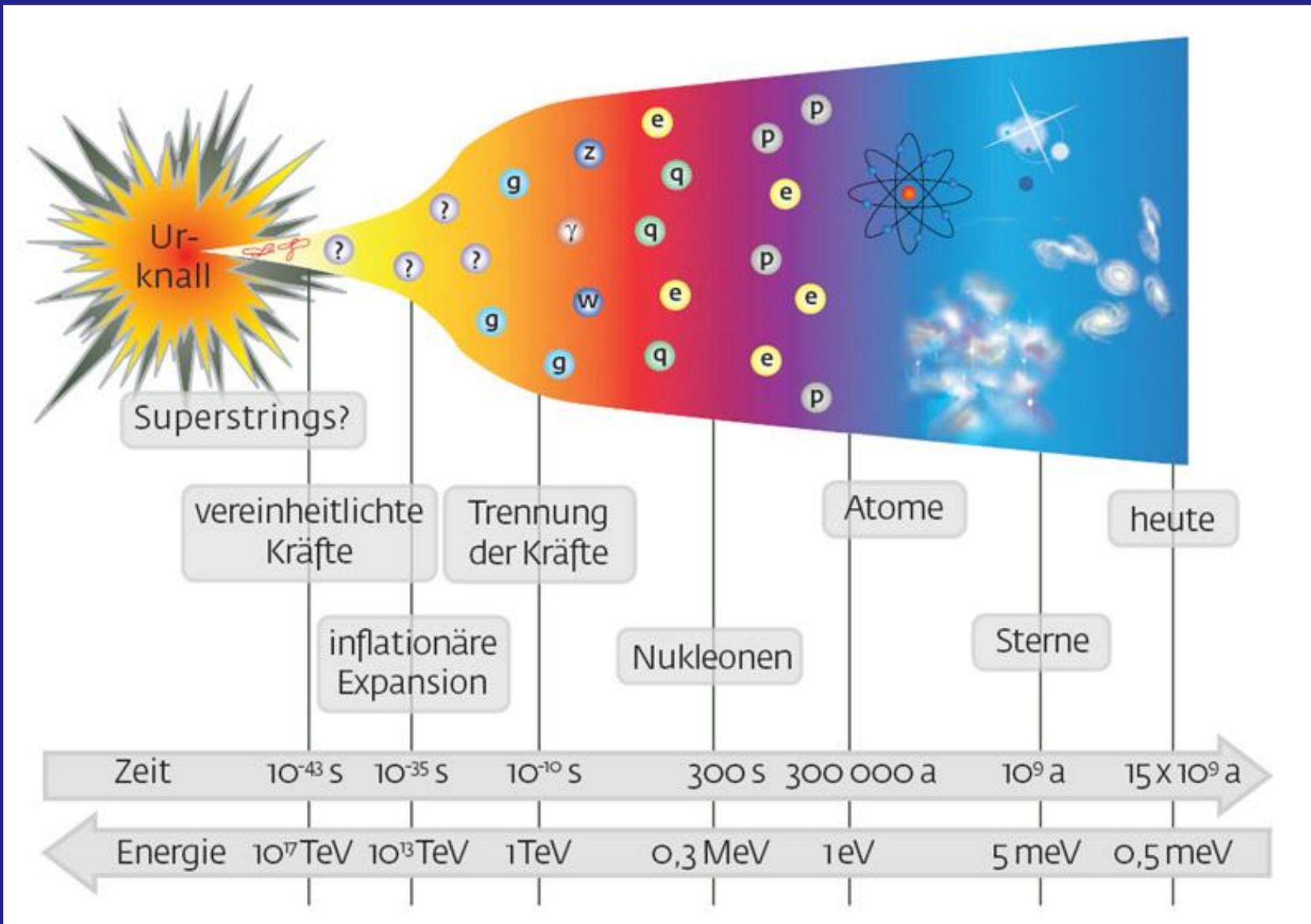
■ Bausteine des Universums



BZ-GRAFIK/DRE

QUELLE: GEO

Geschichte des Universums

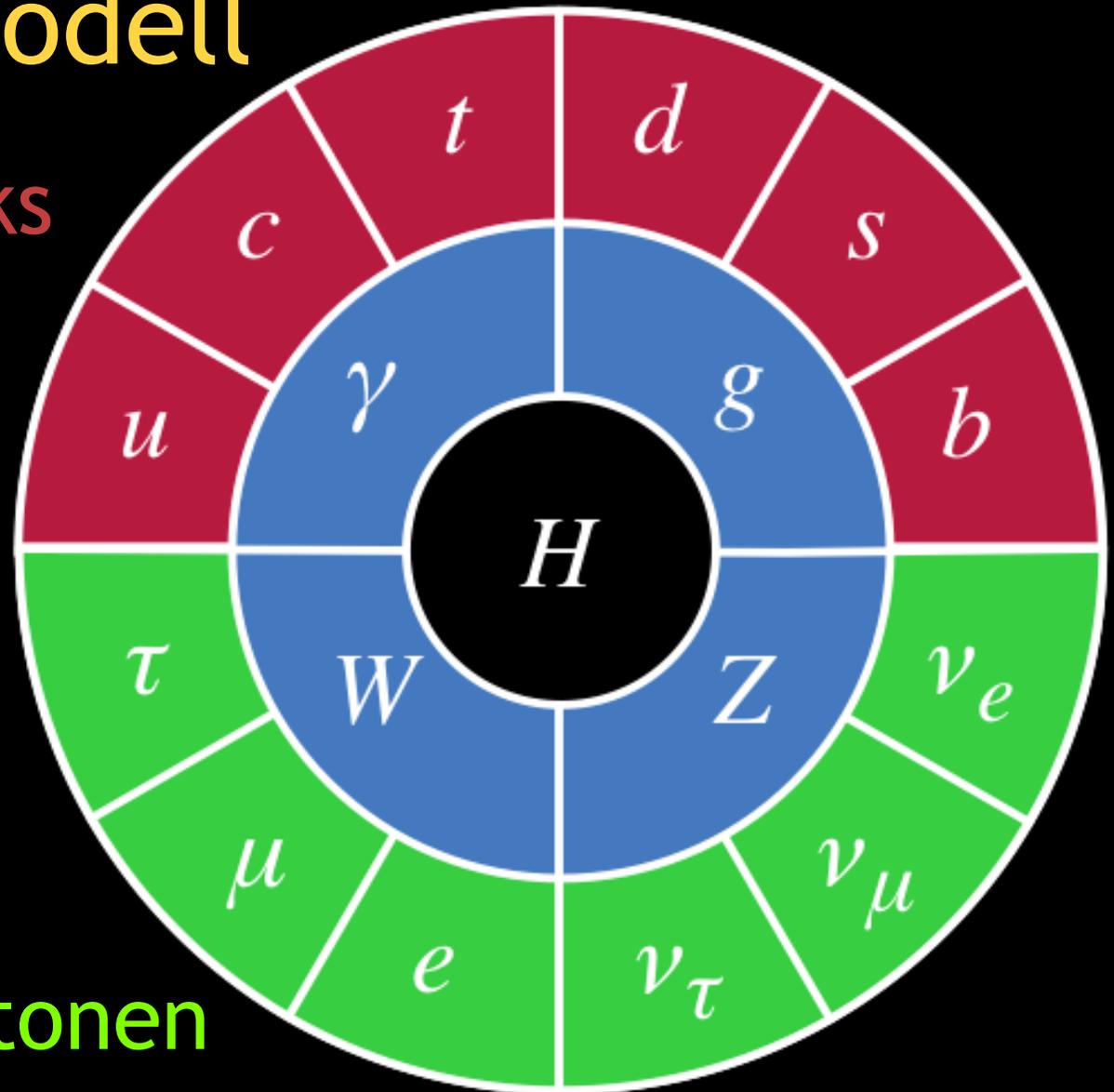


Standardmodell

Quarks

Kraftteilchen

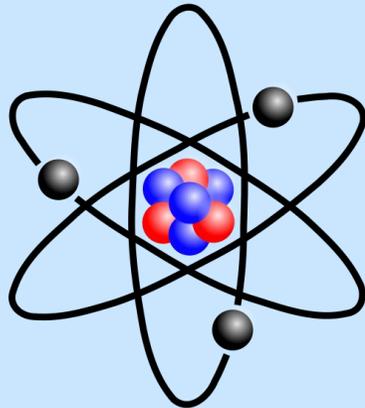
Leptonen



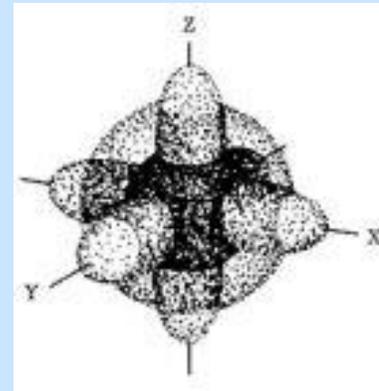


Quantentheorie

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



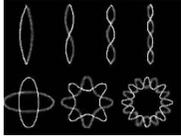
Klassisches Bild: Elektronen bewegen sich auf **festen Bahnen** um den Atomkern, und sie können alle möglichen Energien haben.



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

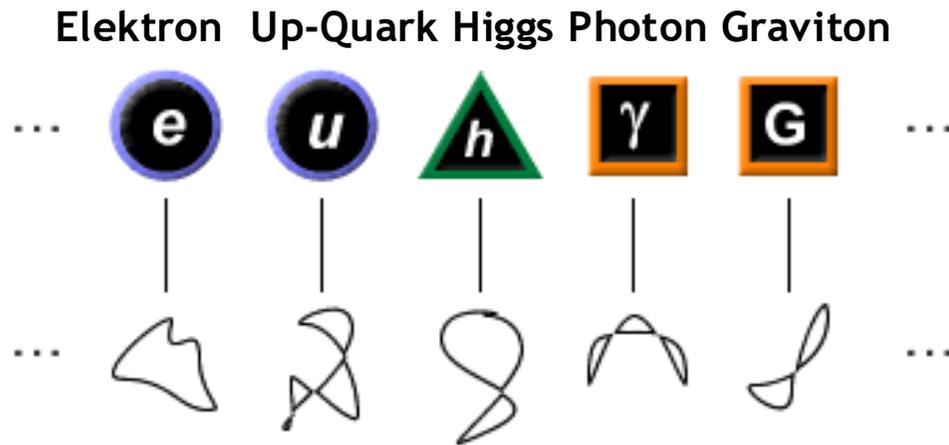
Jedoch:

Die Gravitation passt nicht in die quantenmechanische Welt!

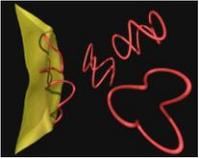


Stringtheorie

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.

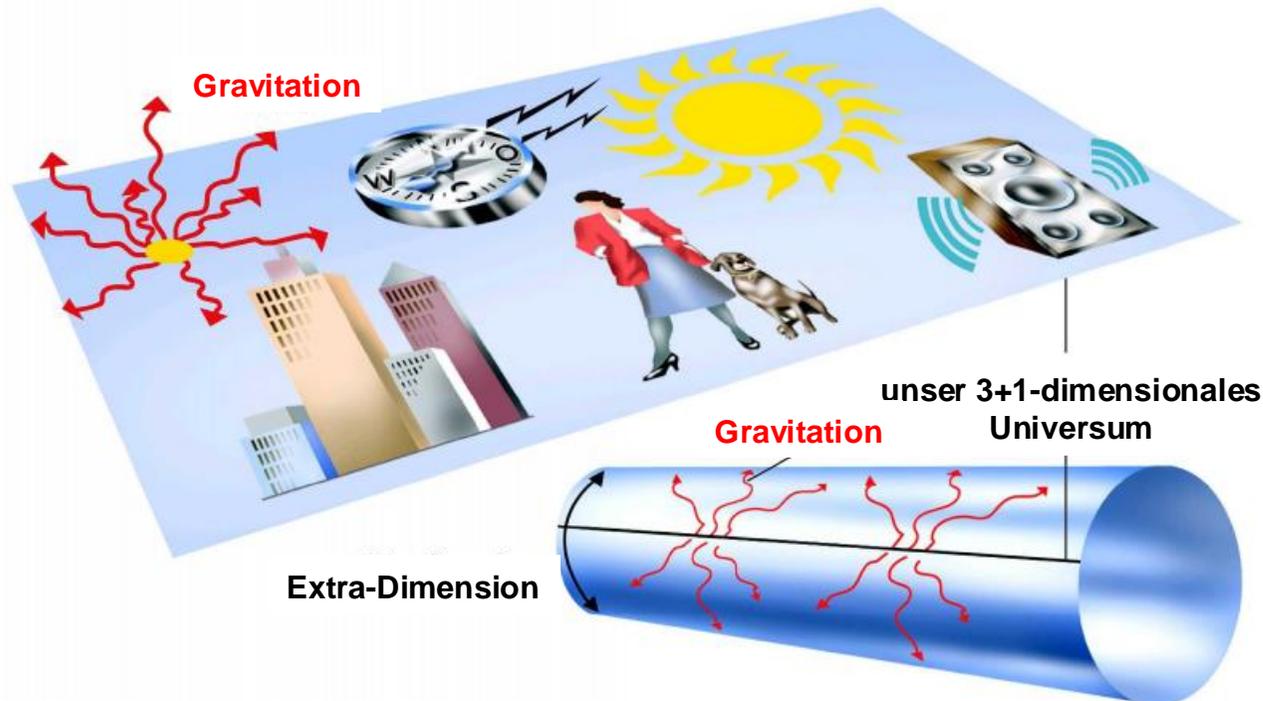


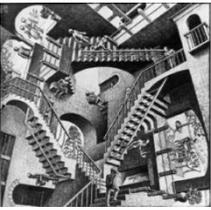
Gravitation und Extradimensionen

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

Mögliches Modell:

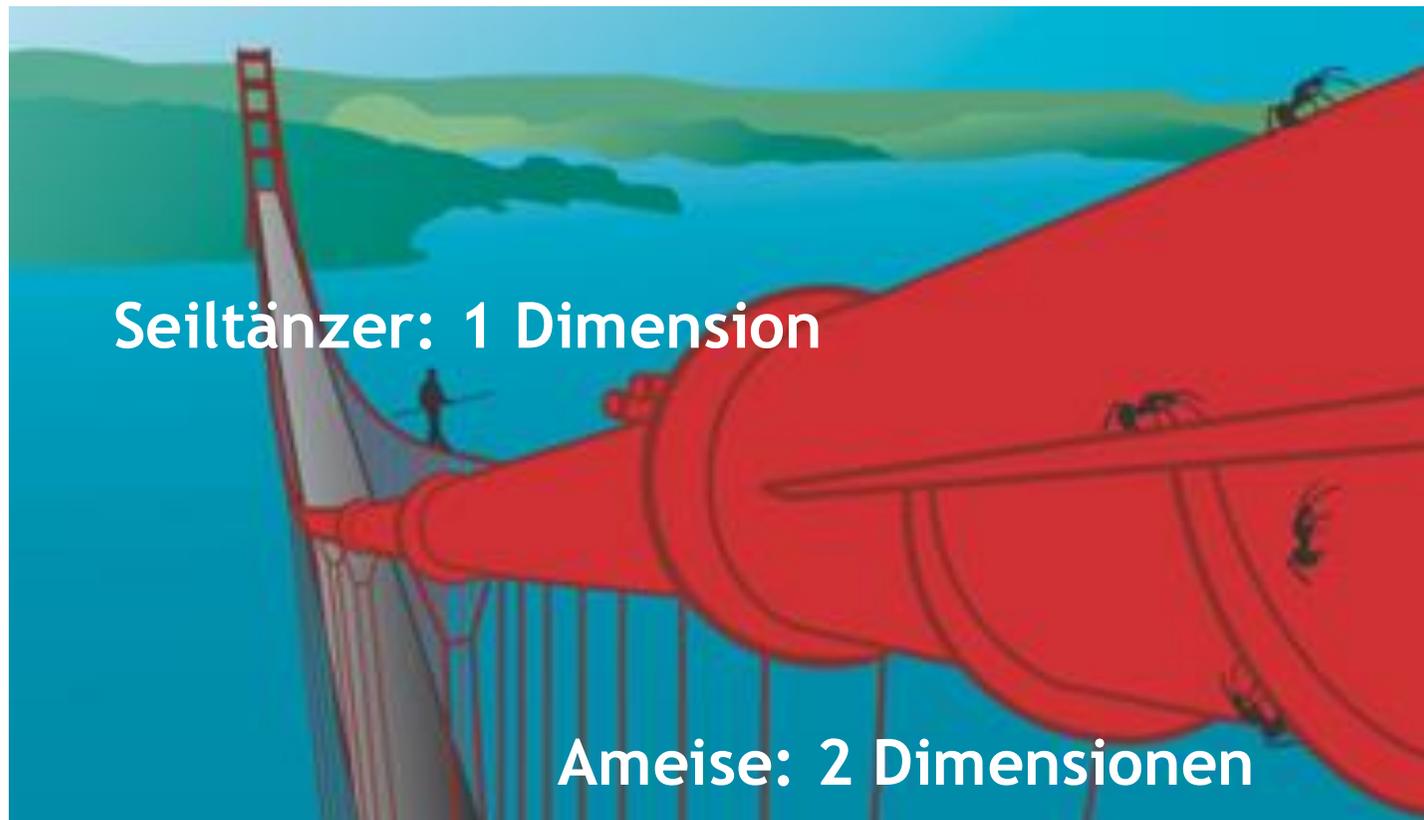
- Bekannte Teilchen leben im 3+1-dimensionalen Universum (Brane)
- **Gravitation lebt in einem höherdimensionalen Universum (Bulk)**
- Extra-Dimensionen sind aufgerollt mit Radius R





Extradimensionen

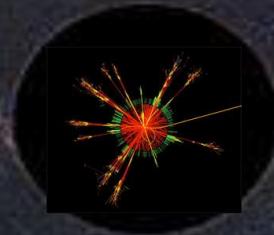
Unser bekanntes Universum: 3 Raumdimensionen + 1 Zeitdimension
Stringtheorie: mindestens 9 + 1 Dimensionen



2. Dimension: aufgerollt

Schwarze Löcher 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.

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.

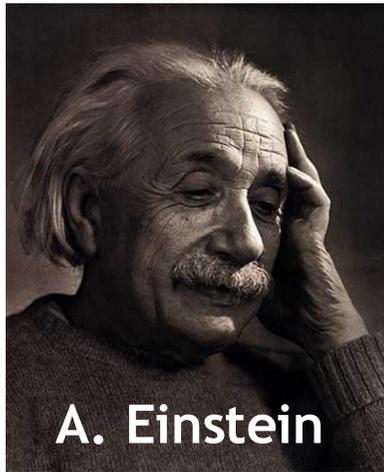
WIR LEBEN IN INTERESSANTEN ZEITEN!

BACKUP



Grundlagenforschung

Sie war stets eine Voraussetzung für technischen Fortschritt!

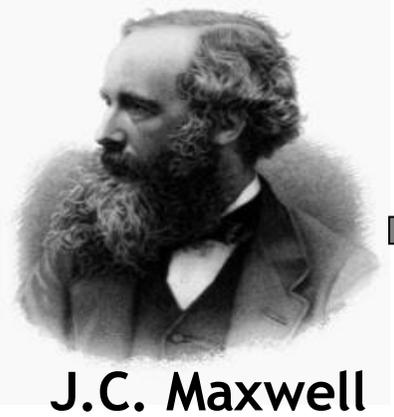


A. Einstein

→ Relativitätstheorie →



100% Grundlagenforschung



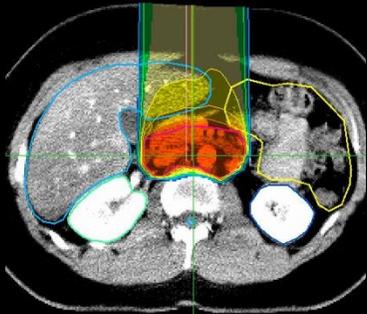
J.C. Maxwell

→ Elektromagnetismus →

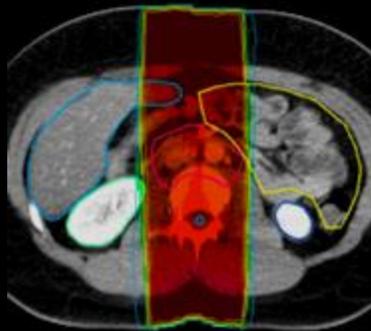




Beschleuniger und Antimaterie



Krebstherapie mit Kohlenstoffionen



Konventionelle
Krebstherapie mit
Photonen

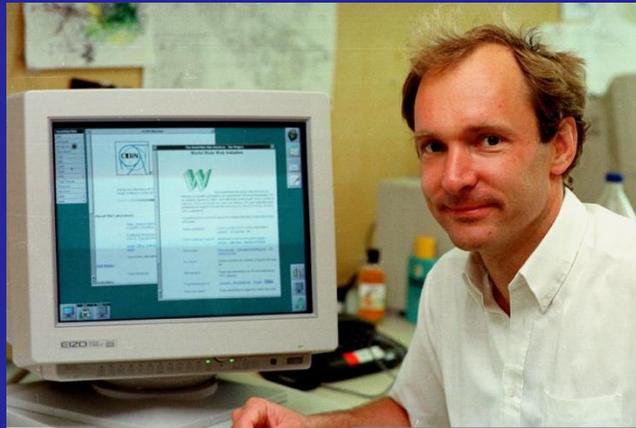


Ca. 9000 der 17000 Beschleuniger weltweit für
medizinische Zwecke

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.

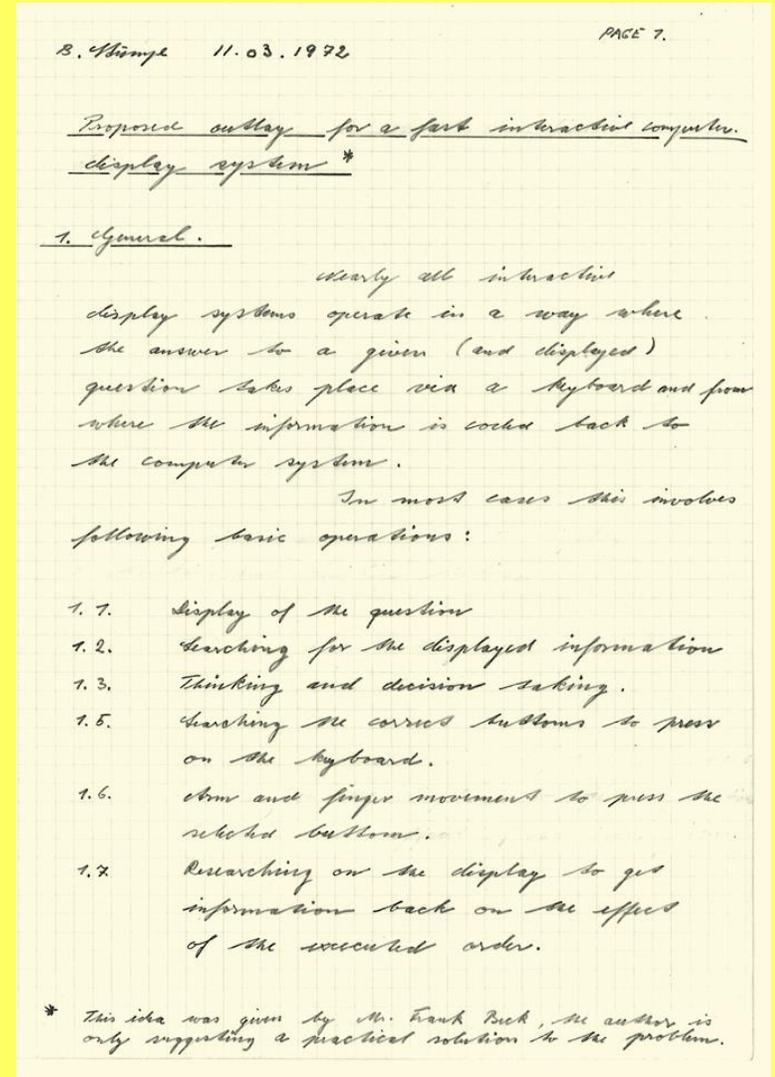
Keywords: Hypertext, Computer conferencing, Document retrieval, Information management, Project control



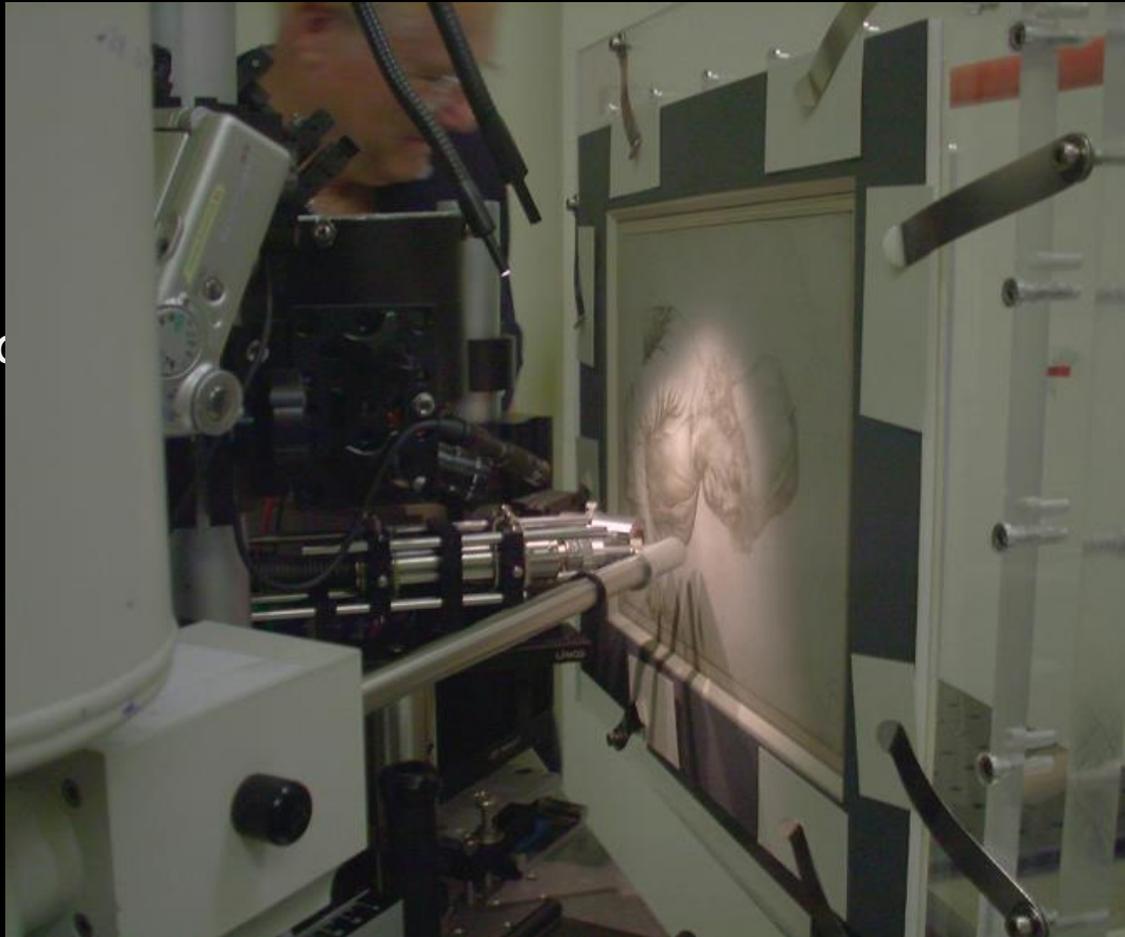
Der erste kapazitive Touchscreen



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!

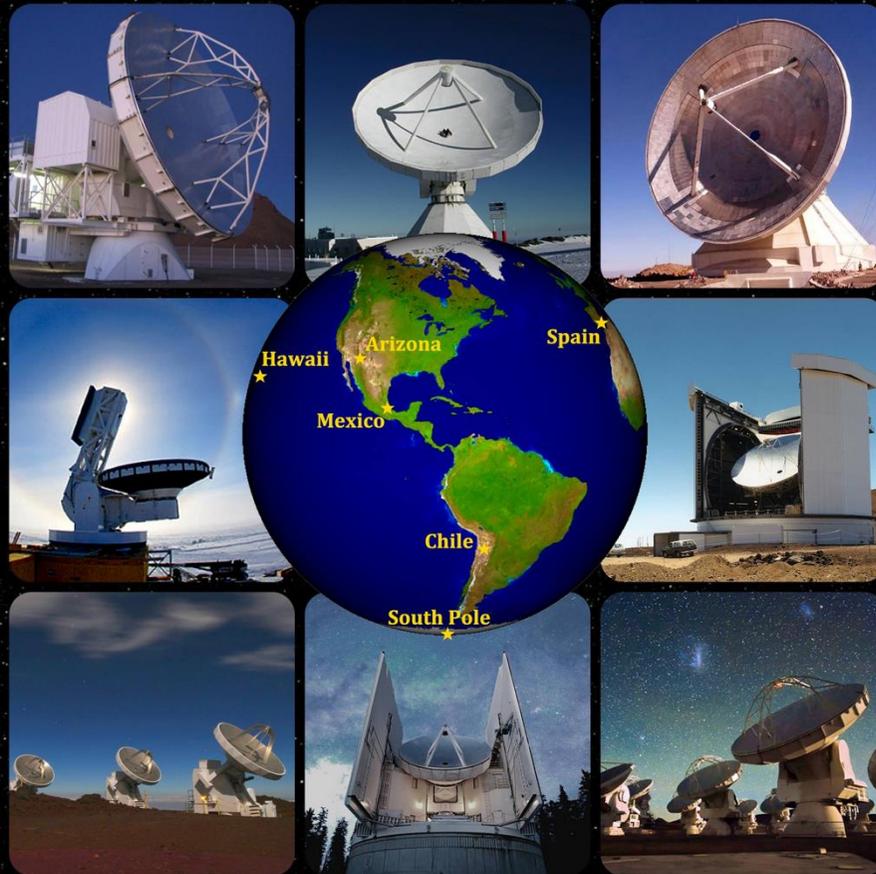


Dürers Vater

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

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

