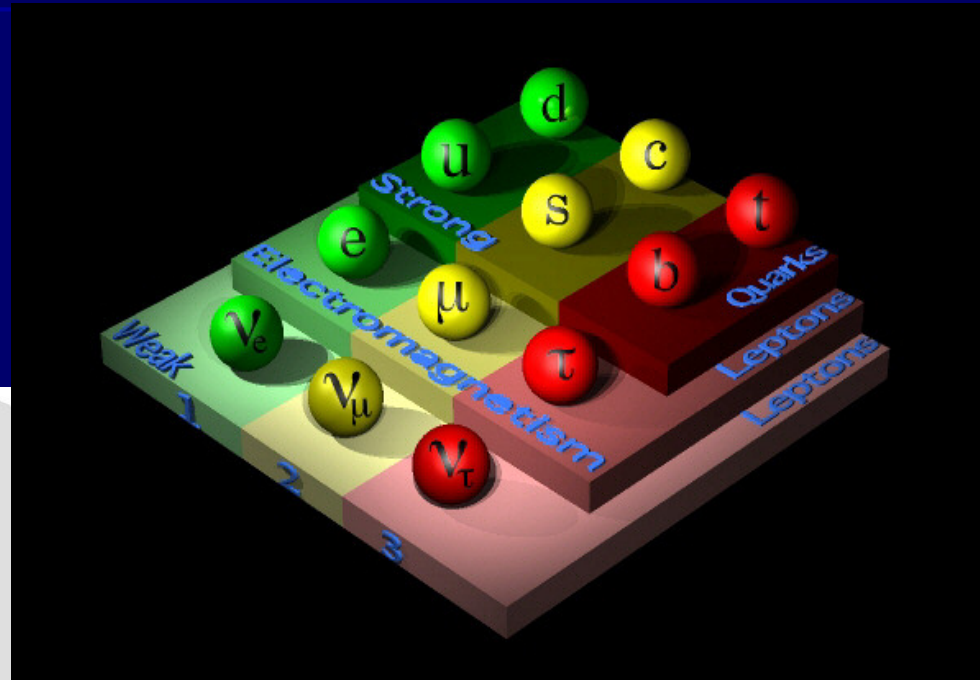
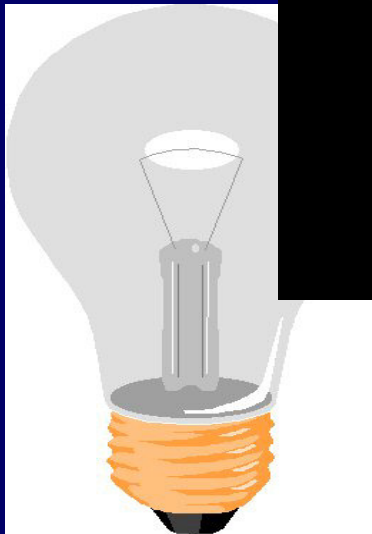


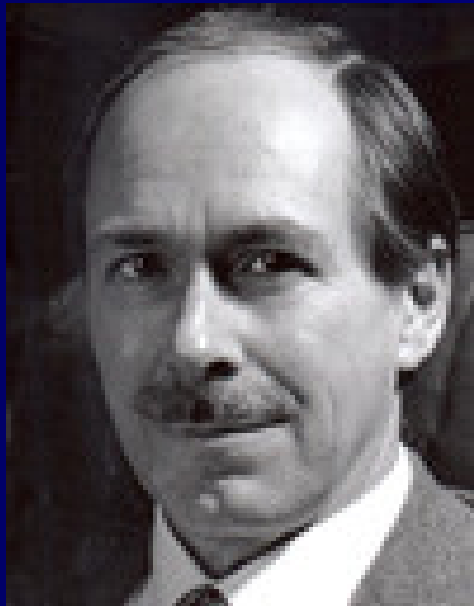
Kräfte zwischen Elementarteilchen: Schweres Licht und starker Leim



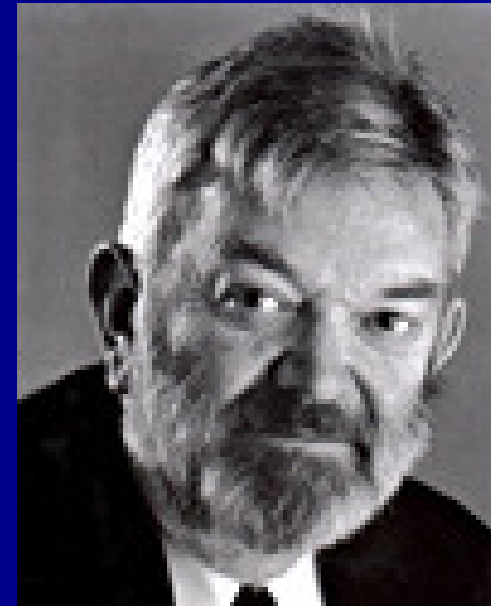
Thomas Trefzger

Nobelpreis in Physik 1999

Gerardus 't Hooft



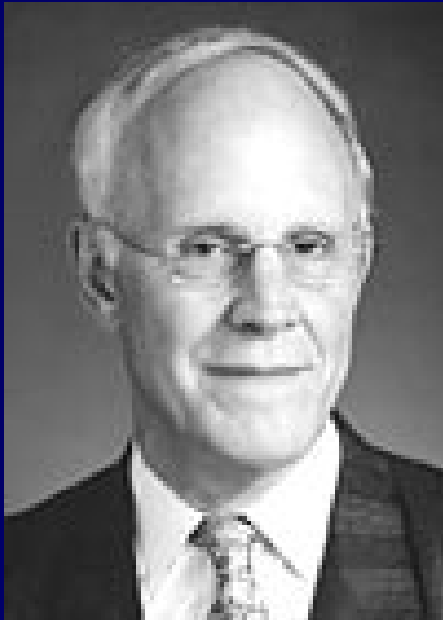
Martinus J.G. Veltman



**Für ihre entscheidenden, die Quantenstruktur
betreffenden Beiträge zur Theorie der
elektroschwachen Wechselwirkung**

Nobelpreis Physik 2004

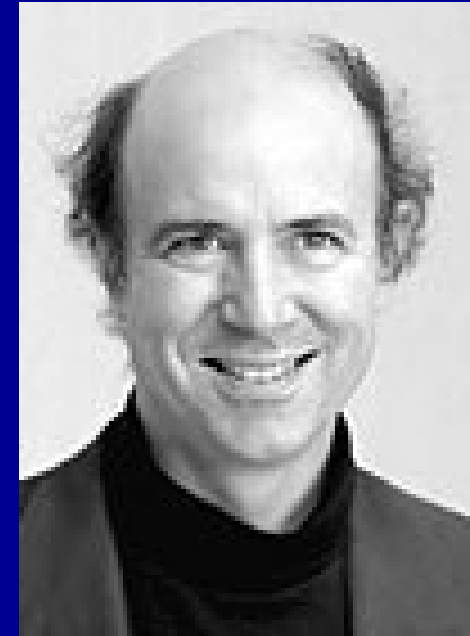
David J. Gross



H. David Politzer



Frank Wilczek

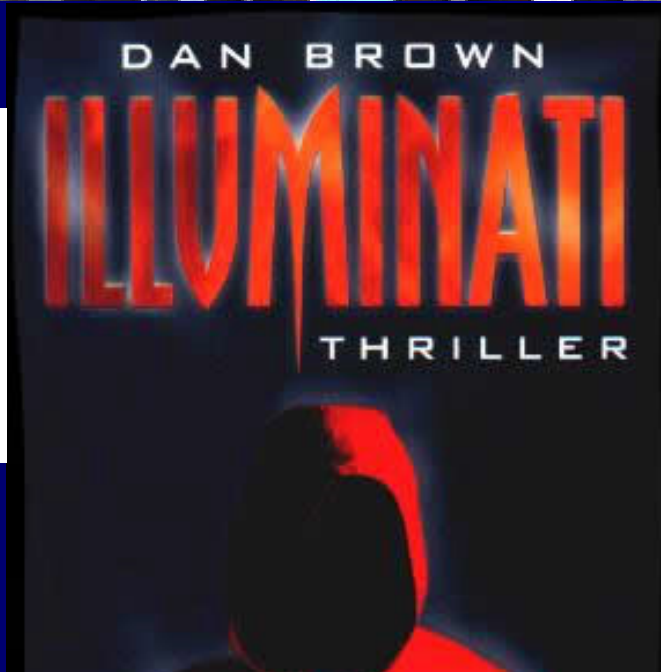
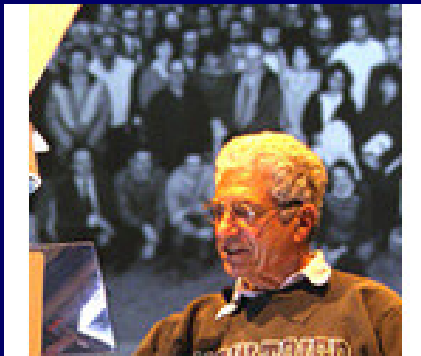


**Für die Entdeckung der asymptotischen Freiheit
in der Theorie der starken Wechselwirkung**

Nobelpreise Teilchenphysik

- 1935 James Chadwick: Entdeckung des Neutrons
- 1936 Victor Hess, Carl Anderson: Entdeckung der kosmischen Strahlung, Entdeckung des Positrons
- 1939 Ernest Lawrence: Erfindung des Zyklotrons
- 1949 Hideki Yukawa: Vorhersage von Mesonen
- 1957 Chen Yang, Tsung Lee: Paritätsgesetze
- 1958 Pawel Tscherenkow, Ilja Frank, Igor Tamm: Cherenkoeffekt
- 1959 Emilio Segre, Owen Chamberlain: Entdeckung des Antiprotons
- 1960 Donald Glaser: Entwicklung der Blaskammer
- 1969 Murray Gell-Mann: Klassifizierung von Elementarteilchen
- 1976 Burton Richter, Samuel Ting: Entdeckung des c-Quarks
- 1979 Sheldon Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg: Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung
- 1980 James Cronin, Val Fitch: CP-Verletzung bei Kaonen
- 1984 Carlo Rubbia, Simon van der Meer: Entdeckung von W,Z-Bosonen
- 1988 Leon Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger: Entdeckung des Myon-Neutrinos
- 1990 Jerome Friedman, Henry Kendall, Richard Taylor: Elektron-Proton-Streuung
- 1992 Georges Charpak: Entwicklung der Vieldrahtproportionalkammer
- 1995 Martin Perl, Frederick Reines: Entdeckung des Tau-leptons und des Neutrinos
- 1999 Gerardus t'Hooft, Martinus Veltman: Beschreibung der elektroschwachen Theorie
- 2002 Raymond Davis, Masatoshi Koshiba: Entdeckung von Neutrino-Oszillationen
- 2004 David Gross, H. David Politzer, Frank Wilczek: Theorie der starken Wechselwirkung

Nobelpreisträger am CERN



Die Idee des WWW wurde am CERN geboren

- 1989 hatte Tim Berners-Lee die Idee des World Wide Web

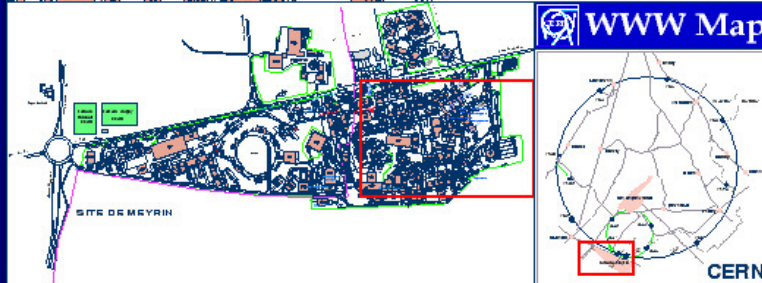
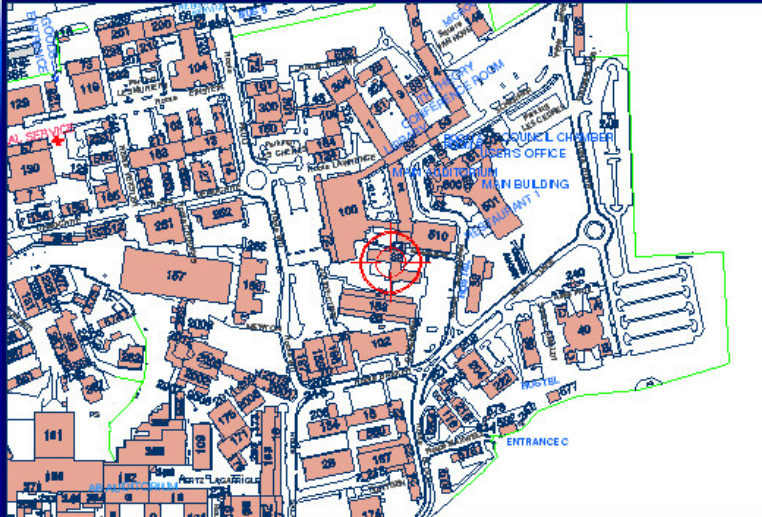


CERN ist (k)eine Schweizer Organisation

- CERN wurde 1954 gegründet
- 20 europäische Mitgliedsstaaten
- European Organisation for Nuclear Research

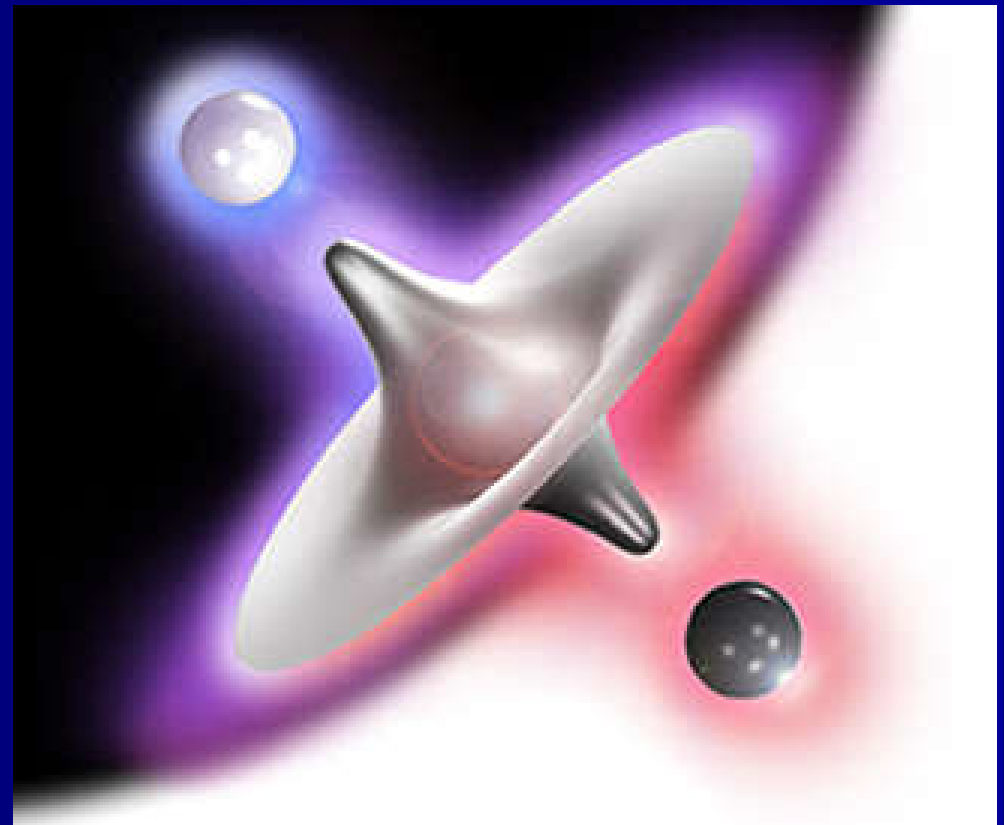


CERN ist ein Campus mit modernen Gebäuden

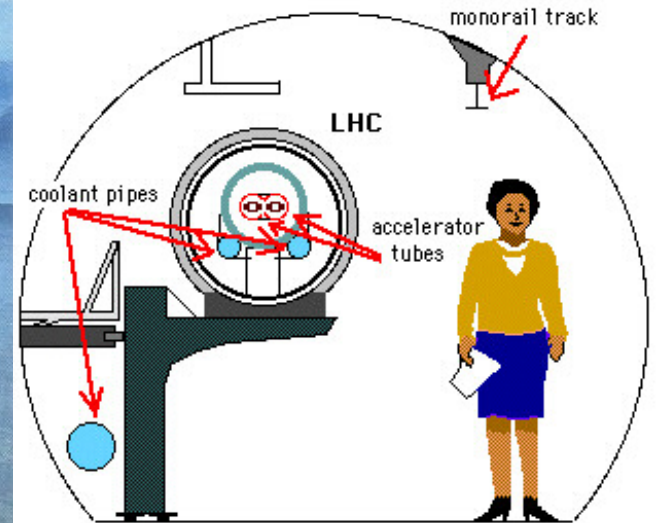


Produktion von Antimaterie

- 9 Antiwasserstoffatome am CERN 1995
- 10.000 in 2002
- Produktion von 1 g Antiwasserstoff dauert Milliarden Jahre !

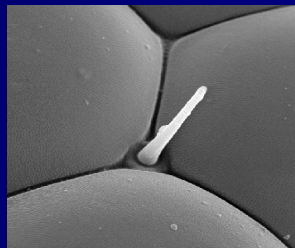
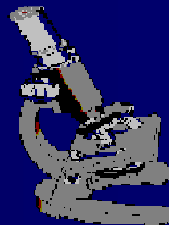
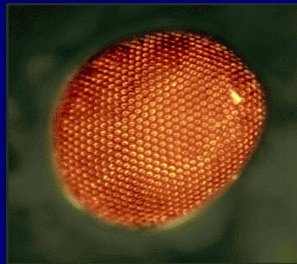


Riesentunnel am CERN





Experimentieren !

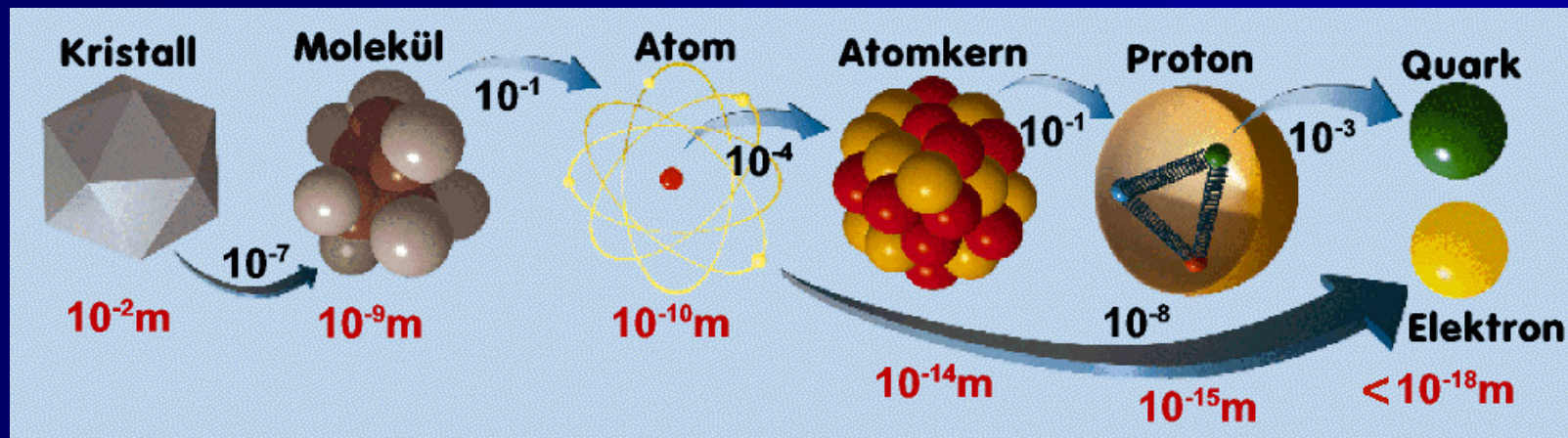


- **bloßes Auge: $\sim 1\text{mm}$**
- **Auge plus Lupe:
 $\sim 1/10\text{ mm}$
10 fach
vergrößert**
- **Auge und Mikroskop:
 $1\ \mu\text{m}$ (Mikrometer)
1000 fach vergrößert**

→ Immer noch keine Bausteine sichtbar

→ Wie groß sind die eigentlich ?

Aufbau der Materie

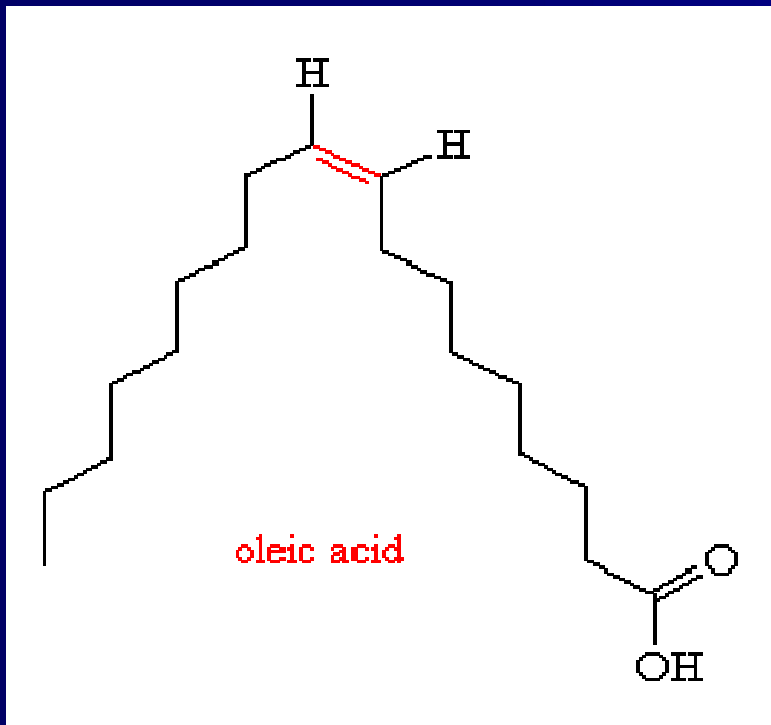


Auge

Elektronenmikroskop

Hochenergetische
Teilchenstrahlung

Messung der Größe eines Ölsäure Moleküls



- ◇ → Anzahl der Moleküle:
~ $10^{16} = 10.000.000.000.000.000$

- Löse 0.6ml Ölsäure in 1l Alkohol
→ 0.06%ige Lösung
- Verteile 1 Tropfen (ca 0.02 ml) auf Wasseroberfläche
- → Volumen der Ölsäure:
 $1.2 * 10^{-11} \text{ m}^3 = (0,23 \text{ mm})^3$
- → monomolekulare Schicht
- Molekülgröße =
Volumen / Oberfläche

Wie kann man $0.001 \mu\text{m}$ „sehen“?

- Was heisst überhaupt „sehen“ ?

- Sehen = Abbilden

- Wurfgeschosß (Projektile)

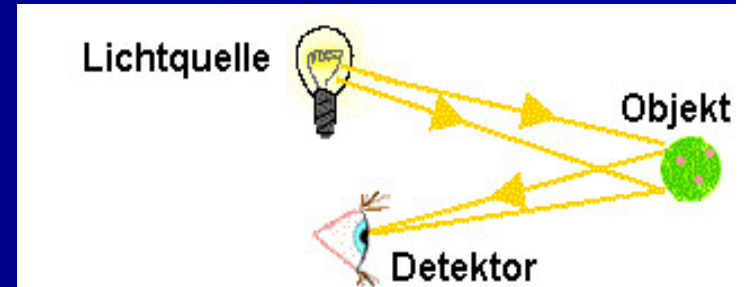
→ Zielobjekt → Nachweis (Detektor)

- ◇ Wichtig: „Auflösungsvermögen“:
Fähigkeit, Strukturen einer bestimmten Größe zu erkennen

- ◇ Dazu nötig:

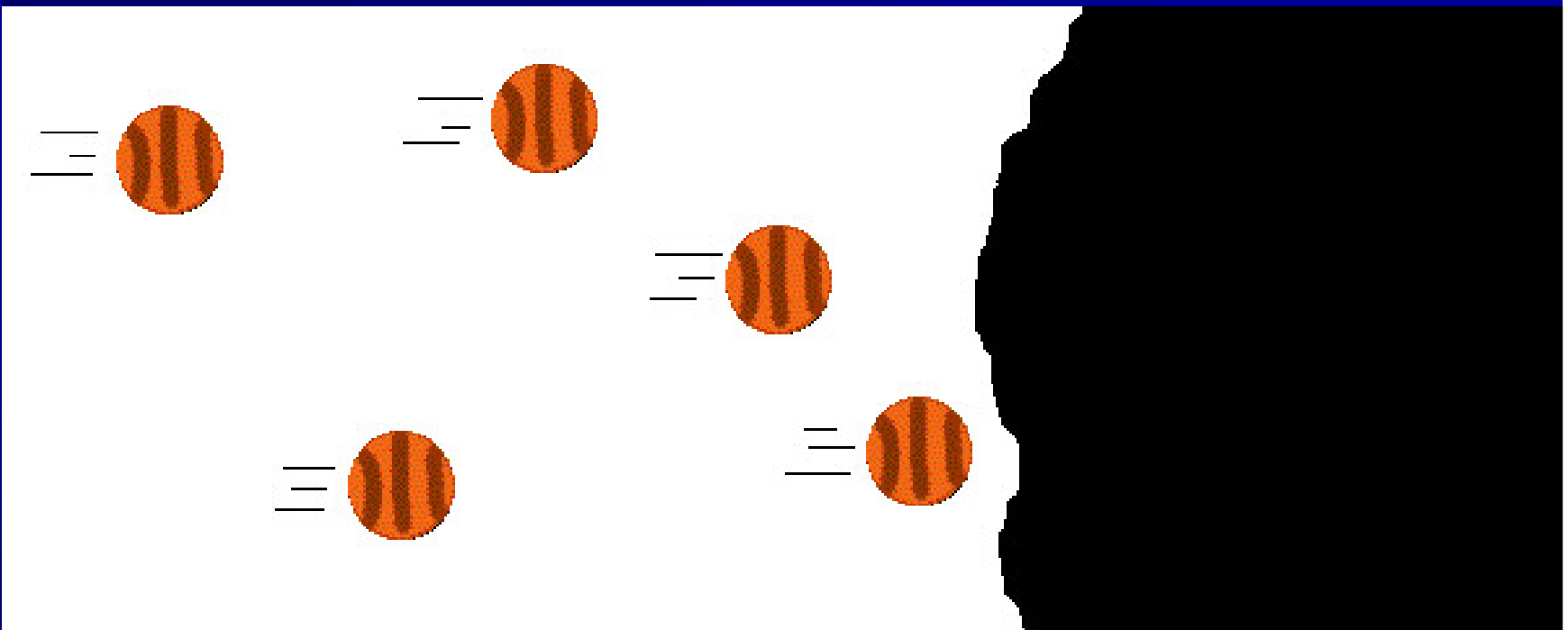
1. Größe der Projektile \ll Größe der Strukturen

2. Treffgenauigkeit \ll Größe der Strukturen



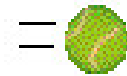
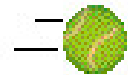
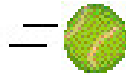
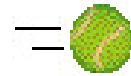
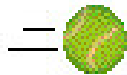
Unbekanntes Objekt in einer Höhle

- Projektil: Basketbälle



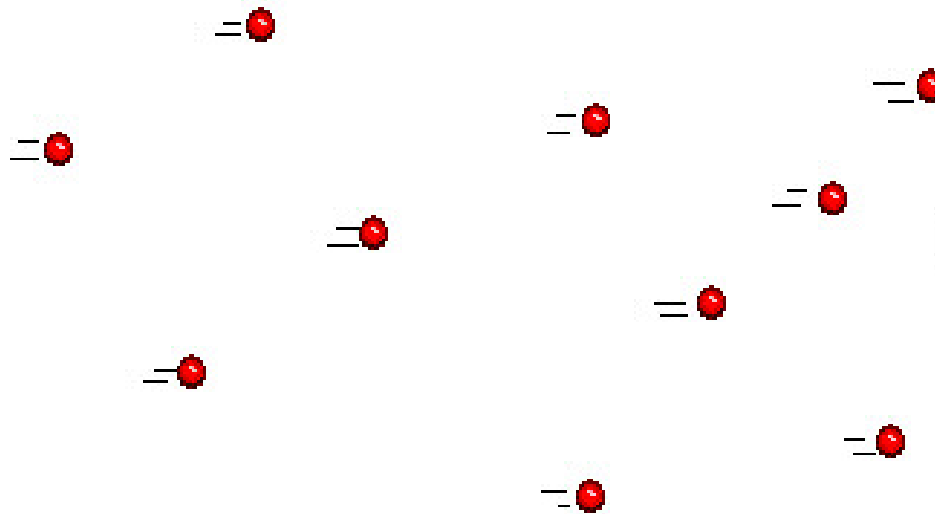
Unbekanntes Objekt in einer Höhle

- Projektil: Tennisbälle



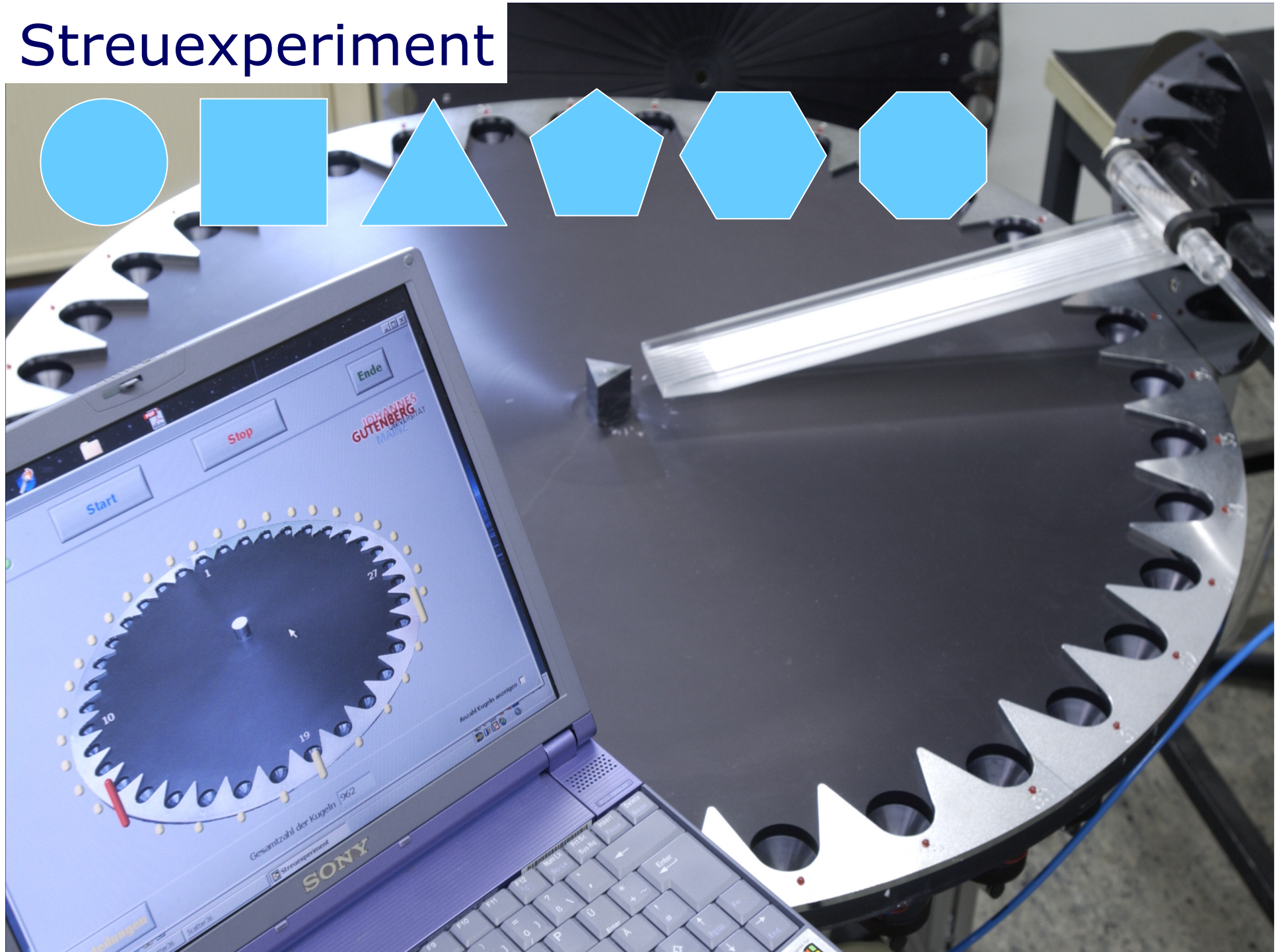
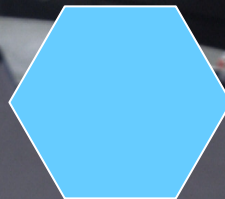
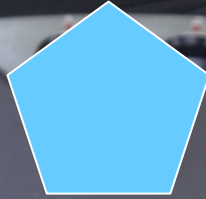
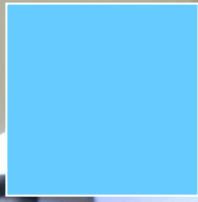
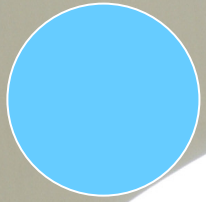
Unbekanntes Objekt in einer Höhle

- Projektil: Murmeln



...Nichts wie weg !

Streuexperiment



Einschub: nützliche Einheiten für Teilchen

■ Größe:

1 fm = 1 Femtometer („Fermi“) = 10^{-15} m
(1 μm = 1.000.000.000 fm)

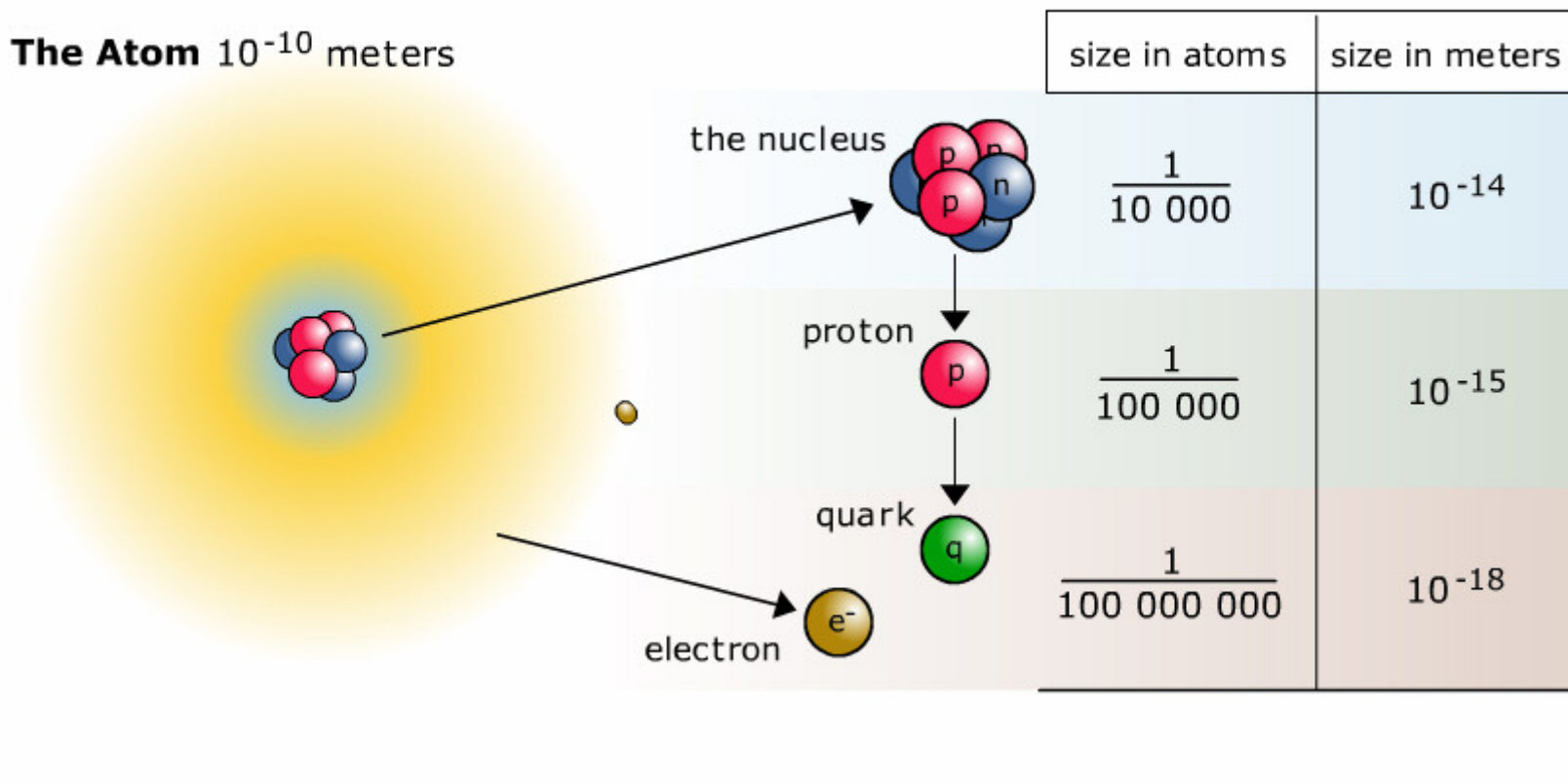
◇ Energie:
1 ElektronVolt = 1 eV

1 KiloElektronVolt = 1 keV = 1000 eV
1 MegaElektronVolt = 1 MeV = 1.000.000 eV
1 GigaElektronVolt = 1 GeV = 1.000.000.000 eV

◇ 1 GeV: „viel“ für ein Teilchen, aber makroskopisch winzig:
könnte Taschenlampe (1,6 Watt) für ganze
0,000.000.0001 Sekunden zum Leuchten bringen

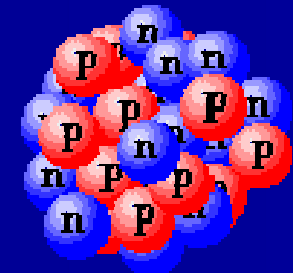
Aufbau eines Atoms

The Atom 10^{-10} meters



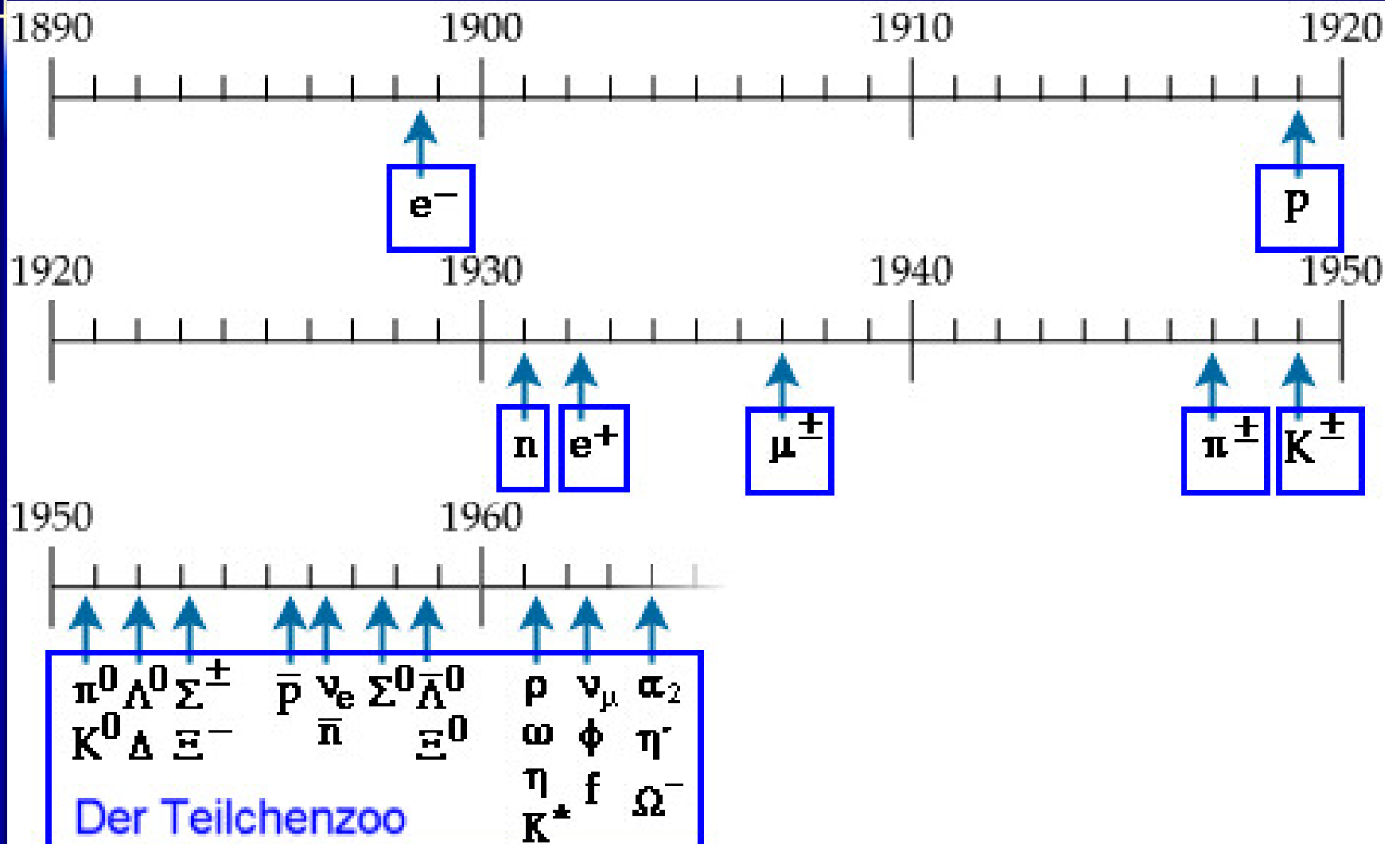
Die Struktur des Atoms

- 1911 Rutherford: Heliumkerne auf Goldfolie, Atomdurchmesser: 100.000 fm
Harter Kern: 5 fm
(Kern : Atom) wie (Kirsche : Fußballfeld)
- 1919 Rutherford: Heliumkerne auf Stickstoff
→ Beobachtung einzelner Protonen
- 1932 Chadwick: Heliumkerne auf Beryllium
→ Beobachtung einzelner Neutronen



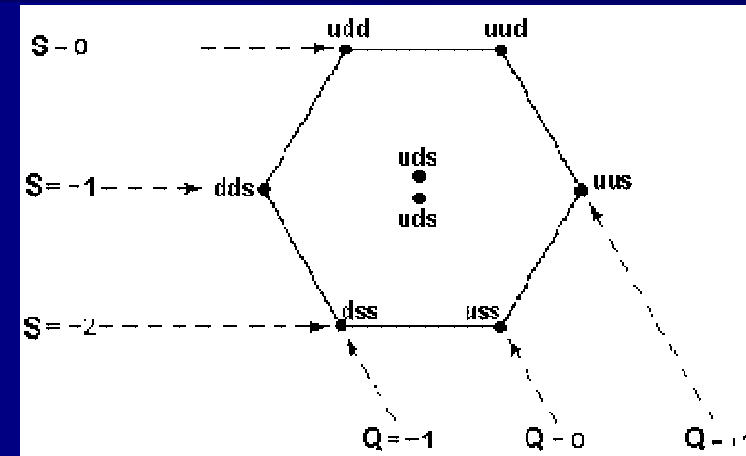
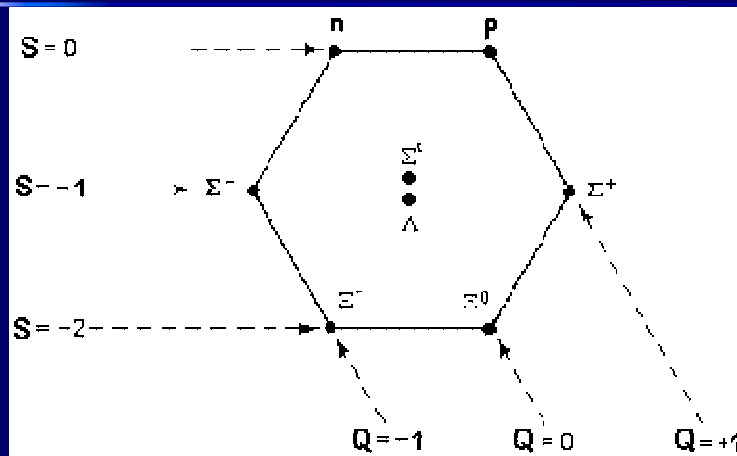
- ◇ *kleiner Atomkern aus Protonen und Neutronen*
- ◇ *umgeben von riesiger Elektronenhülle*

Der Teilchenzoo



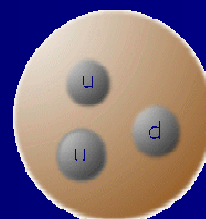
Protonen und Neutronen sind nicht elementar!

- Indirekte Hinweise: z.B. Ordnungsschema (60er Jahre)

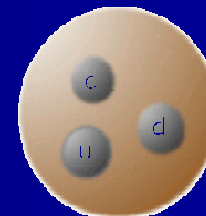


- **Direkter Beweis: Beschuss mit Elektronen → Quarks**
1970: Stanford, Kalifornien; seit 1989: DESY, Hamburg

Proton



Neutron



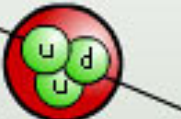
1
fm

Einführung von Quarks

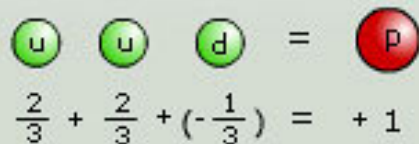
- Gell-Mann (Nobelpreis 1969)
- Quarks als Elementarteilchen
- Ladung $-1/3, 2/3$
- ...noch nie frei gesehen...

the proton

up quark
charge =
 $+\frac{2}{3}$




down quark
charge = $-\frac{1}{3}$

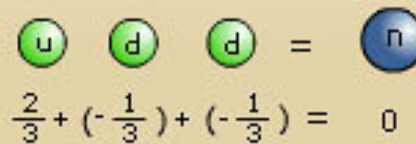


the neutron

up quark
charge =
 $+\frac{2}{3}$

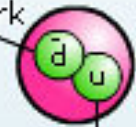


down quark
charge = $-\frac{1}{3}$

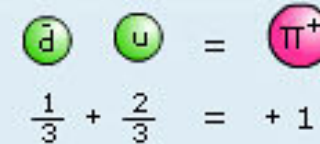


the pion

down anti quark
charge =
 $+\frac{1}{3}$

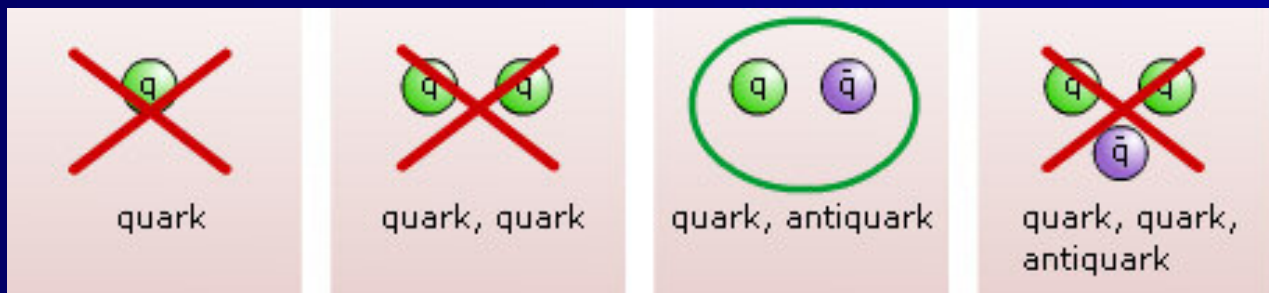
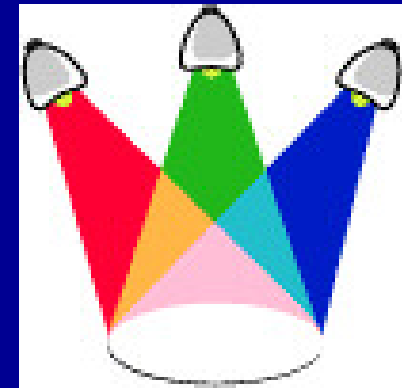


up quark
charge = $+\frac{2}{3}$



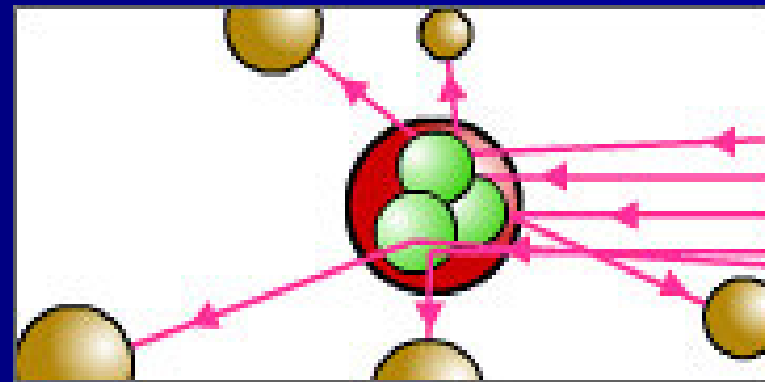
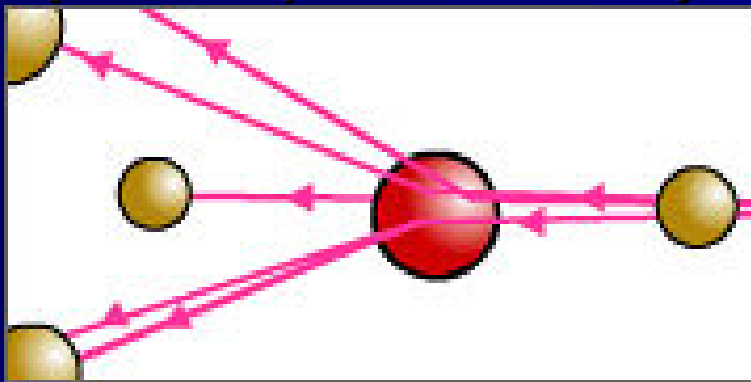
Einführung von Farbladung

- Quarks haben Farbladung
- 3 Farben (rot, grün, blau)
- Nur farblose Teilchen



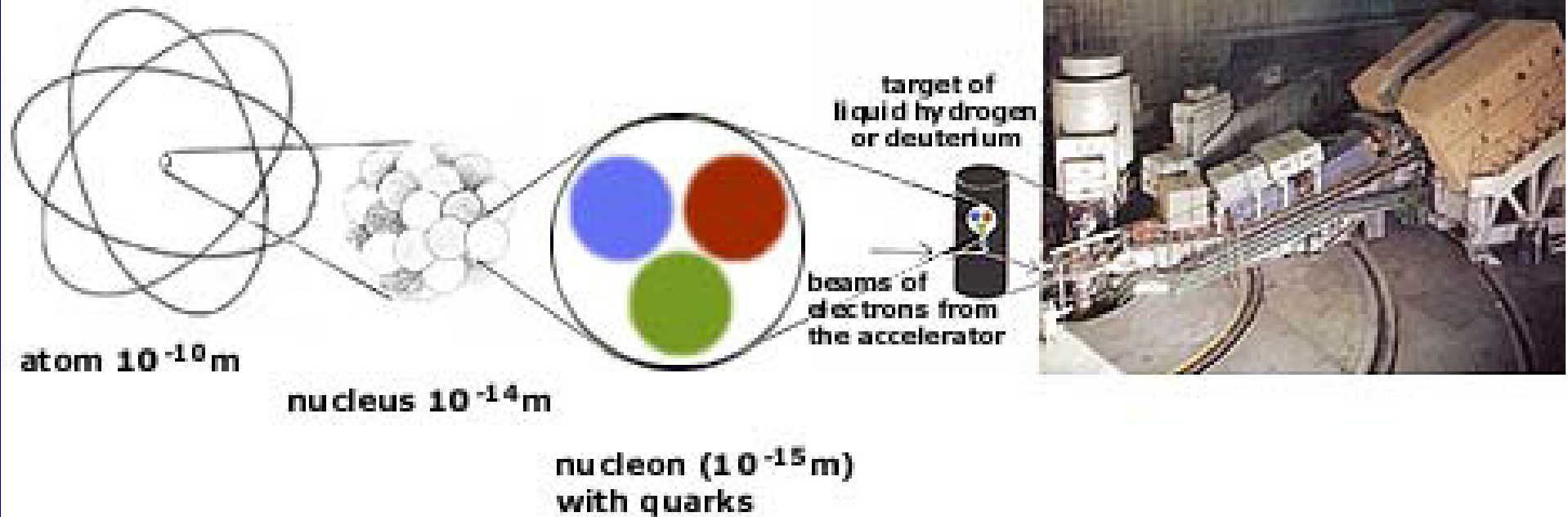
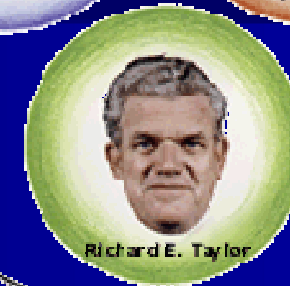
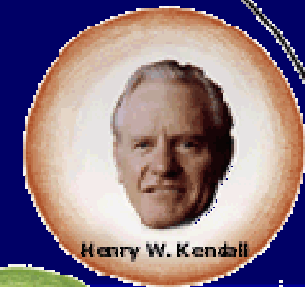
Kann man Quarks sehen ?

- Friedman, Kendall, Taylor
(Nobelpreis 1990)
- Ähnlich wie Rutherford
(Nobelpreis 1908)

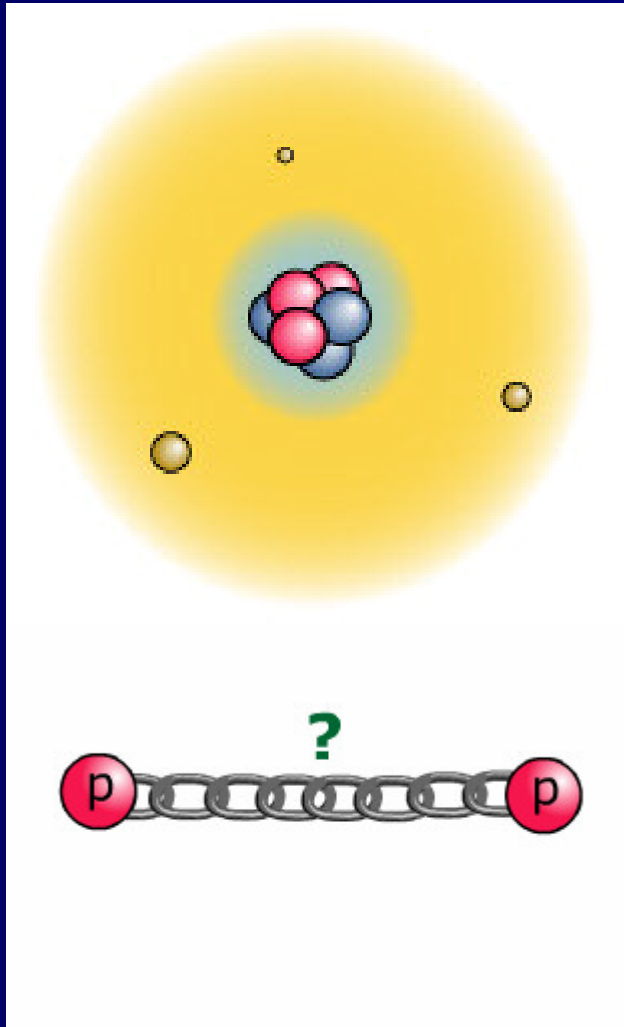


Streuexperiment

- Nobelpreis 1990

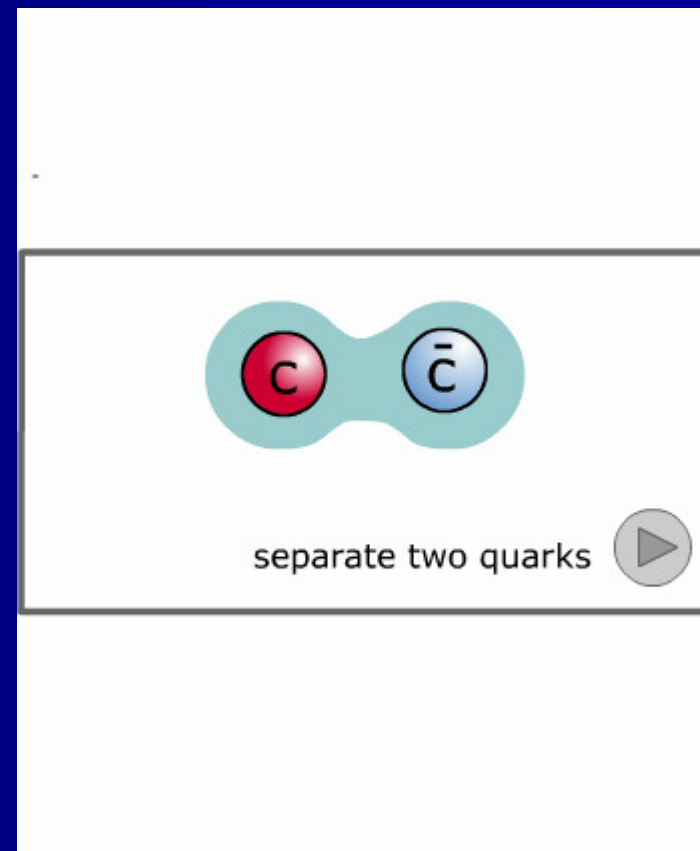
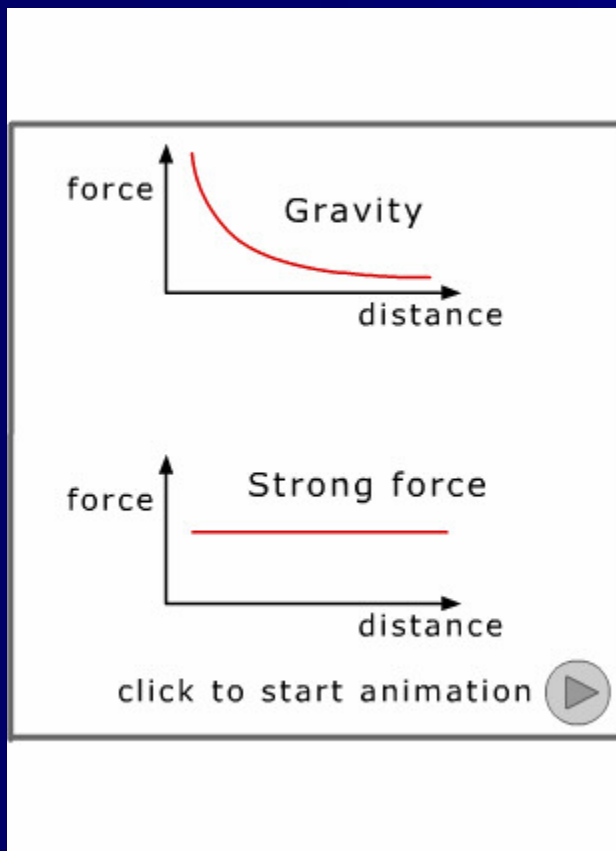


Was hält den Kern zusammen ?



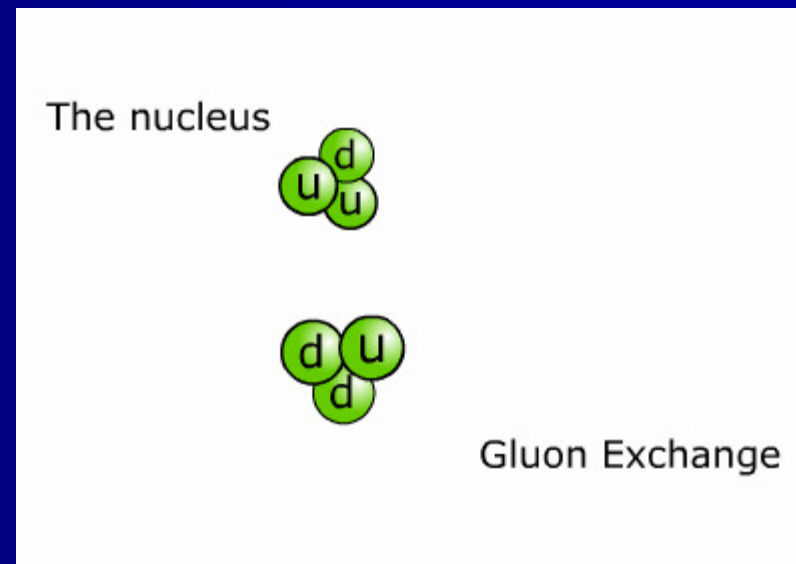
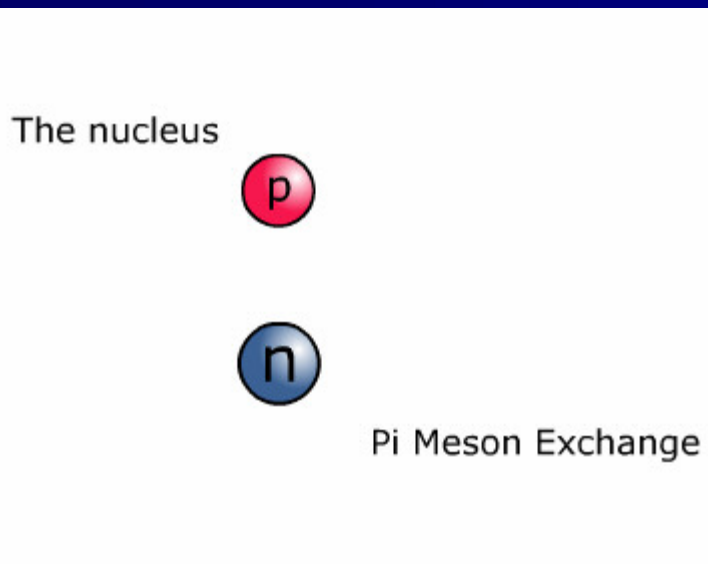
- Kern besteht aus Proton und Neutron (NP 1935, Chadwick)
- Wolke aus Elektronen (NP Thomson, 1906)
- Experimente mit Beschleunigern

Quark haben Hausarrest (confinement)



Erklärung der starken Kraft

- Yukawa (NP 1949)
- Austausch durch Pionen
- Austausch durch Gluonen



Standardmodell braucht viertes Quark

- S.Ting und B.Richter (Nobelpreis 1976)
- Entdeckung des charm-Quarks



J/Psi-Teilchen

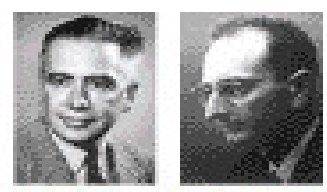
- Entdeckung des bottom-Quarks
durch L.Lederman (Nobelpreis 1988)





1955 Entdeckung des Antiprotons

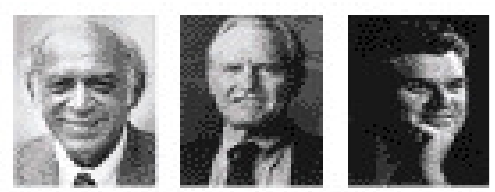
The Nobel Prize in Physics 1959



Segrè Chamberlain

1969 Innere Struktur des Nukleons

The Nobel Prize in Physics 1990



Friedman Kendall Taylor

1974 Entdeckung des J/Psi-Teilchens (c-Quark)

The Nobel Prize in Physics 1976



Richter Ting

1976 Entdeckung des Tau-Leptons

The Nobel Prize in Physics 1995



Perl

1983 Entdeckung des W-Bosons und des Z-Bosons

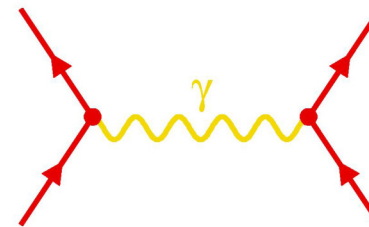
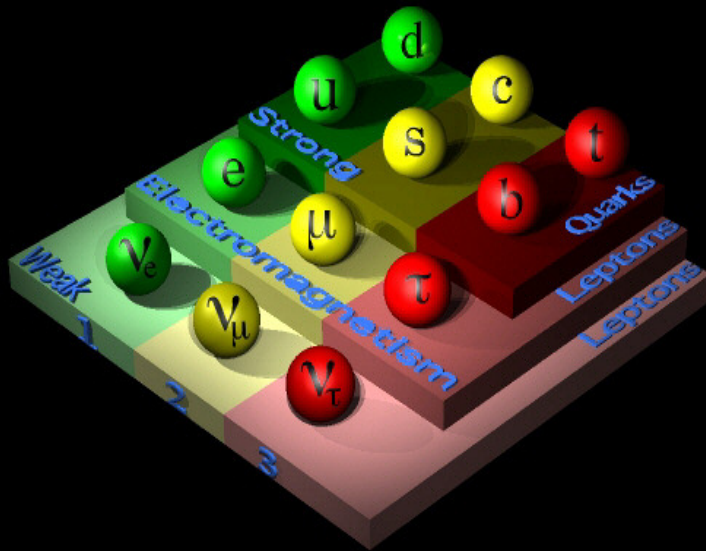
The Nobel Prize in Physics 1984



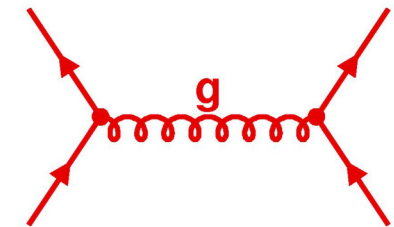
Rubbia van der Meer

1995 Entdeckung des Top-Quarks

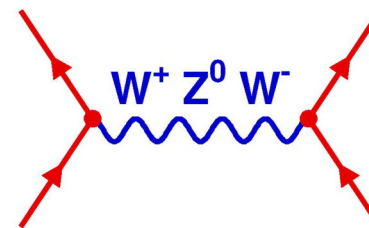
Das Standardmodell



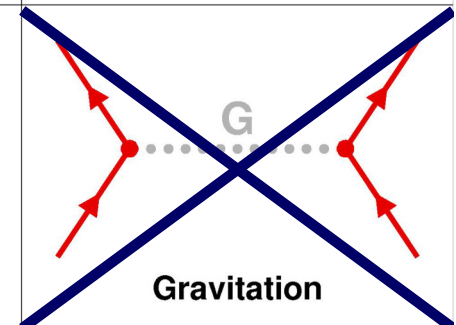
elektromagn. Kraft



starke Kraft



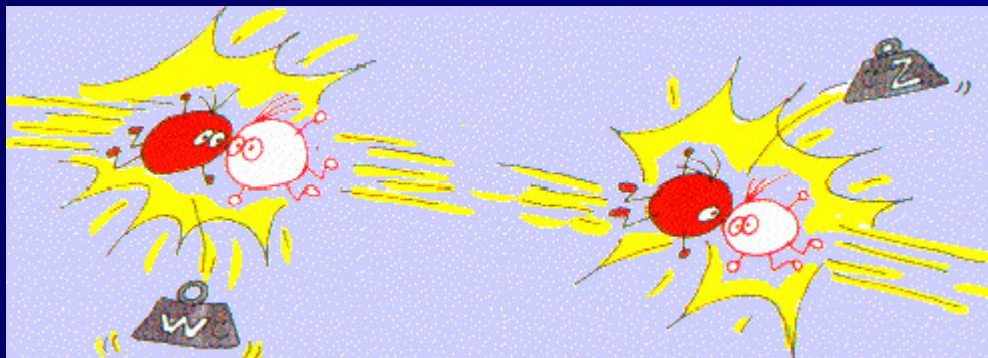
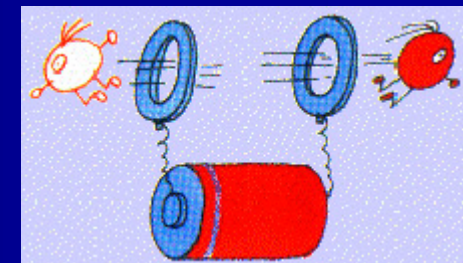
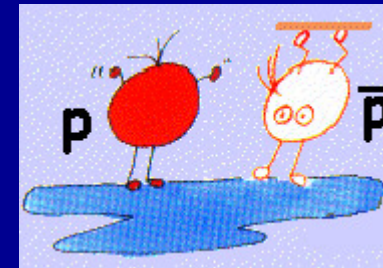
schwache Kraft



Gravitation

Antimaterie

- Zu jedem Bausteinteilchen existiert ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungsvorzeichen
- Sonst sind alle Eigenschaften (Masse, Lebensdauer) gleich
- Aus Botenteilchen können paarweise Materie- und Antimaterieteilchen entstehen
- Umgekehrt können sich diese wieder zu Botenteilchen (Energie) vernichten



Konzept der Wechselwirkungen

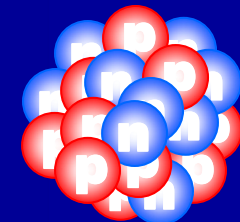
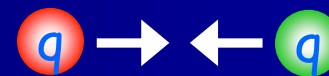
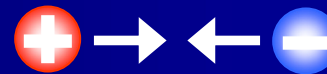
◇ 4 fundamentale Wechselwirkungen

– Gravitation (Schwerkraft)

– Elektromagnetismus

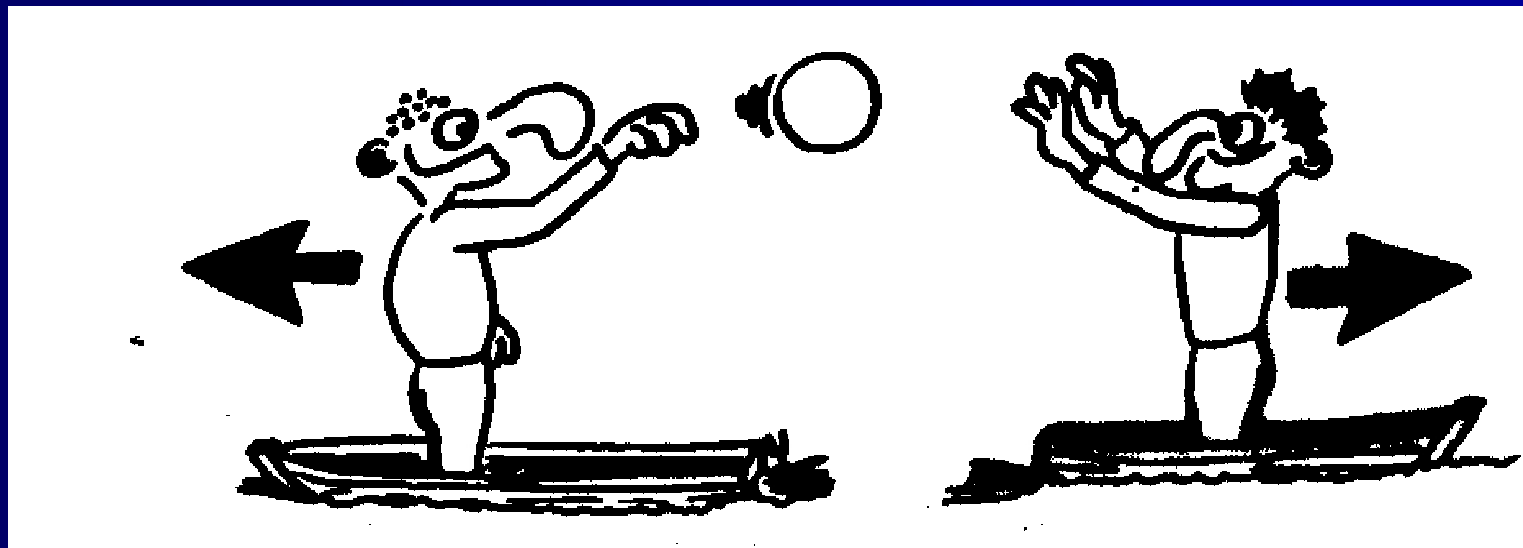
– Schwache Wechselwirkung

– Starke Wechselwirkung



Prinzip von Kraftwirkungen

- Zu jeder **Wechselwirkung** gehört eine **Ladung**
- Nur Teilchen mit entsprechender Ladung spüren Wechselwirkung
- Wechselwirkung erfolgt über Austausch von **Botenteilchen**



Was ist eigentlich eine Ladung?

- Eine *Fundamentale Eigenschaft* eines Teilchens
- Ladungen sind *Additiv*:
 $\text{Ladung}(A+B) = \text{Ladung}(A) + \text{Ladung}(B)$
- Ladungen kommen nur in Vielfachen einer *kleinsten Ladungsmenge* vor
- Ladung ist *erhalten*,
d.h. sie entsteht weder neu, noch geht sie verloren



Mehr wissen wir (noch) nicht

Die elektromagnetische Kraft

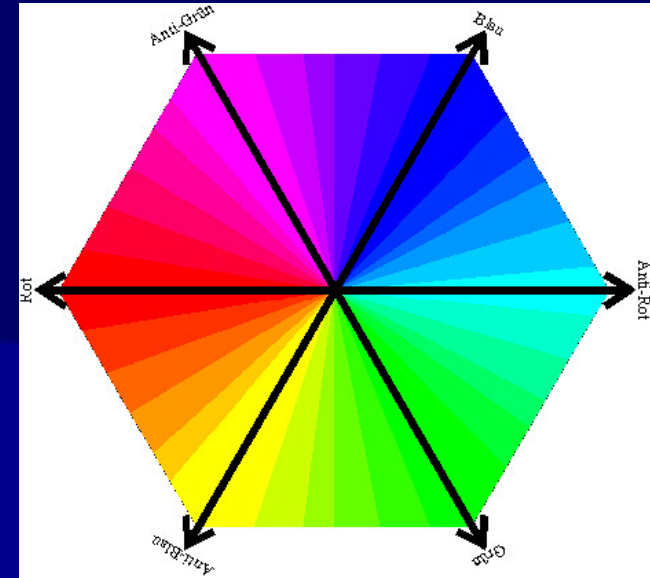
- *Ladung*: elektrische Ladung Q
- *Arten*: 1 Ladungsart: „Zahl“, positiv oder negativ
- *Botenteilchen*: Photon
- *Eigenschaften*: elektrisch neutral: $Q=0$
masselos : $m=0$
- Teilchen Ladung

Up	Down	Neutrino	Elektron
+2/3	-1/3	0	-1

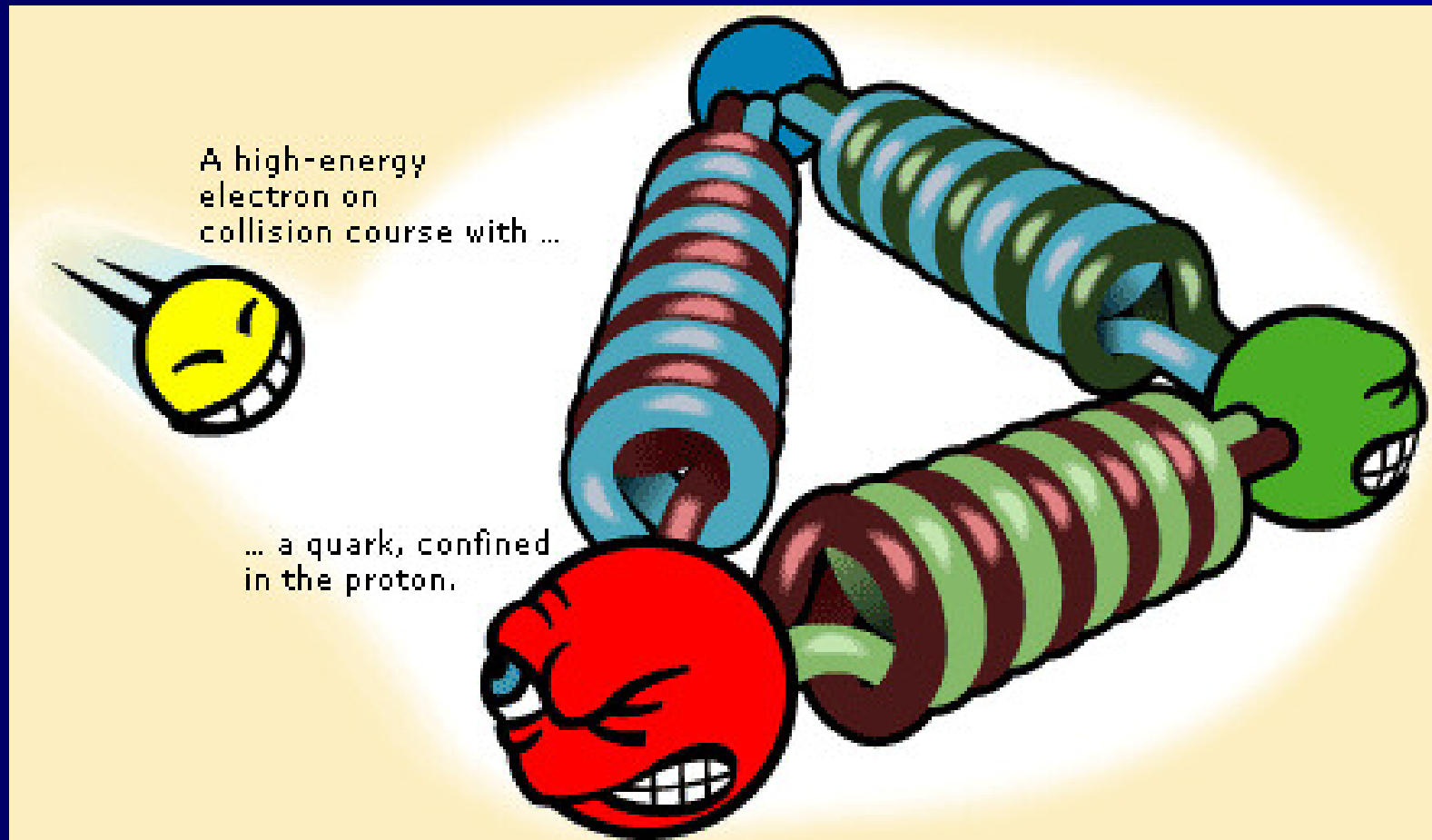
- Besonderheiten:
 - Unendliche Reichweite
 - Makroskopisch beobachtbar
 - Magnetfelder lenken elektrisch geladene Teilchen ab, umso weniger je höher deren Energie ist

Die starke Kraft

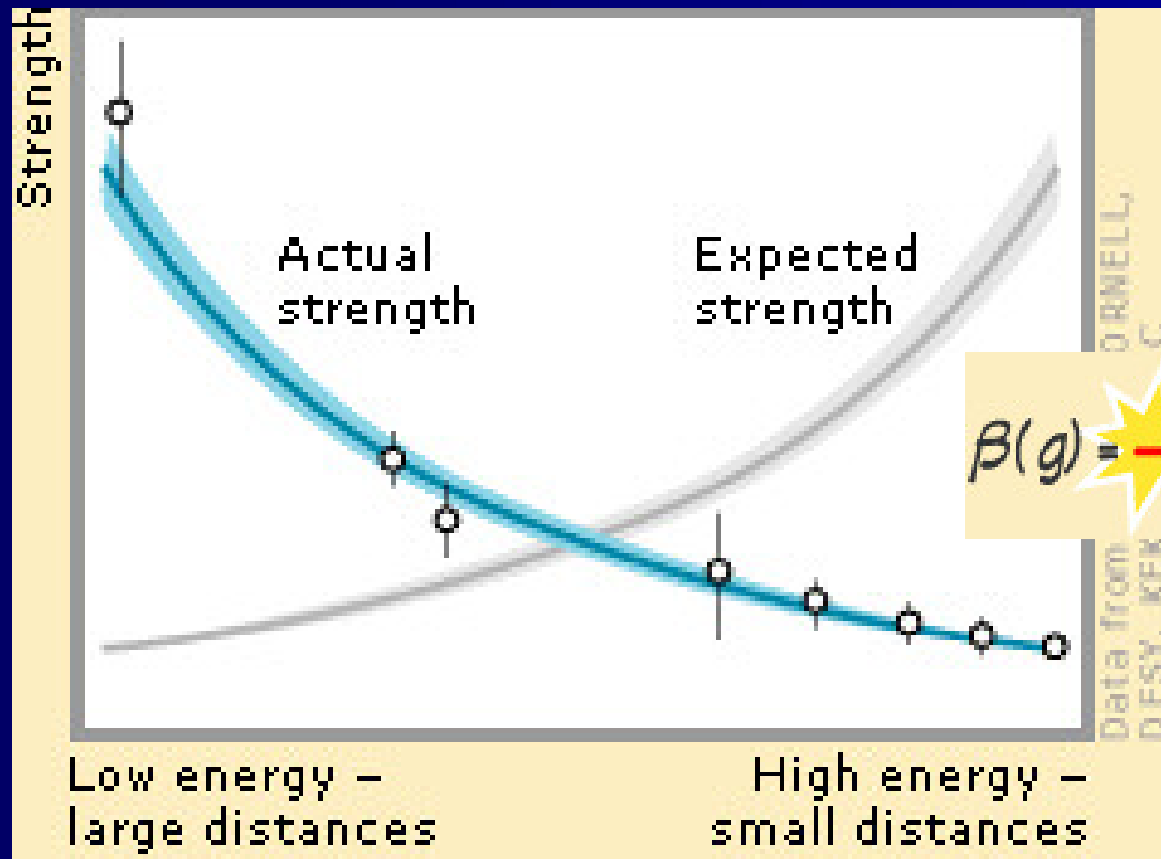
- *Ladung*: starke Ladung
- *Arten*: 3 Ladungsarten: „Farbe“, plus jeweilige Antifarbe
- *Botenteilchen*: 8 Gluonen
- *Eigenschaften*: tragen selber je 1 Farbe und Antifarbe
masselos : $m=0$
- Teilchen Up Down Neutrino Elektron
Ladung r, b, g r, b, g - -
- Besonderheiten:
 - Endliche Reichweite ca 1 fm
 - Hält p, n und Atomkern zusammen
 - Makroskopisch nicht beobachtbar, außer radioaktiver Zerfall



Die starke Kraft



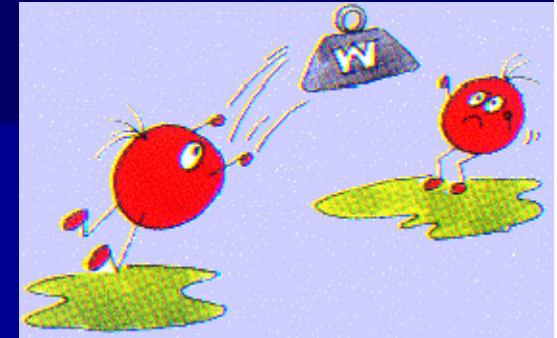
Nobelpreis 2004 (QCD)



$$\beta(g) = -\frac{g^3}{16\pi^2} \left(\frac{11}{3} N_C - \frac{4}{3} \frac{N_F}{2} \right)$$

Die schwache Kraft

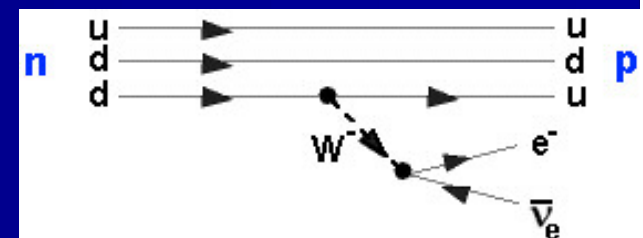
- **Ladung:** schwache Ladung (I_1, I_2, I_3)
- **Arten:** 1 Ladungsart: „Zahlentriplett“
- **Botenteilchen:** W^-, Z^0, W^+
- **Eigenschaften:** tragen selber schwache Ladung: $I_3 = -1, 0, 1$



Masse: $m = 80 - 90 \text{ GeV}$

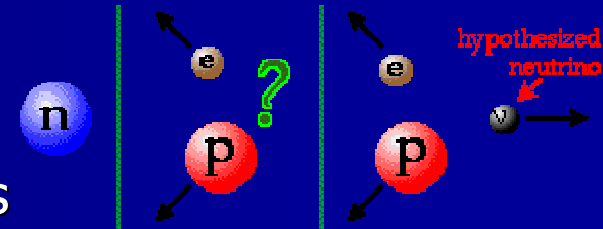
- Teilchen

Up	Down	Neutrino	Elektron
I_3	$+1/2$	$-1/2$	$+1/2$
			$-1/2$
- Besonderheiten:
 - Endliche Reichweite ca 0.0025 fm
 - Makroskopisch nicht beobachtbar, außer
 - Brennen der Sonne
 - Radioaktiver Zerfall des Neutrons
 - Zerfall des Myons

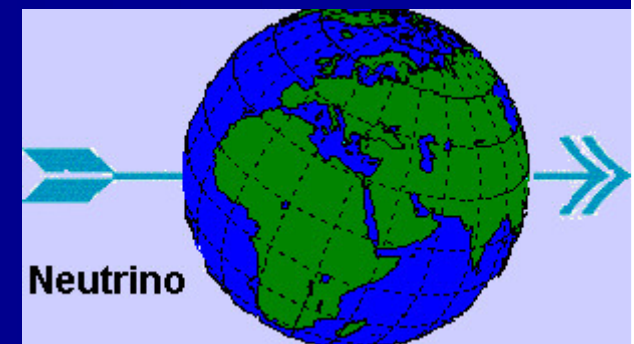


Das hemmungslose Neutrino

- Postuliert 1931, elektrisch neutraler Partner des Elektrons
- Extrem kleine Masse ($< 1 / 1.000.000.000$ Elektronmasse)



- Sehr schwache Wechselwirkung (kann ohne Wechselwirkung die Erde durchfliegen)
- Nachweis 1956: von 10^{12} Reaktorneutrinos pro Sekunde und mm^2 nachgewiesen in 10 Kubikmeter Wasser : 3 pro Stunde
- 400 Neutrinos / Kubikzentimeter überall im Universum



Elektroschwache Wechselwirkung

- Nobelpreis 1999
- Veltman, t'Hooft
- Vorhersage der Top-Quarkmasse
- Entdeckung des Top-Quarks 1995

The formulas of 't Hooft and Veltman made the infinities vanish into thin air!

The contributions of the Nobel Laureates seen as a "mathematical machinery".

Goodbye to infinities

For decades, attempts were made to explain the weak interactions. But meaningless results often appeared in the form of infinite probabilities and infinite so-called quantum corrections.

't Hooft and Veltman showed how these nasty infinities could be tamed and interpreted. In their "mathematical machinery" the theory is first modified, among other things, through the introduction of a number of "ghost particles". Calculations are then run in an unreal space-time in which the number of dimensions is a shade lower than the real number. Eventually 't Hooft and Veltman bring us back to the real world and show that the ghosts have disappeared!

't Hooft and Veltman checked their extensive mathematical calculations with *Schoonschip*, Veltman's computer program for the manipulation of symbols.

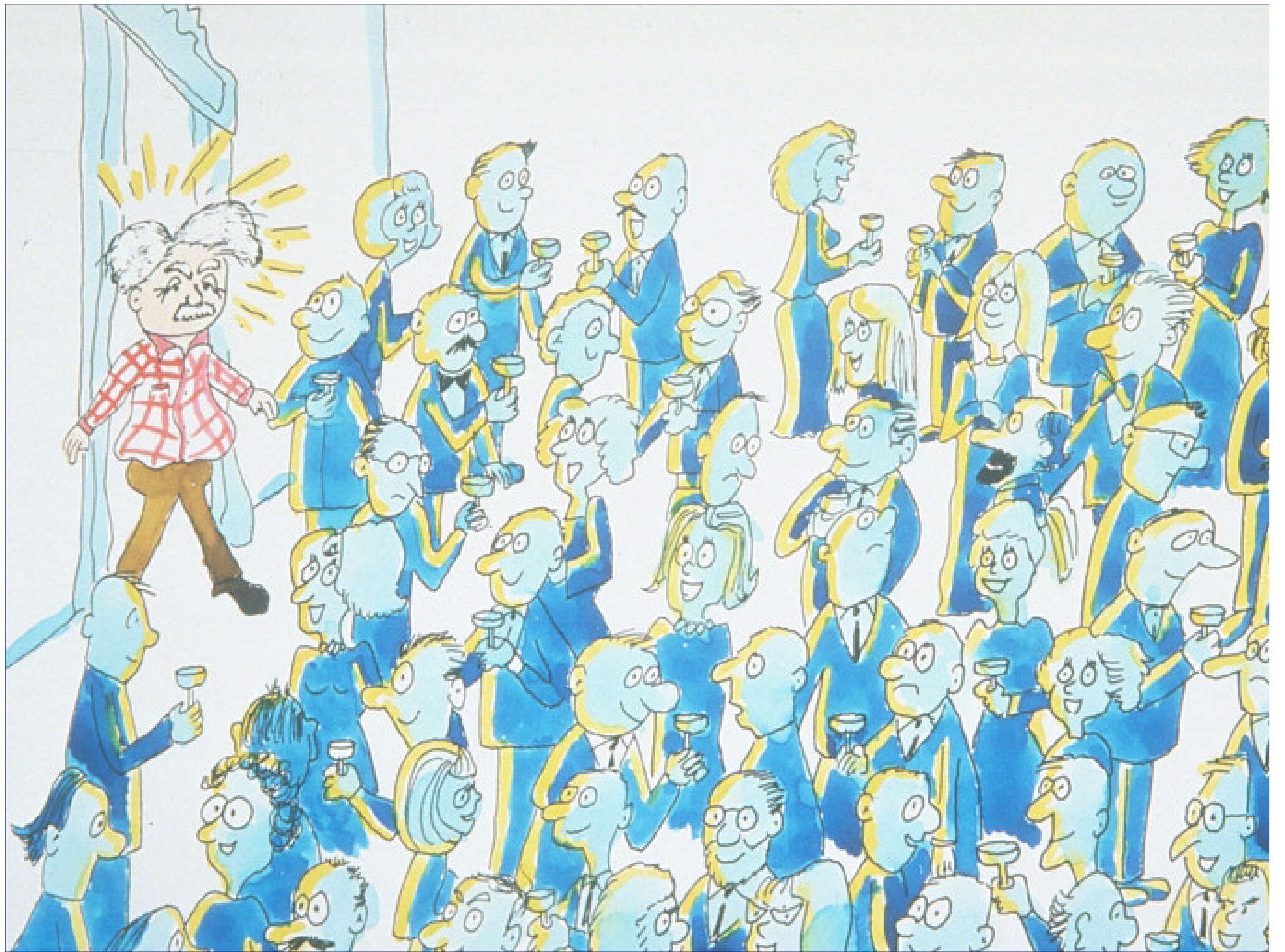
$$e^2 \int d^4 p \int d^4 k \int d^4 q \frac{1}{(p^2 + m^2)(k^2 + m^2)(q^2 + m^2)}$$

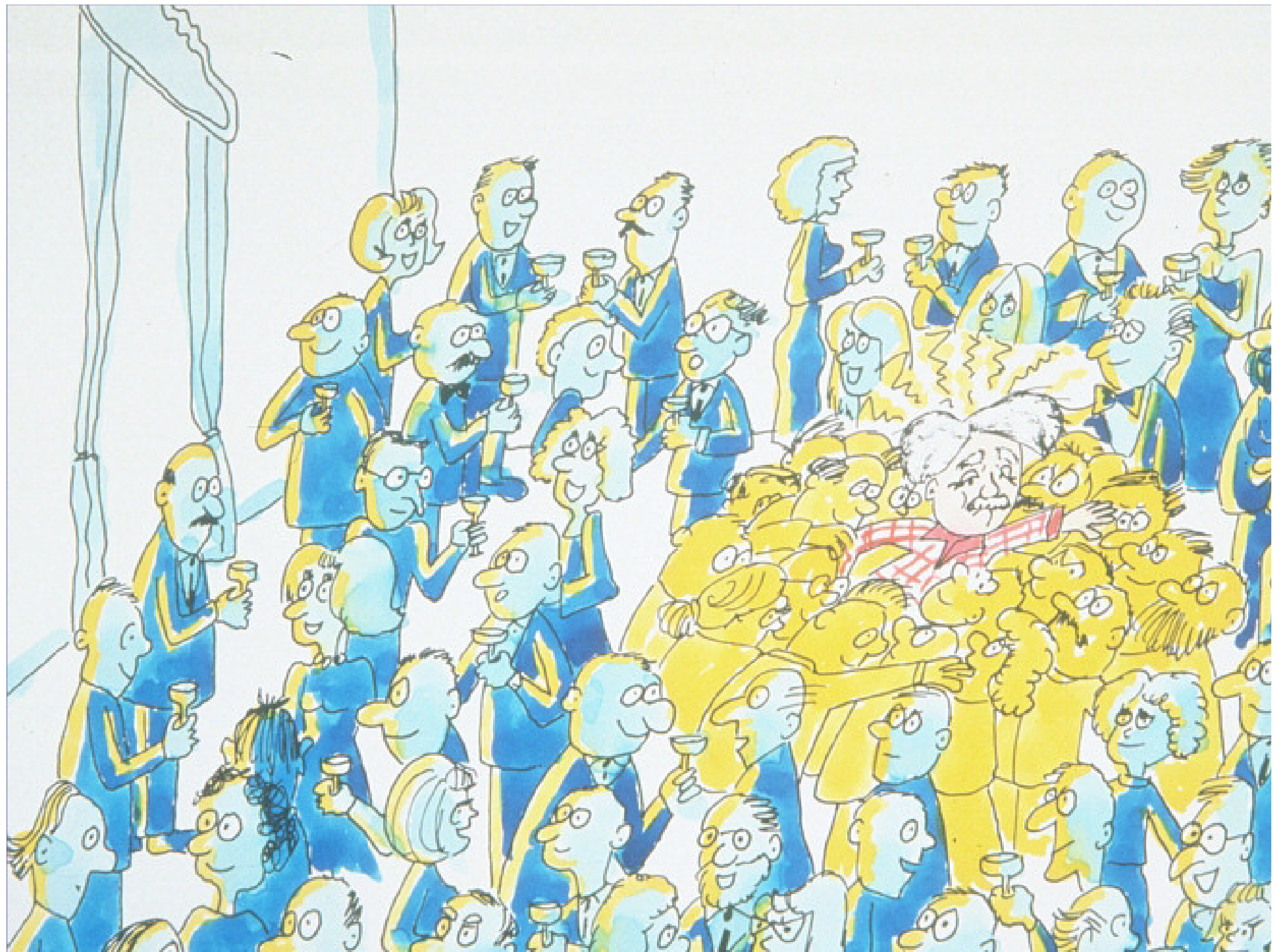
Der Higgsmechanismus

- Higgsteilchen im Standardmodell gefordert
- Wie gebe ich dem W- und Z-Boson eine Masse ?

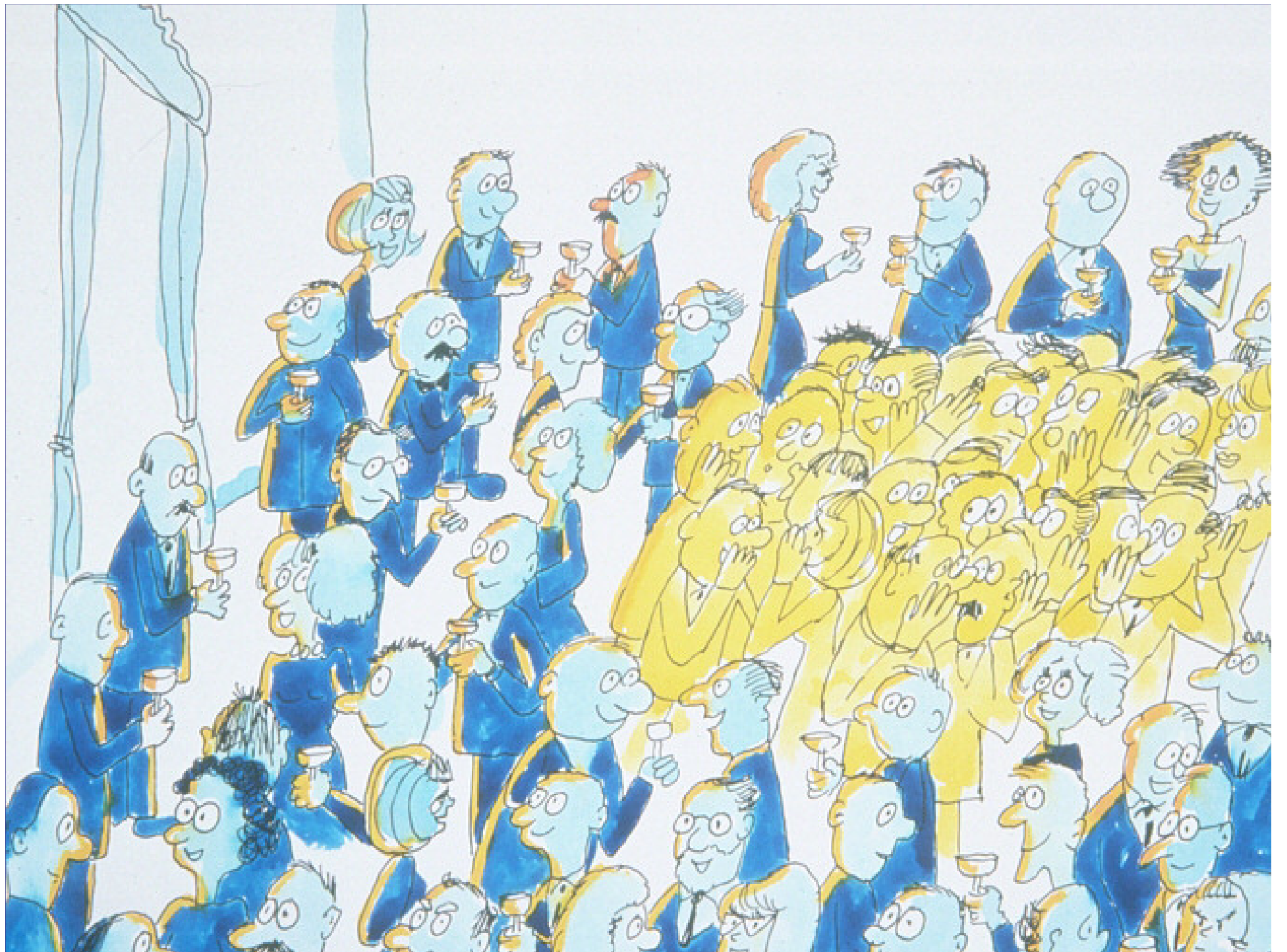




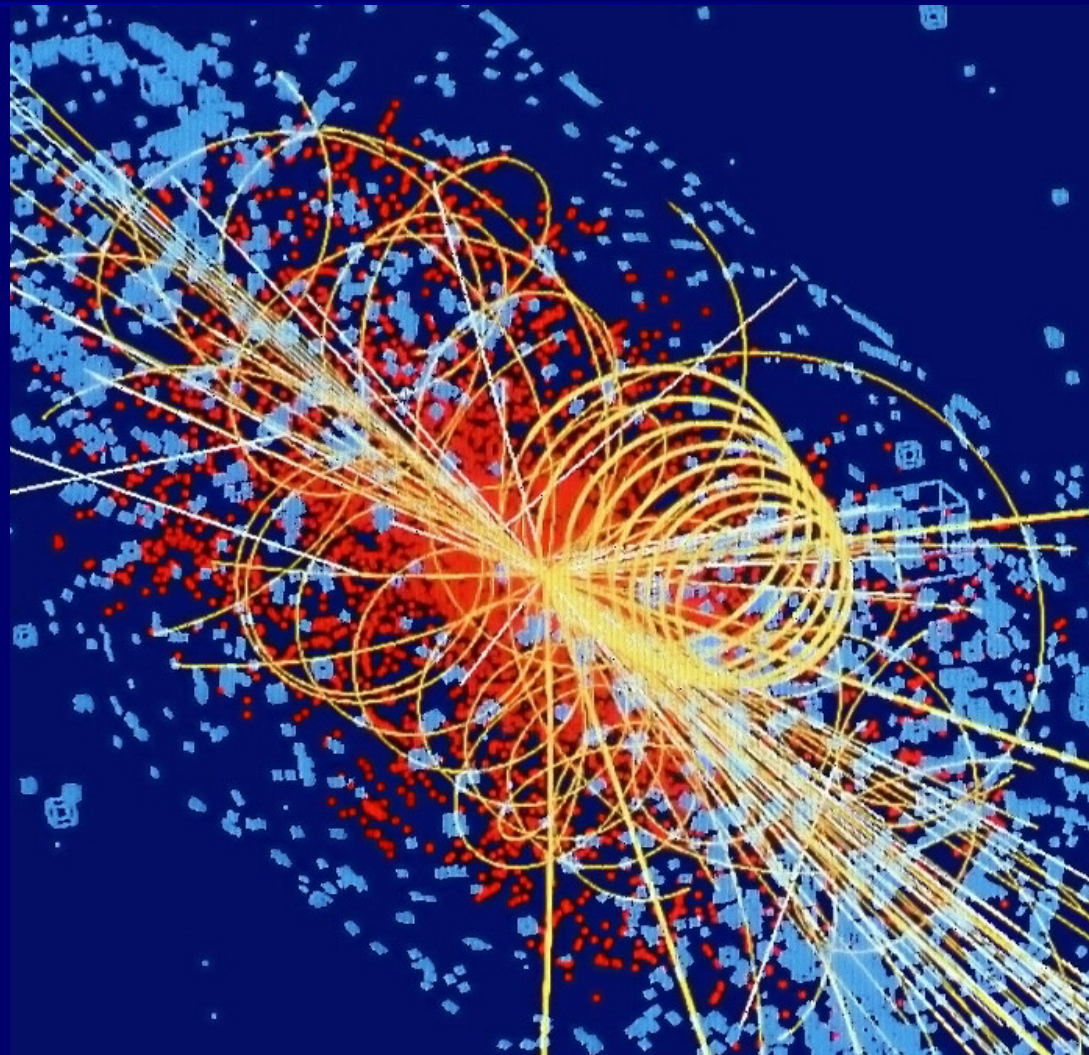








Auf der Suche nach dem Higgsteilchen



Teilchennachweis

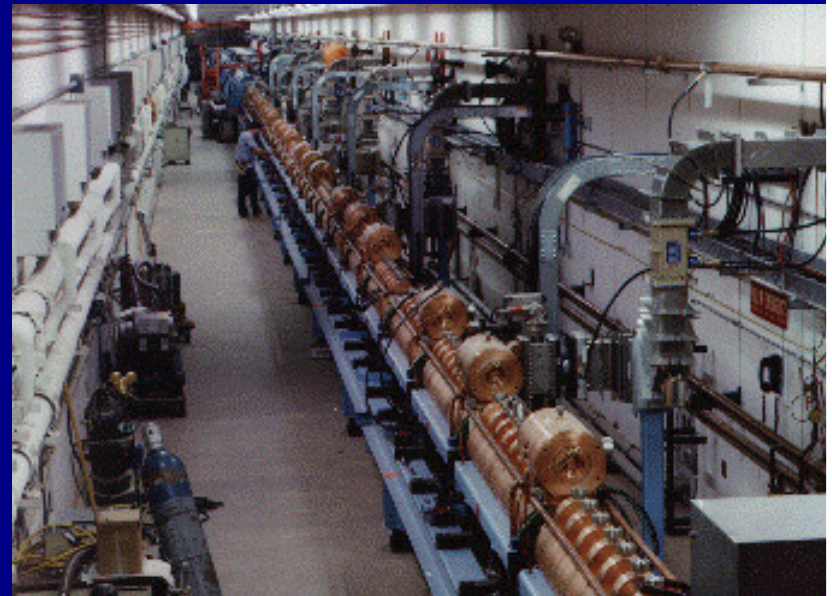
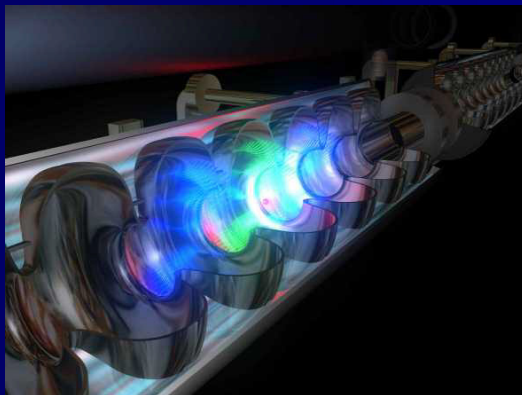
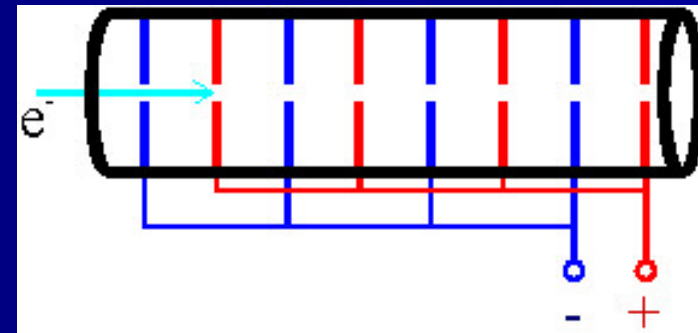
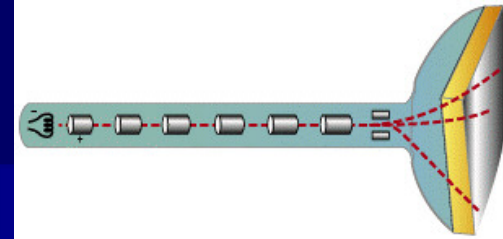


Die Mikroskope der Teilchenphysik: Beschleuniger

■ Haben Sie auch daheim!

◇ Funktionsprinzip:
Simulation

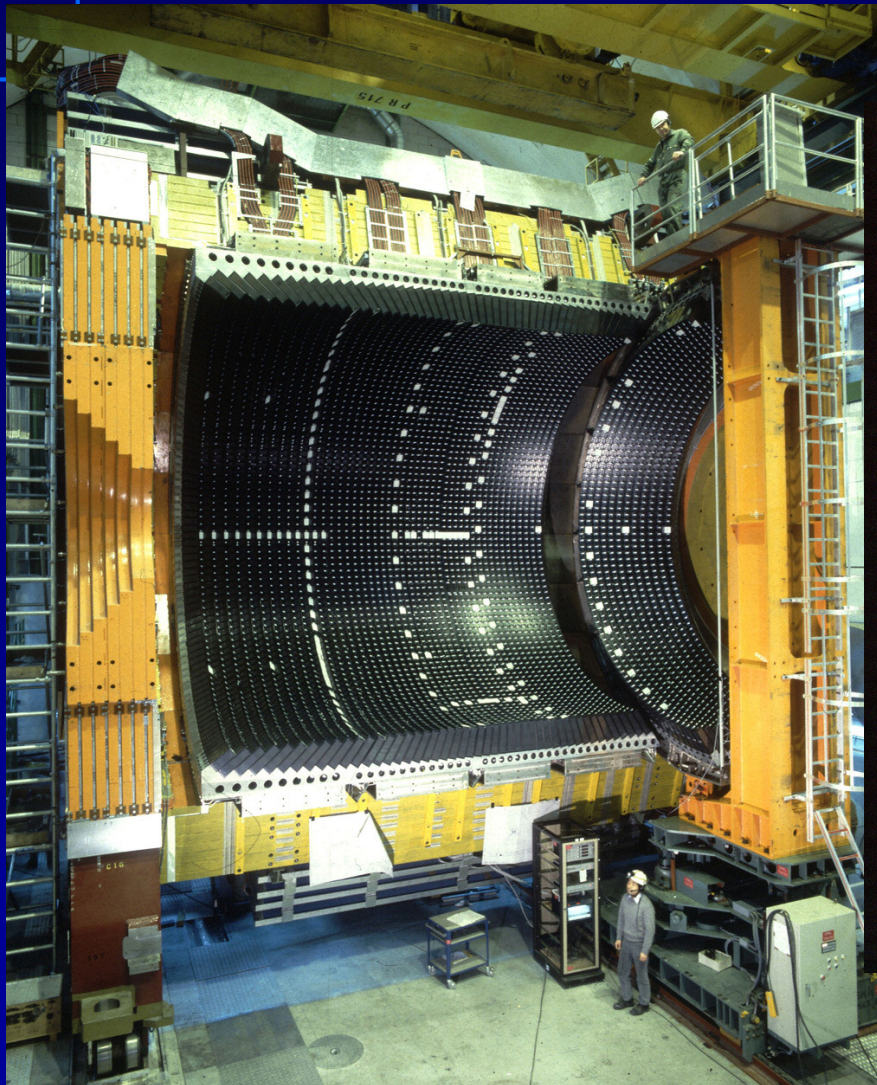
- ◇ Beschleuniger: CERN
- ◇ Fermilab, Chicago
 - ◇ DESY, Hamburg



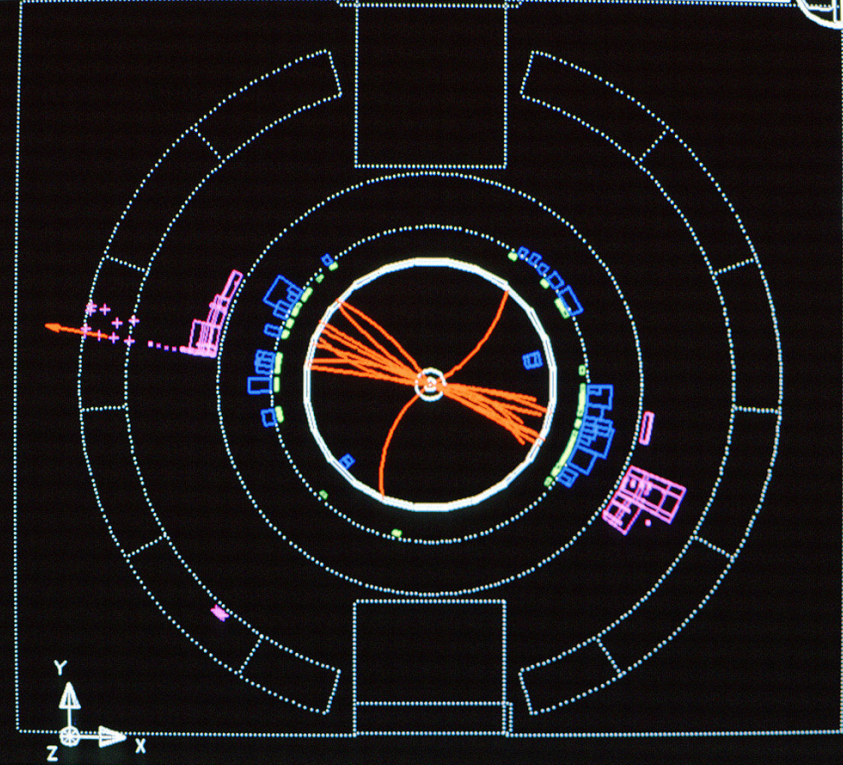
Die Augen der Teilchenphysik: Detektoren



CERN, Genf,
bis 2000

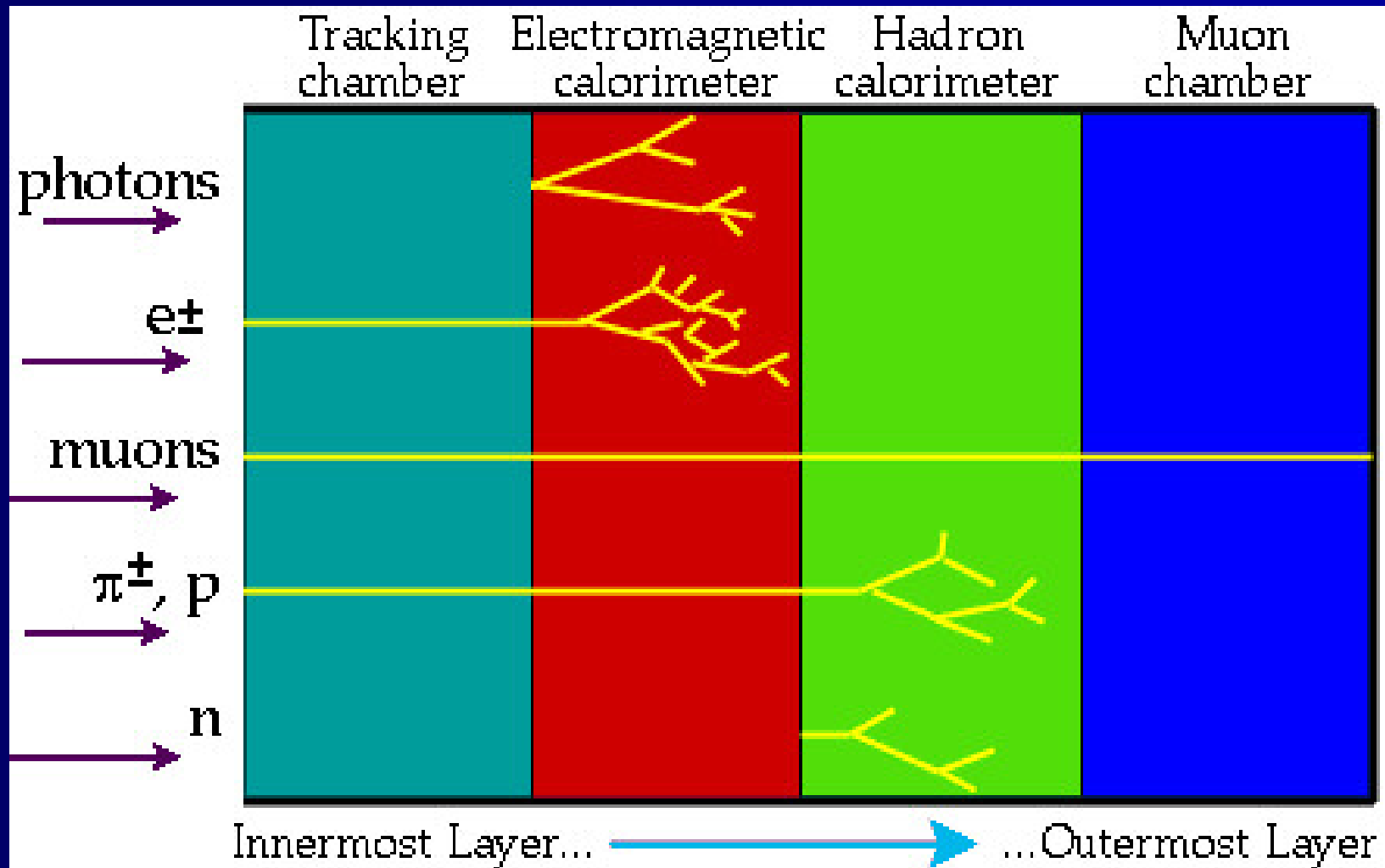


RunEvent 1199: 1383 Date 891115 Time 162518 Cbk(N= 25 Sump= 11.4) Ecol(N= 43 SumE= 29.8) Hcol(N=13 SumE= 43.1)
Ebeam 43.785 Evis 41.0 Emies 50.5 Vbr (0.07, 0.11, -2.95) Muon(N= 1) Sec Vtr(N= 5) Pstl(N= 0 SumE= 0.0)
Br=-4.015 Thrust=-0.9073 Aplan=0.0131 Oblat=-0.0643 Sphar=0.0610

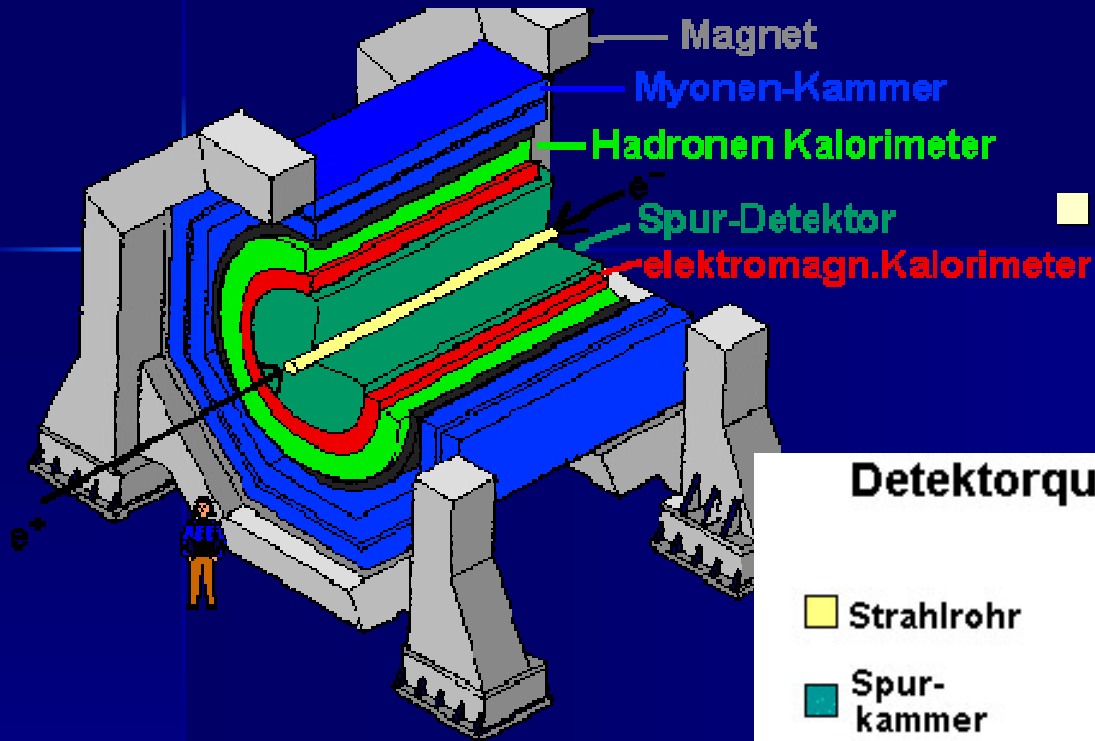


Elektronische Bilder

Teilchennachweis



Teilchenidentifikation = Detektivarbeit

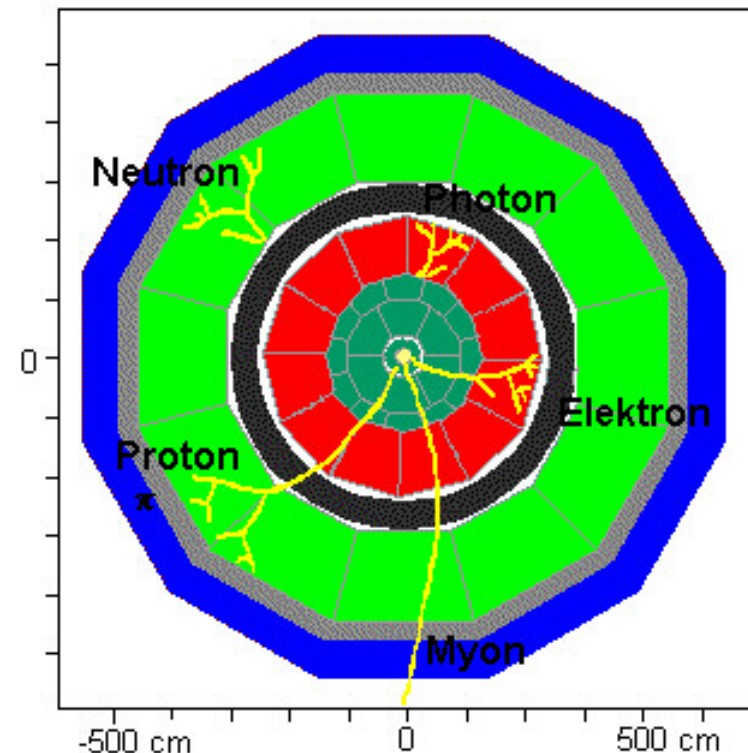


- Zwiebelschalenartiger Aufbau verschiedener Komponenten

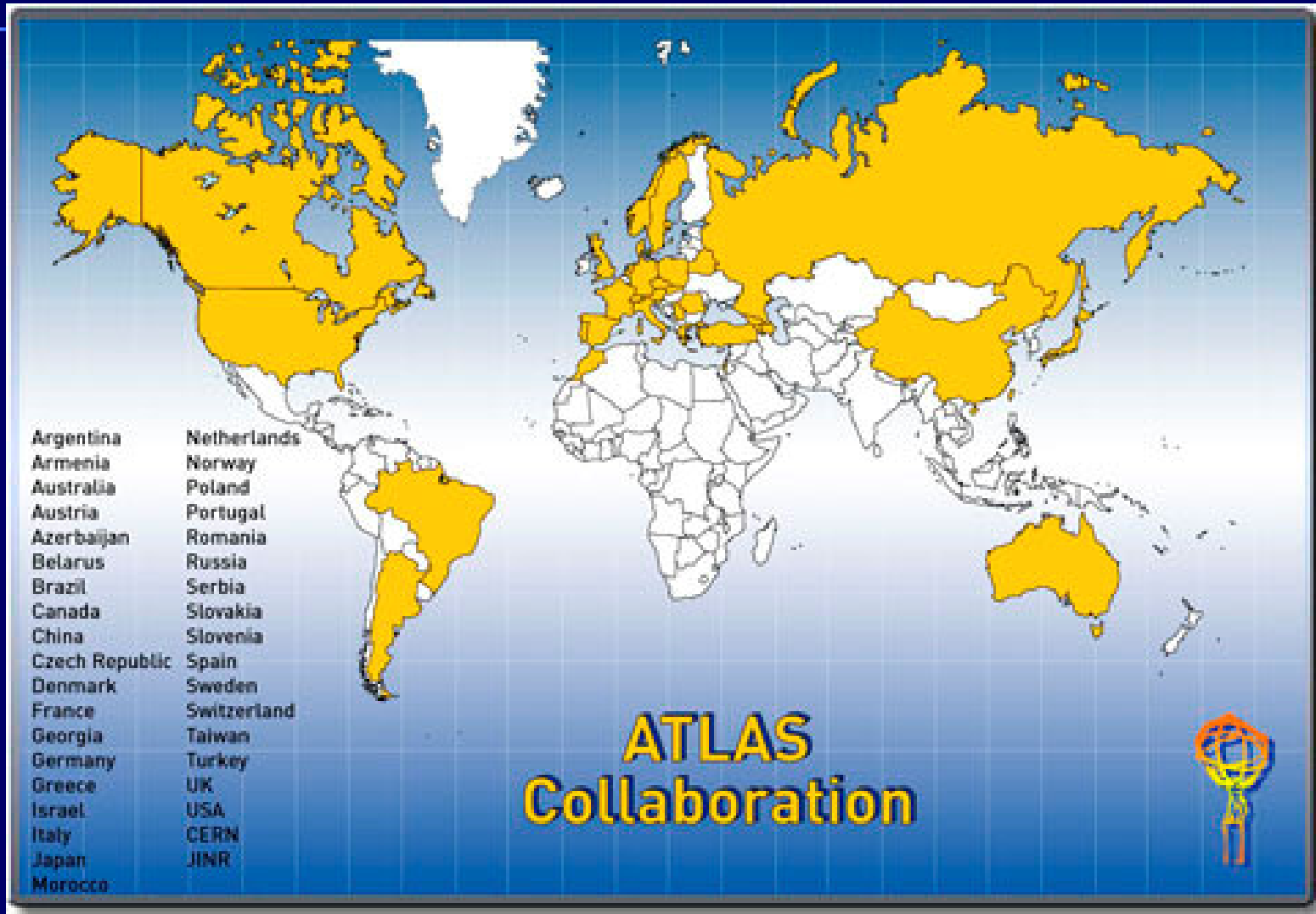
- Jede Teilchenart hinterlässt bestimmte Kombination von Signalen in den Komponenten

Detektorquerschnitt mit Teilchenspuren

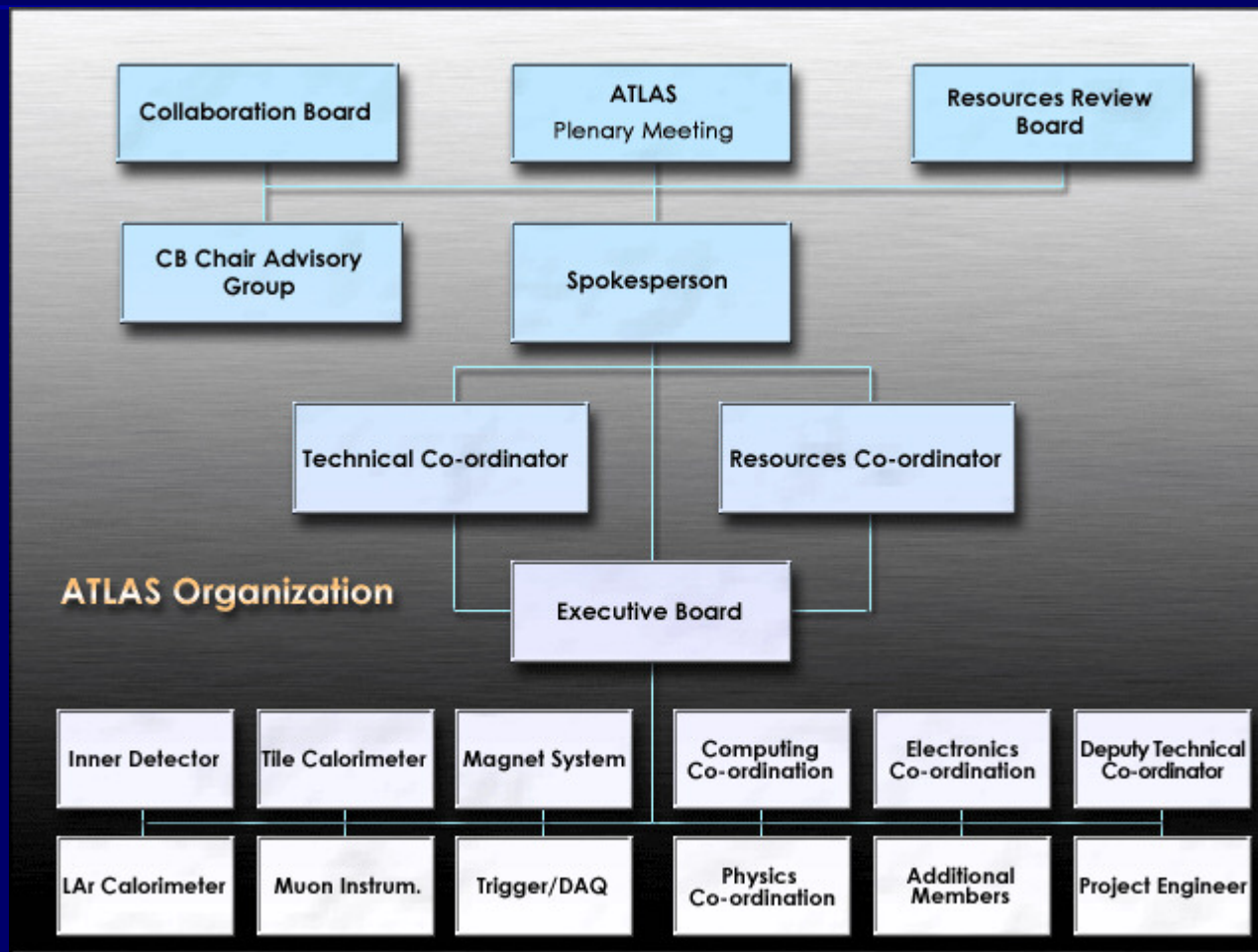
- Strahlrohr
- Spur-kammer
- mag. Spule
- elektr. mag. Kalorimeter
- hadron. Kalorimeter
- magnet. Eisen
- Myonen Kammer



ATLAS Kollaboration am LHC



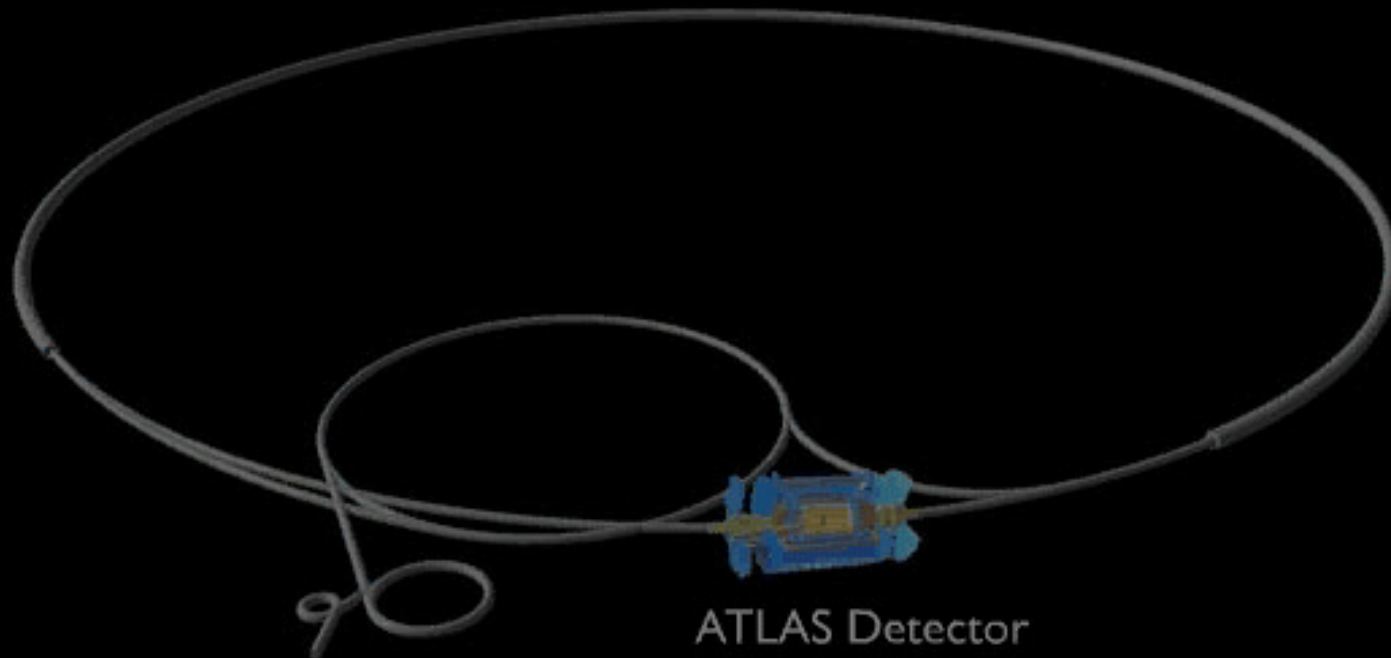
ATLAS Management



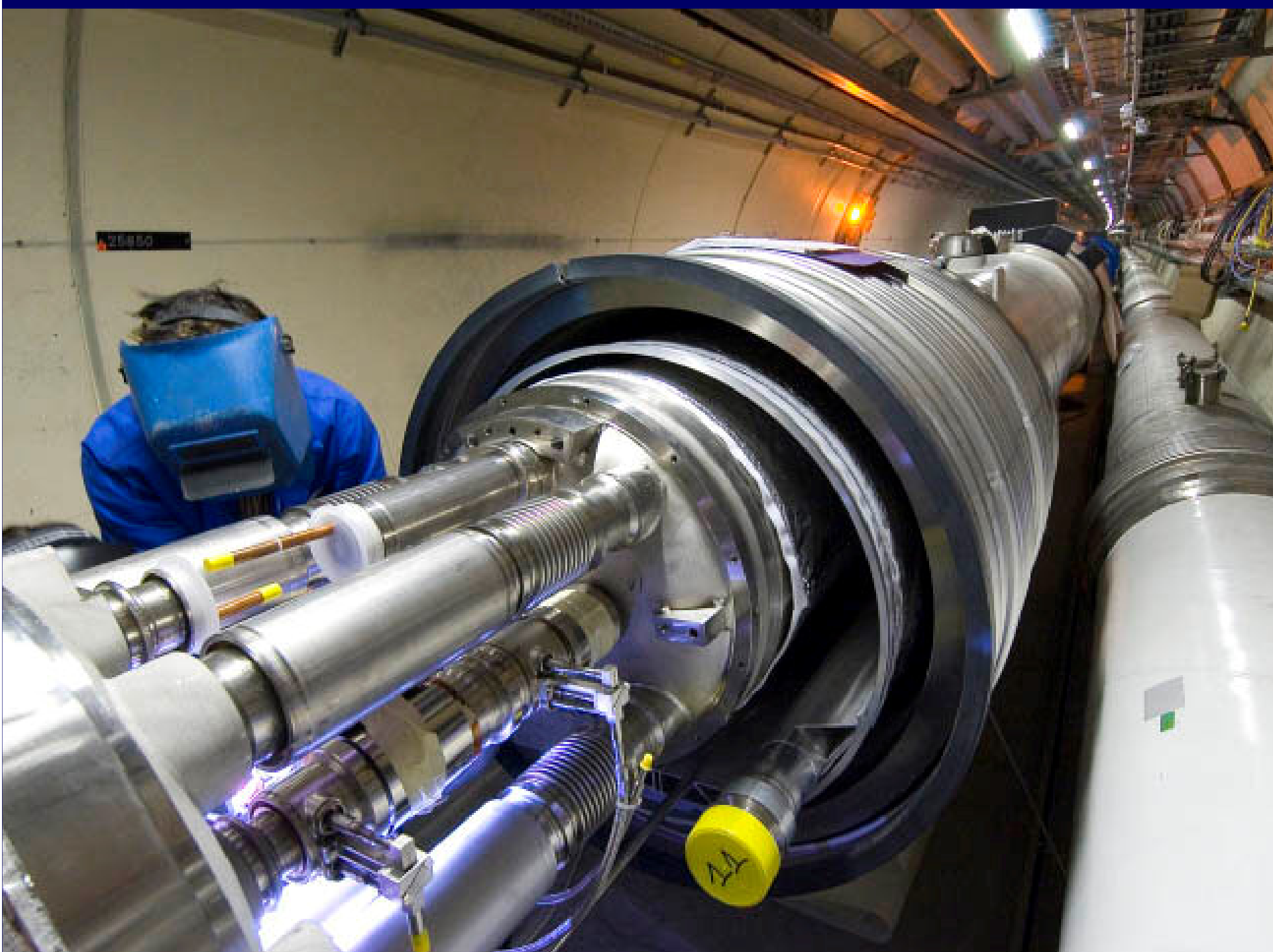


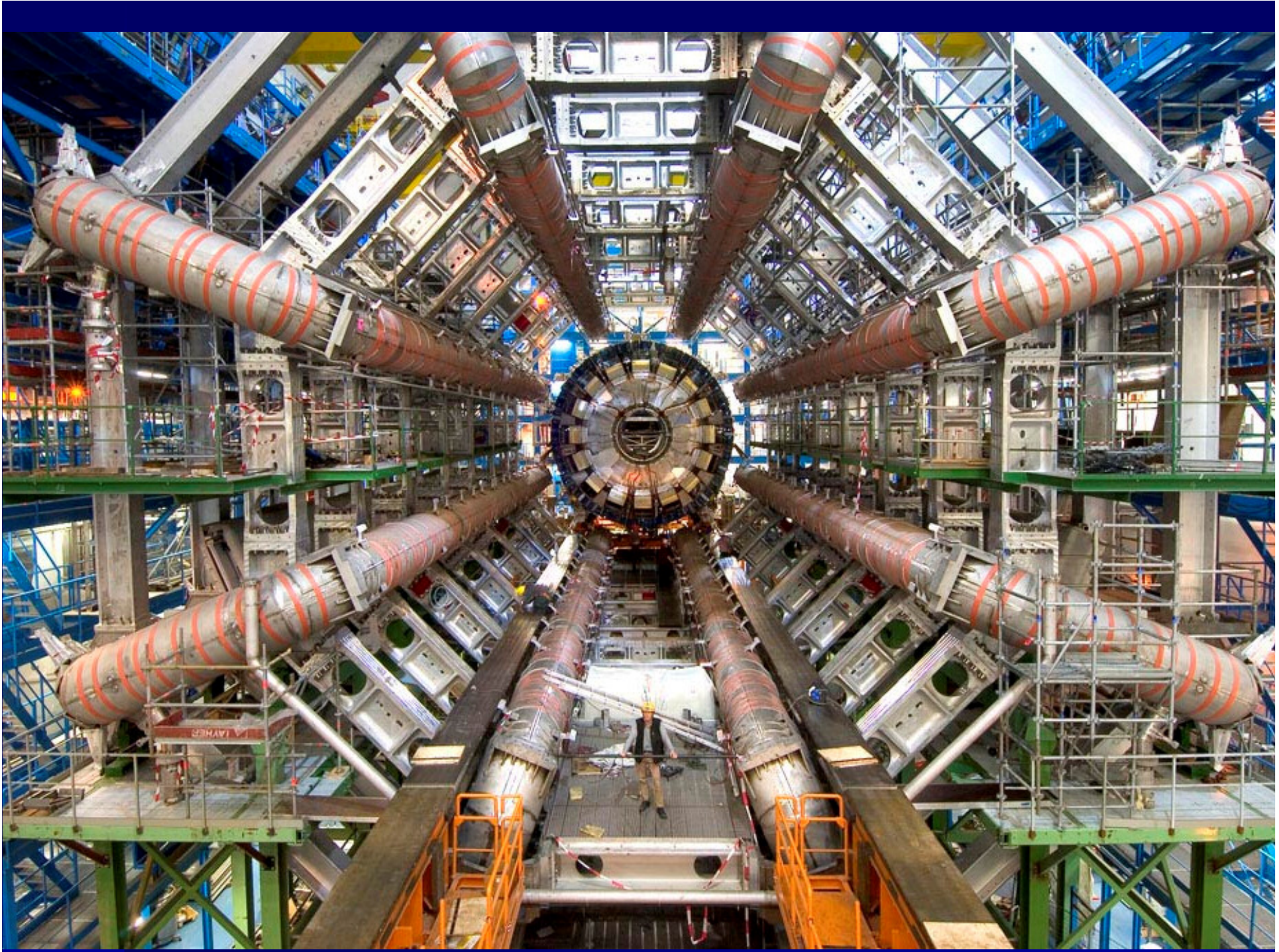
PLAY ▶

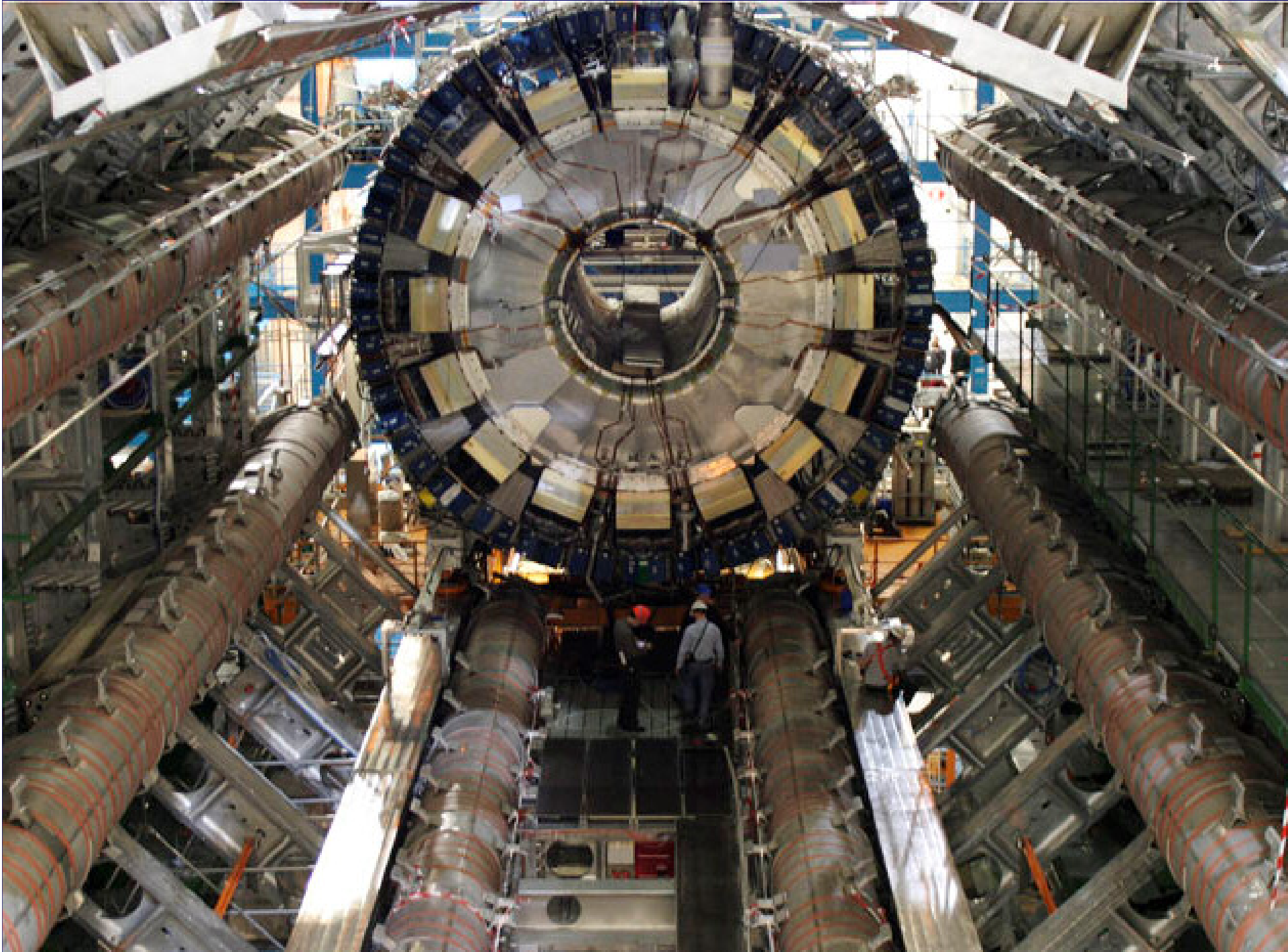
Large Hadron Collider



ATLAS Detector



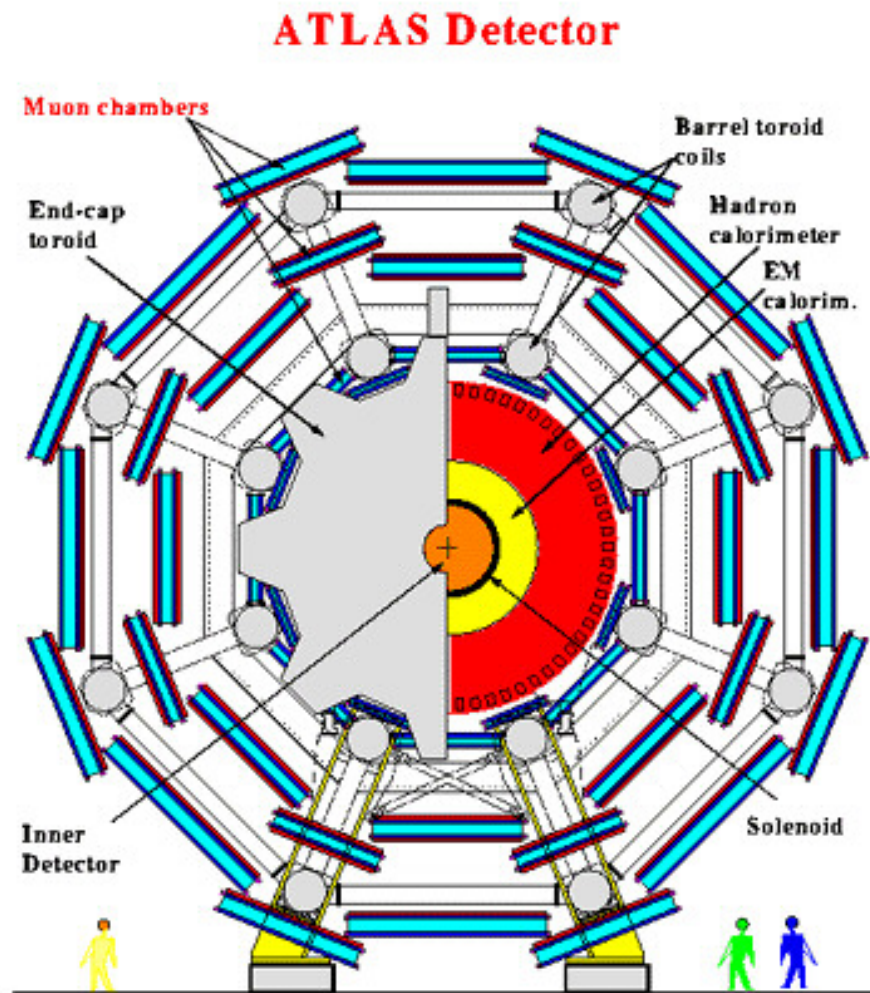






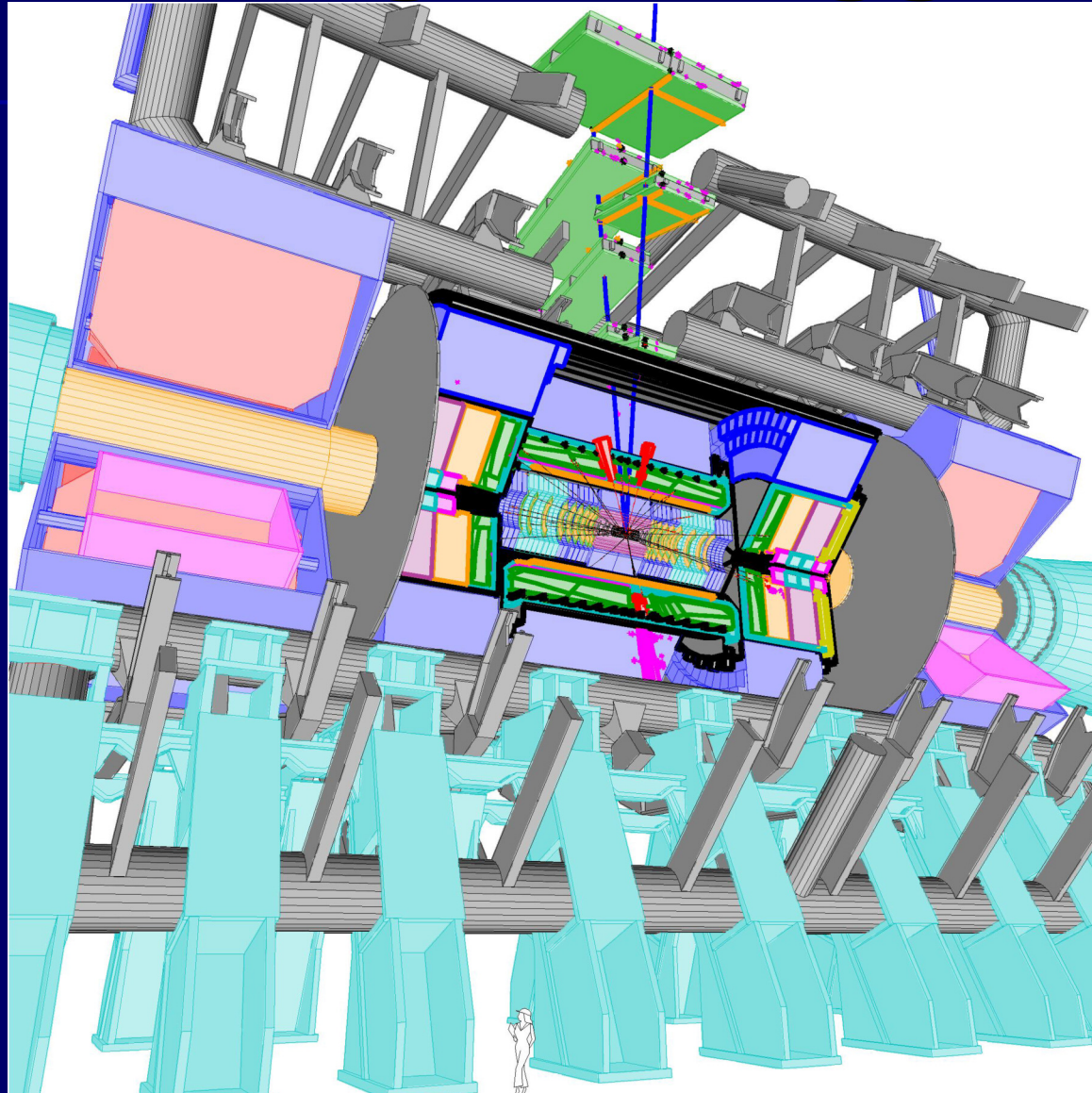
ATLAS

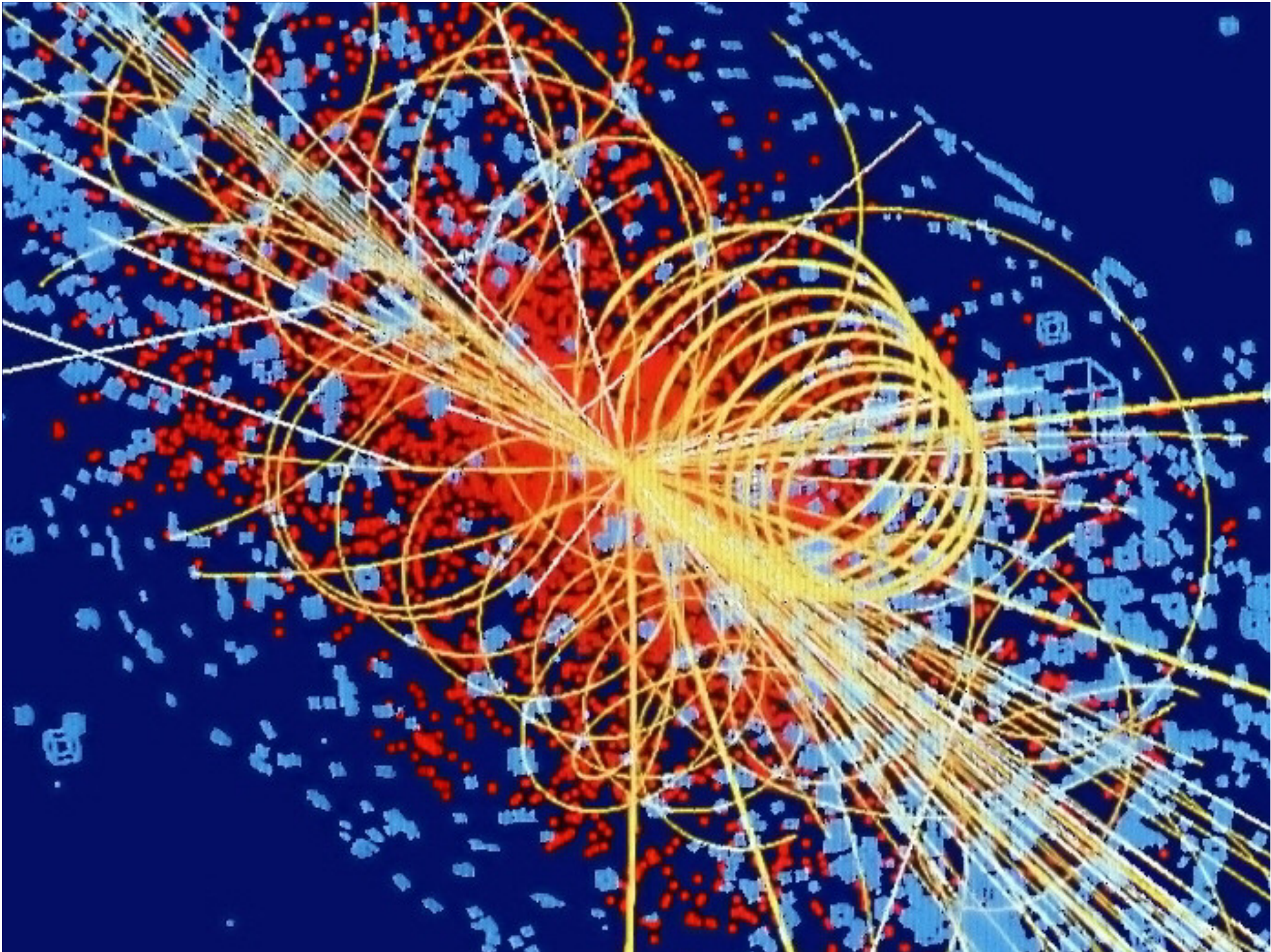
Myonspektrometer



- 5500 qm Fläche
- 1200 Präzisionskammern
- 400000 Driftrohre
- Positionierung auf 50 Mikrometer

Entdeckung des Higgsbosons





ATLAS Kalorimeter-Trigger

• An inner detector with accurate measurements of the straw-tube detector giving identification using transition provides a 2 T magnetic field

• A calorimeter with an inner system using new LAr technology with its high resolution, calibration precision and stability, followed at large radius by an iron-scintillator tile calorimeter providing good jet energy resolution and complete coverage for measuring the missing transverse energy E_T^{miss}

The most information flow from the ATLAS detectors is reduced by a selection system, the trigger, based on hierarchical decision-making. A data acquisition system merges the information from the trigger and the detectors and stores it for further processing and analysis.

An object-oriented software system will reconstruct the data so as to access the physical properties of the produced particles and simulate ATLAS in all relevant details.

Calorimeter

Muon Spectr



Lead/liquid argon accordion electromagnetic calorimeter



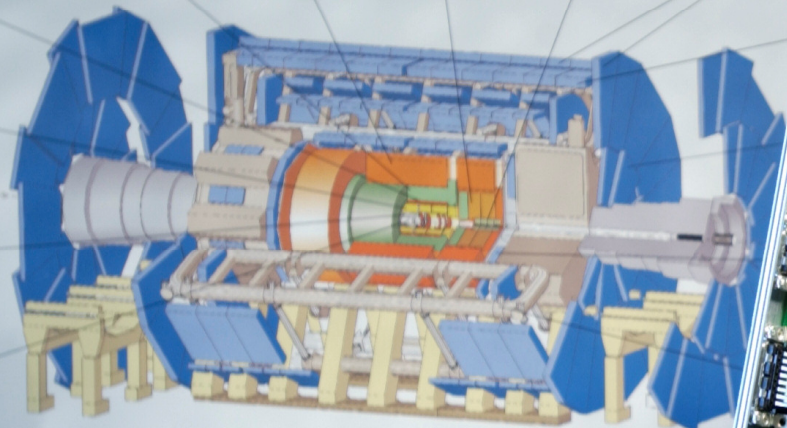
Iron/scintillator tile hadronic barrel calorimeter



Copper/liquid argon hadronic end-cap calorimeter



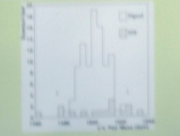
Copper/liquid argon forward calorimeter



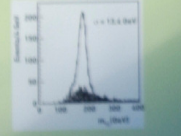
detector is 22 meters high, 44 meters long, and the overall weight is about 12,500 tonnes.



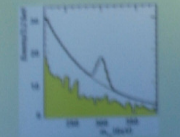
Expected signal for $\mu^+\mu^-$ production at ATLAS, with the proton decaying into electron-positron pairs, above the Standard Model background. These signals are expected in models with extra dimensions.



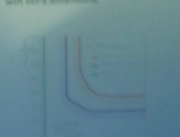
Expected signal from graviton resonant production at ATLAS, with the graviton decaying into electron-positron pairs, above the Standard Model background. These signals are expected in models with extra dimensions.



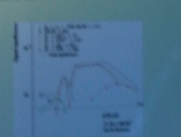
Invariant mass of $1+1+1+2$ jets obtained from full simulation for a sample of 50,000 inclusive single lepton plus jet events. The dashed histogram shows the background from wrong combinations.



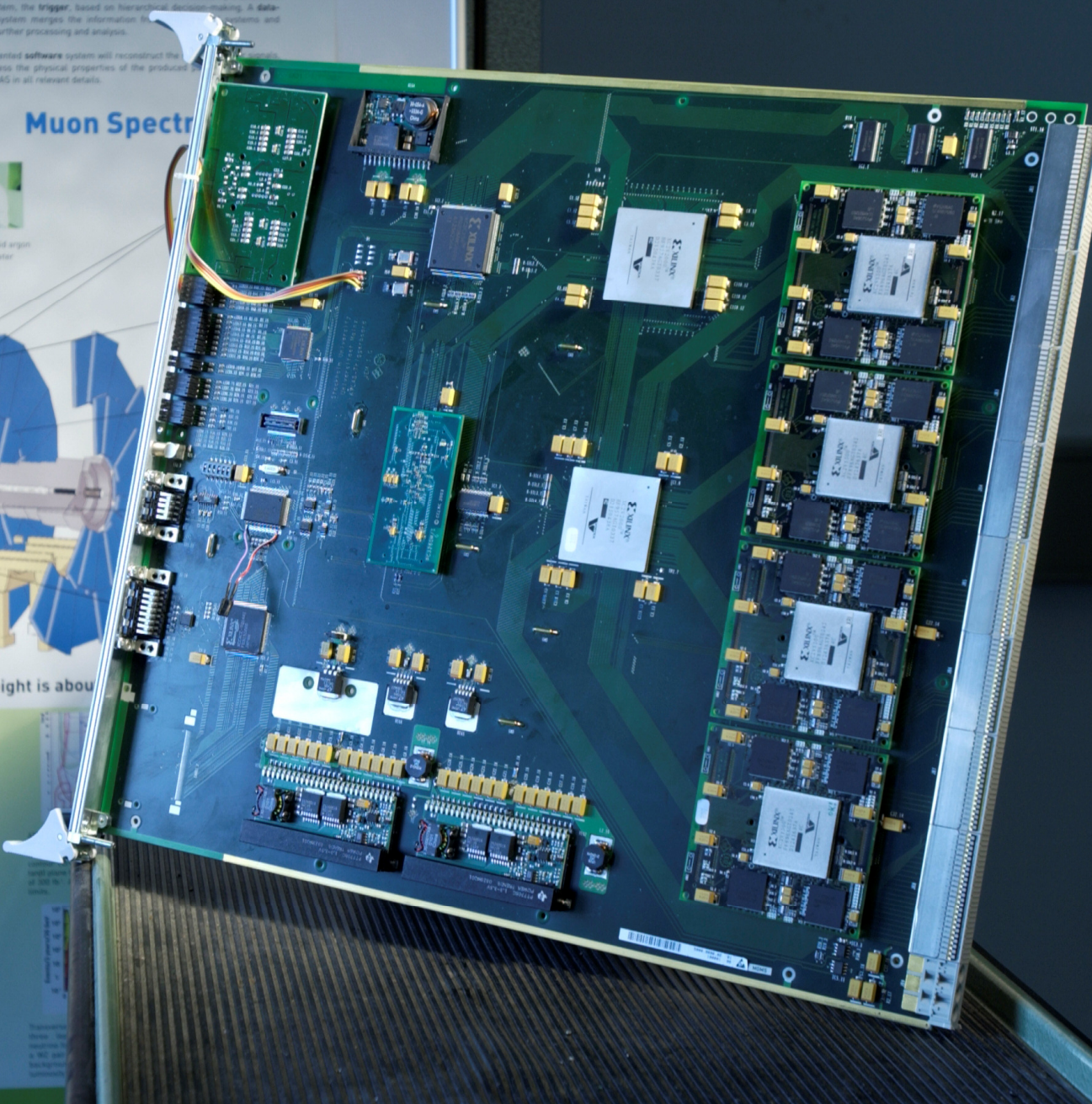
For an integrated luminosity of 100 fb⁻¹ and for $\mu^+\mu^-$ production at ATLAS, with the proton decaying into electron-positron pairs, above the Standard Model background. The signal is shown on top of the irreducible background.



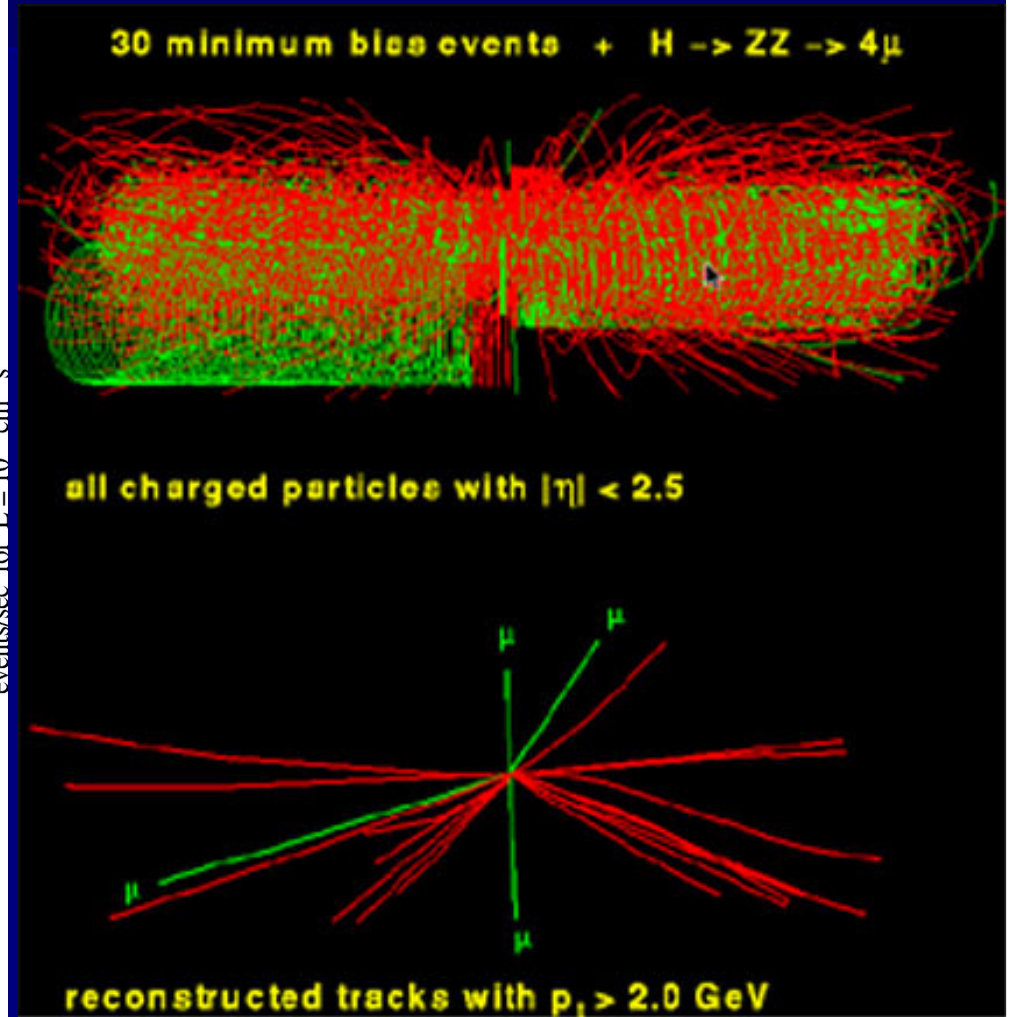
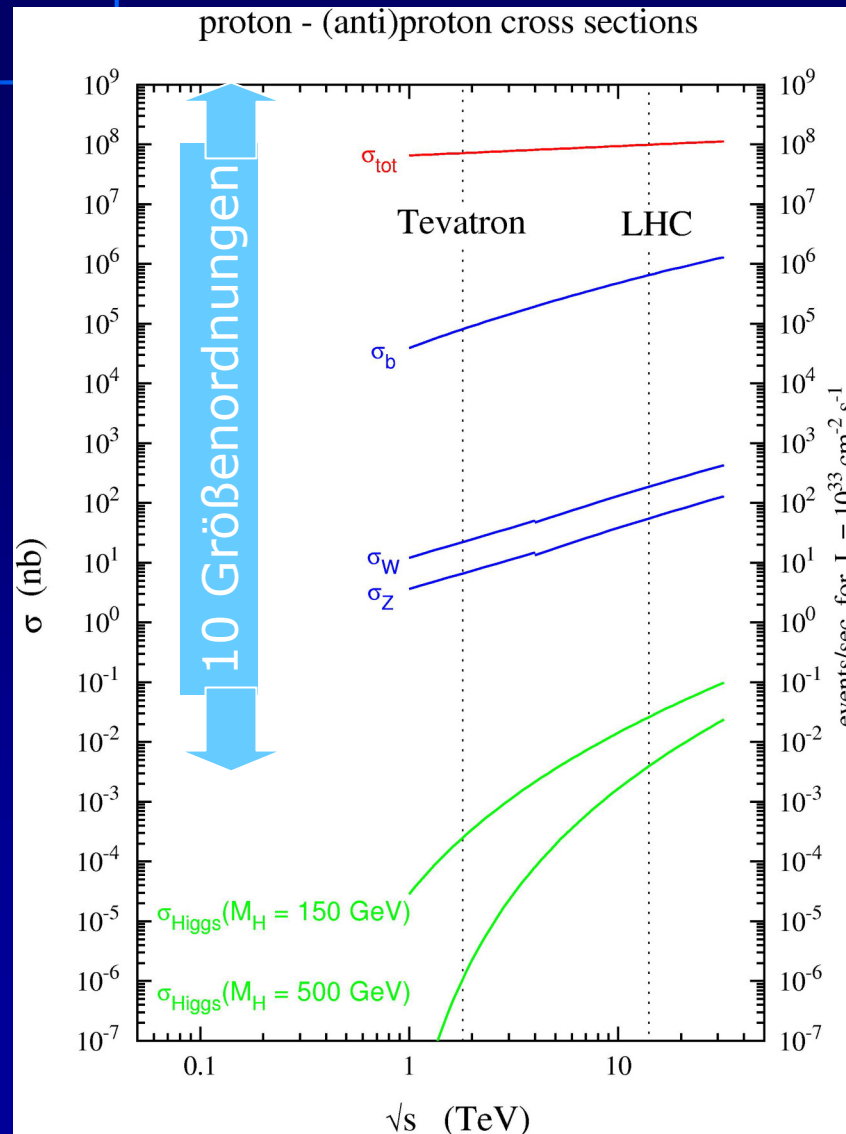
Expected signal from graviton resonant production at ATLAS, with the graviton decaying into electron-positron pairs, above the Standard Model background. The signal is shown on top of the irreducible background.



Invariant mass of $1+1+1+2$ jets obtained from full simulation for a sample of 50,000 inclusive single lepton plus jet events. The dashed histogram shows the background from wrong combinations.



Wirkungsquerschnitte am LHC



Brauchen wir große
Detektoren und teure
Beschleuniger, um Teilchen
zu sehen ?

JA (Higgsteilchen)

NEIN (kosmische Myonen)

Entdeckung der Höhenstrahlung

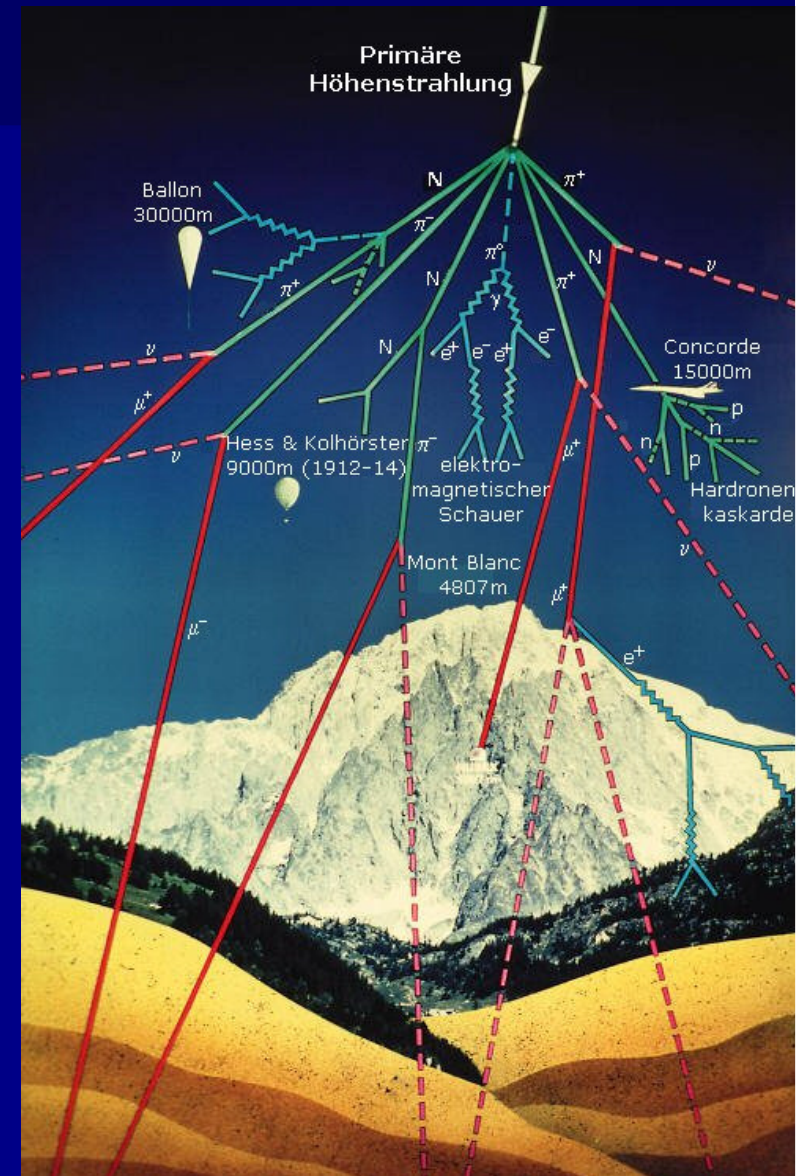


Quellen kosmischer Strahlung



Kosmische Höhenstrahlung

- Wechselwirkung der hochenergetischen Primärstrahlung (85% Protonen, 14% Alphateilchen) mit Atomkernen der Erdatmosphäre
- Erdoberfläche: Einige 100 geladene Teilchen pro qm in jeder Sekunde
- Meist Myonen

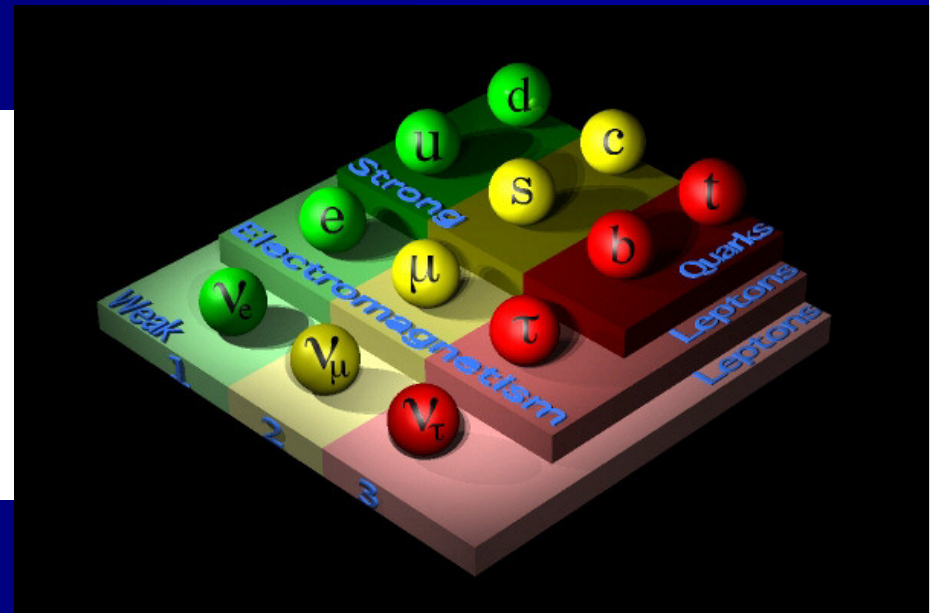


Das Myon

- Gruppe der Leptonen
- Masse (Myon) ~ 200 x Masse des Elektrons
- Mittlere Lebensdauer 2.2 Mikrosekunden
- Zerfall des Myons:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$



Zerfall des Myons

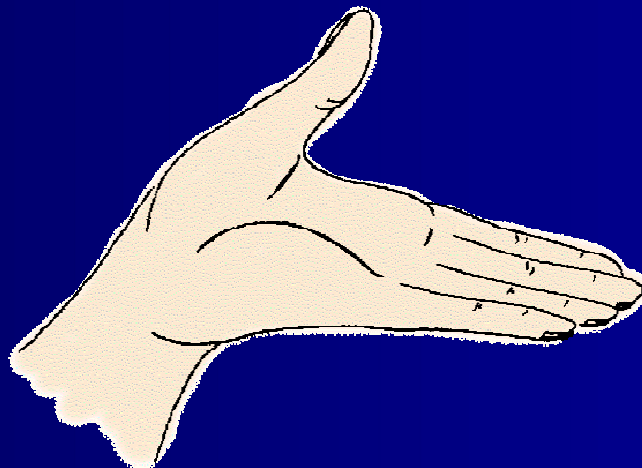
Statistisches Zerfallsgesetz der Radioaktivität

$$N(t) = N_0 \exp(-t/\tau_\mu) \quad \text{mit} \quad \tau_\mu = 2.2 \mu\text{s}$$

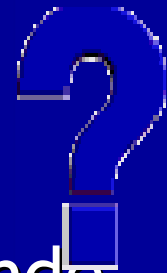
Myonen sollten die Erdoberfläche nicht erreichen

$$s = v \cdot t = 0.9999 \cdot c \cdot 2.2 \times 10^{-6} \text{ s} = 660 \text{ m}$$

1 Myon



pro Sekunde



Spezielle Relativitätstheorie

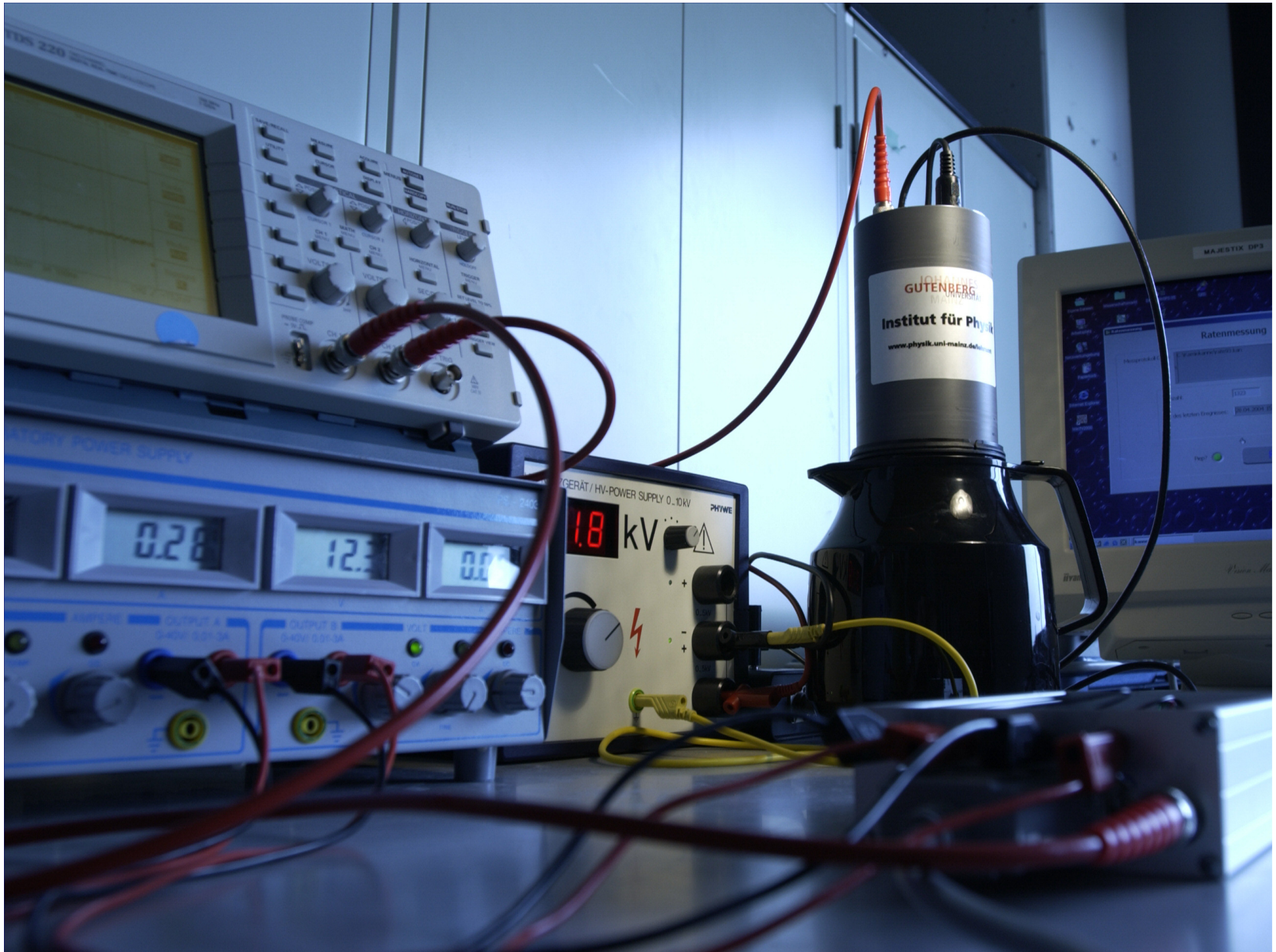
- **Zeitdilatation** (Standpunkt der Erde)

$v=0.9999c$: Lebensdauer verlängert sich um:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 71 \quad \rightarrow \quad \tau' = \tau\gamma = 1.6 \times 10^{-4} \text{ sec}$$

- **Längenkontraktion**, Entstehungshöhe 20km
(Standpunkt des Myons)

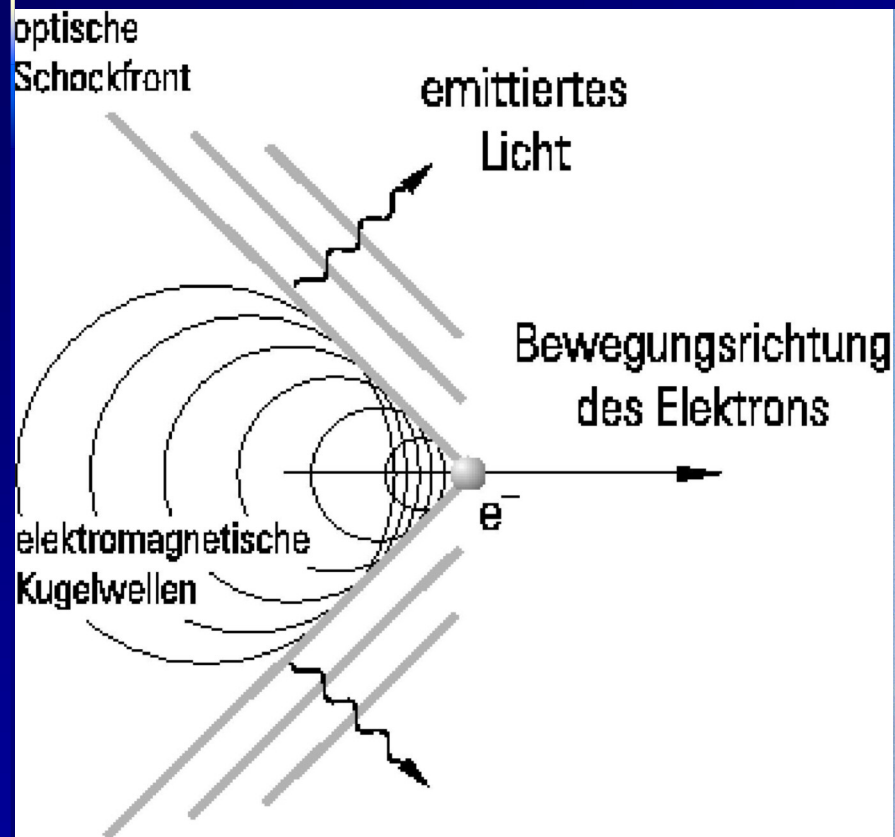
$$s' = \frac{1}{\gamma} \cdot s = 282 \text{ m}$$



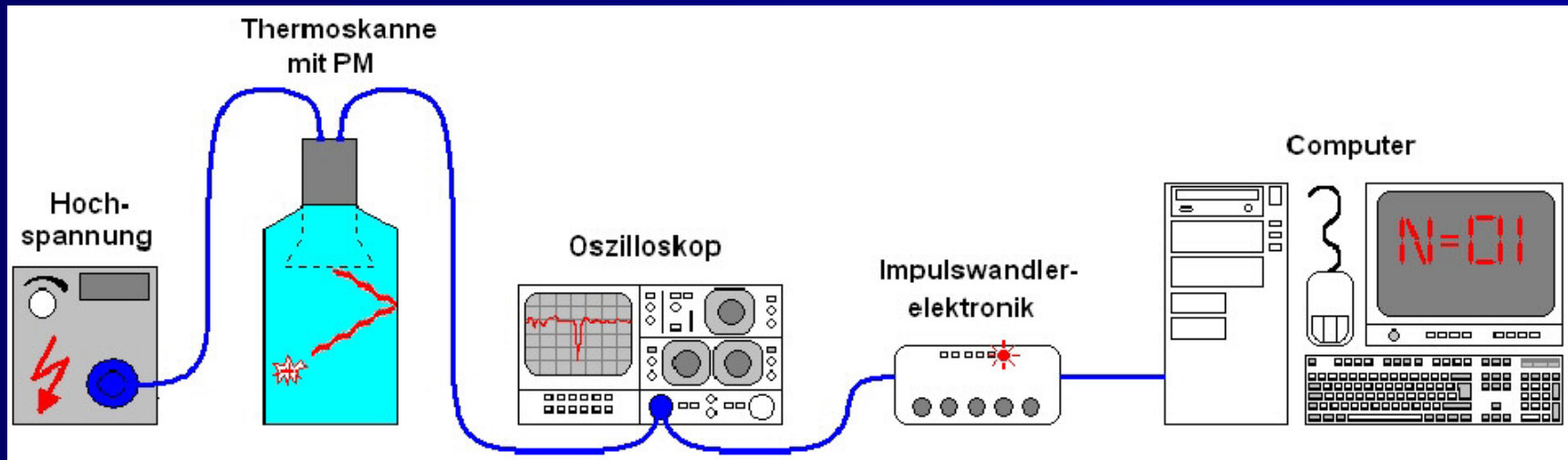
LINE1

0:50:14

Cherenkoeffekt



Versuchsaufbau



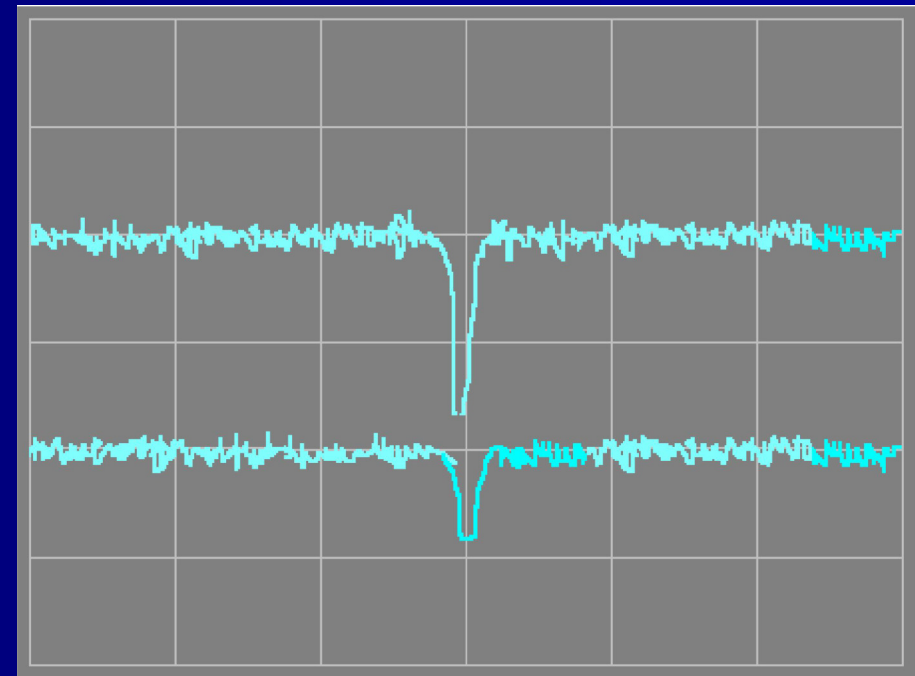
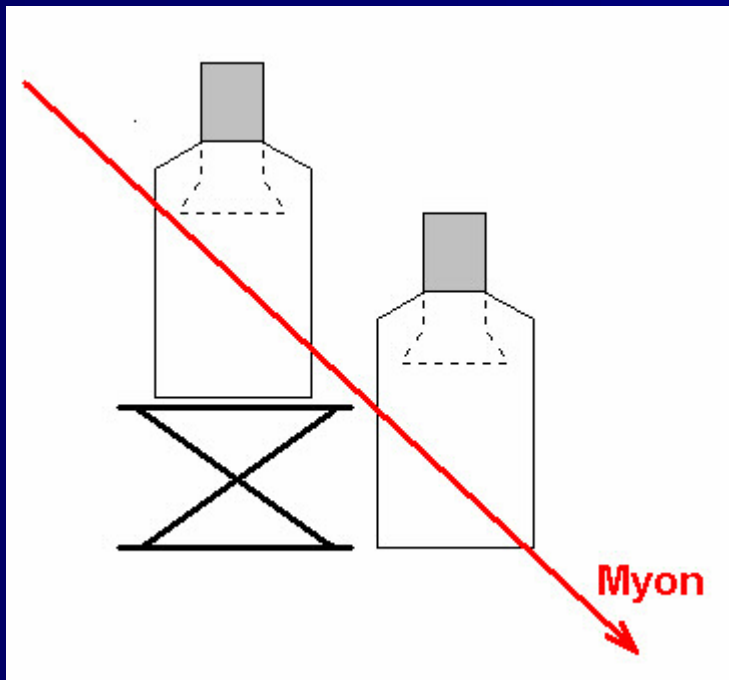
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Praxis der
Naturwissen-
schaften 4/51

Versuchsdurchführung

- Koinzidenz mit zwei Kannen



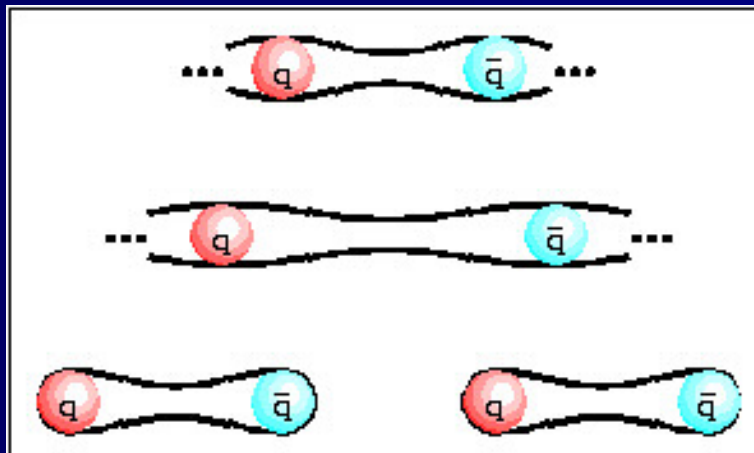
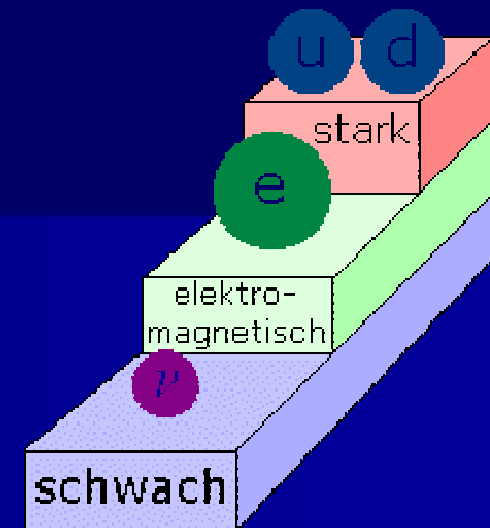
Versuchsdurchführung

- Messung an verschiedenen Orten



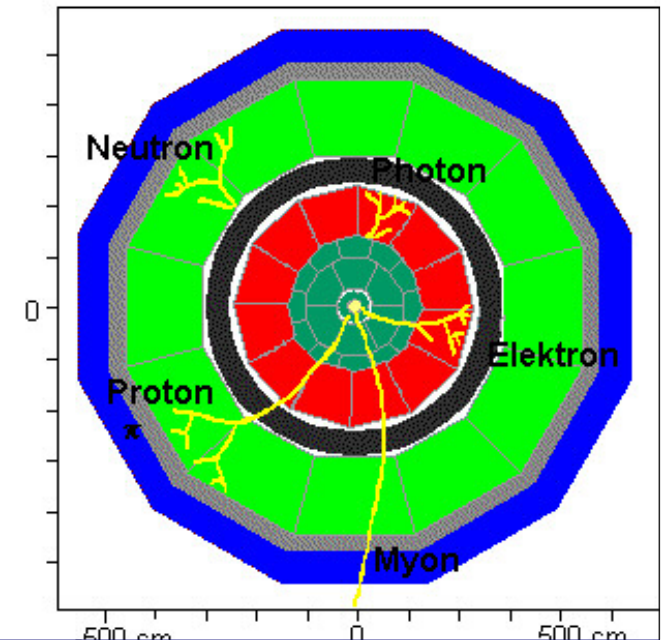
Zusammenfassung „Kräfte“

- Die unterschiedlichen Ladungen bewirken unterschiedliche Kräfte zwischen Teilchen
- Sie erklären auch das unterschiedliche Verhalten in den Detektoren
- Sowie die Bildung von Teilchenjets aus Quarks

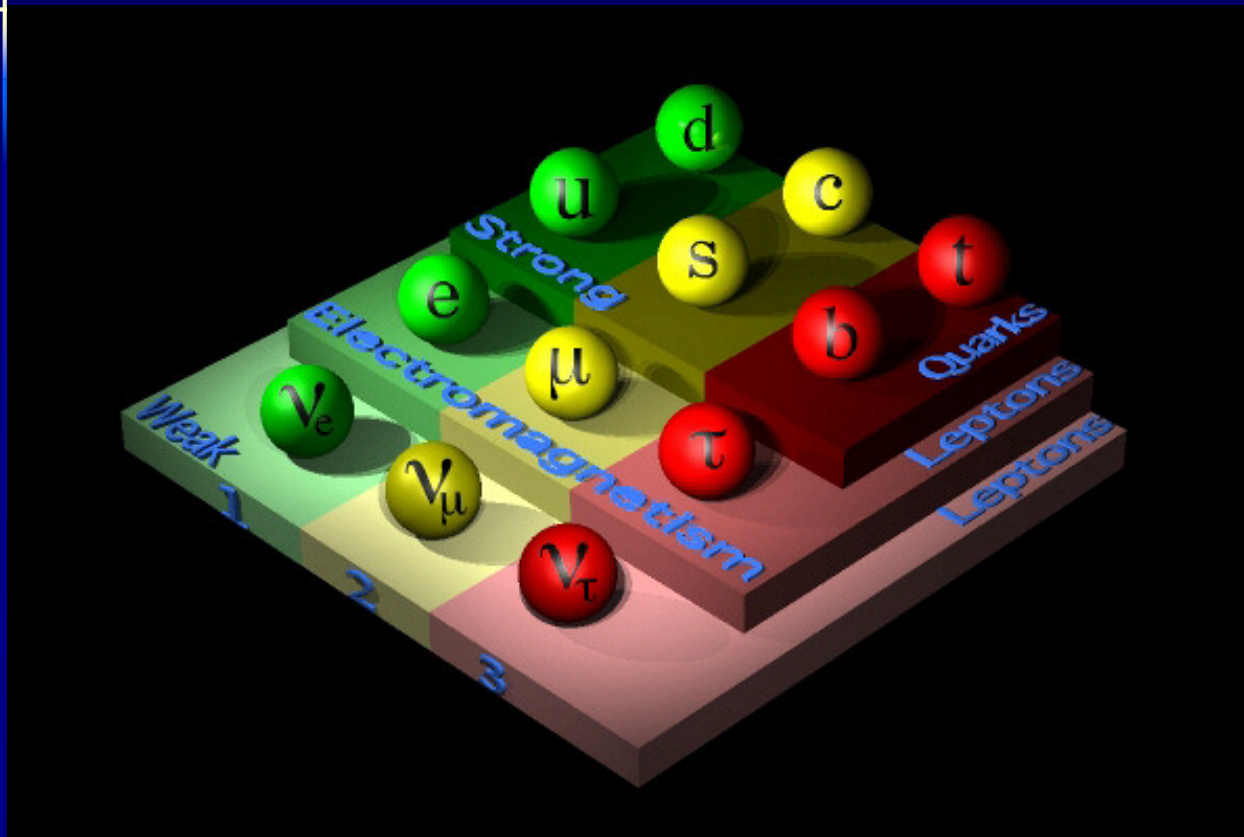


Detektorquerschnitt mit Teilchenspuren

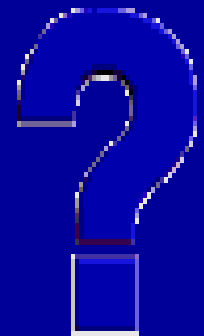
- Strahlrohr
- Spurkammer
- mag. Spule
- elektr. mag. Kalorimeter
- hadron. Kalorimeter
- magnet. Eisen
- Myonen Kammer



Das vollständige Set der Bausteinteilchen

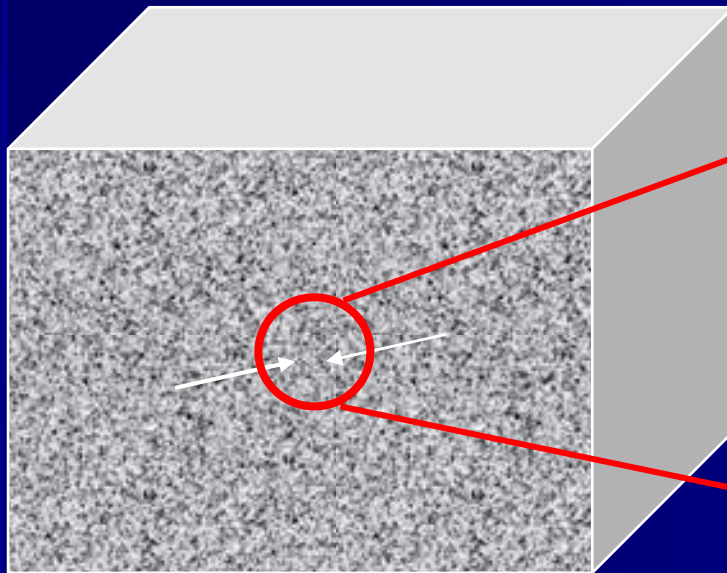


- Das 4er Set der „1. Baustein-Generation“ wiederholt sich genau zweimal



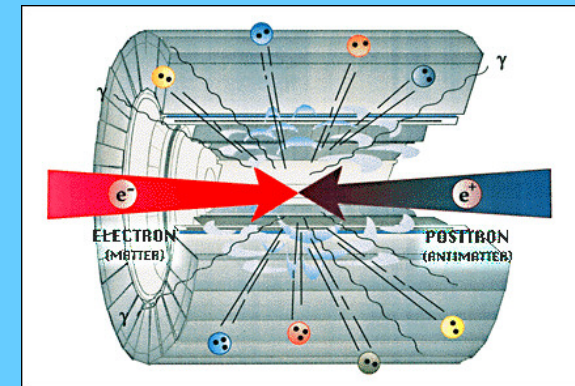
Zusammenhang Teilchenphysik - Kosmologie

heißes Universum



alle Teilchen haben hohe
Energie (Temperatur)
und kollidieren unkontrolliert

Teilchenkollision bei
hohen Energien



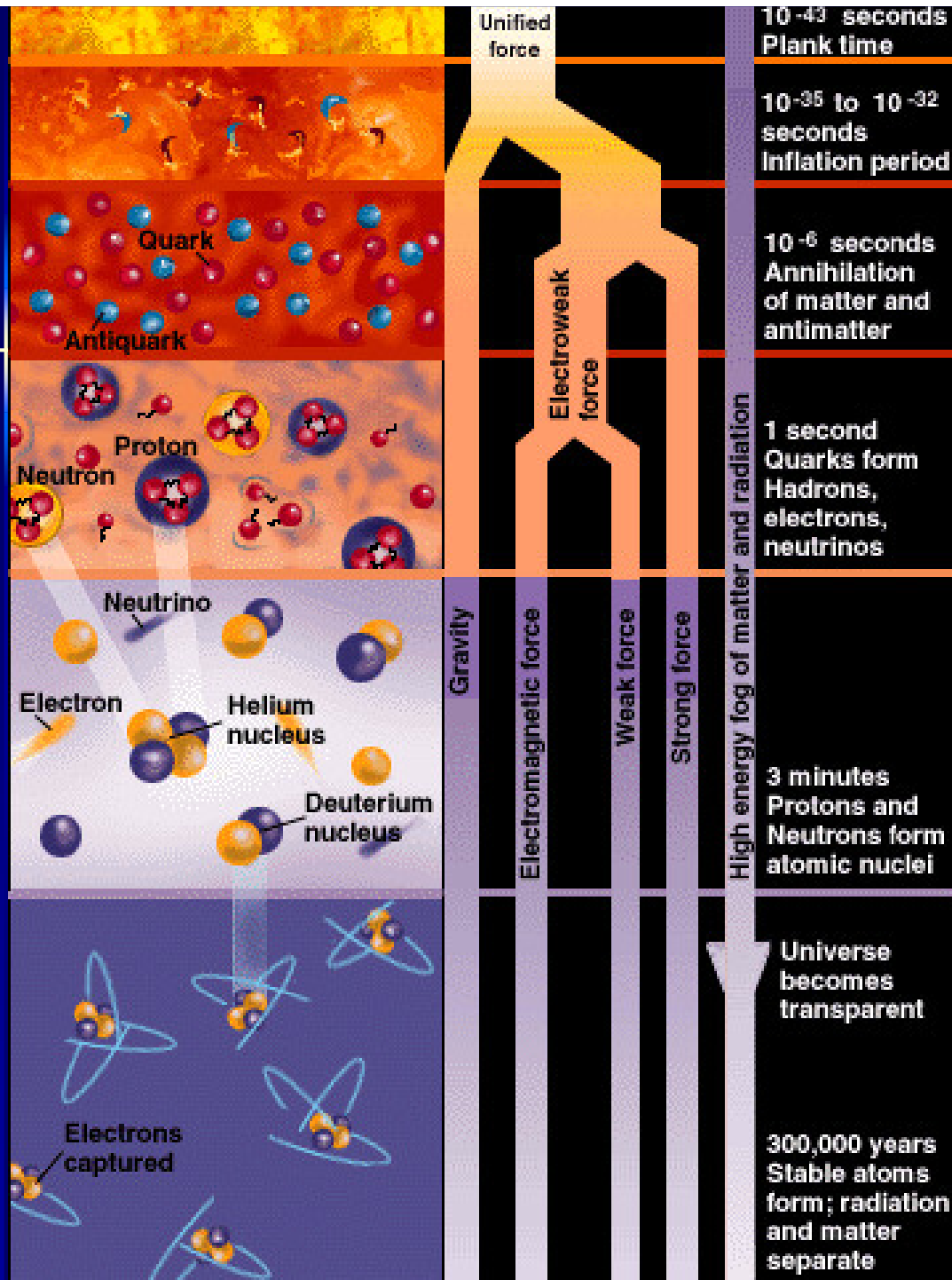
gezielte, kontrollierte
einzelne Kollisionen
und deren Aufzeichnung

Rückblick zum Urknall

Alter	Temperatur	Energie	Größe
10^{-43} s	10^{32} K	10^{19} GeV	Nadelspitze
10^{-36} s	10^{28} K	10^{15} GeV	Tennisball
10^{-24} s	10^{22} K	10^9 GeV	50 km
10^{-14} s	10^{17} K	10000 GeV	wie Sonne
10^{-10} s	10^{15} K	100 GeV	
10^{-6} s	10^{13} K	1 GeV	wie Sonnen- system
1s	10^{10} K	0.001 GeV	1 Lichtjahr
1 min	10^9 K	0.0001 GeV	50 Lichtjahre
1 Jahr	10^6 K	0.0000001 GeV	wie Milch- straße
100.000 Jahre	10.000 K	1 eV	1 Million Lichtjahre
heute	3 K	10^{-4} eV	10 Milliarden Lichtjahre

im Bereich von
Theorien

durch
Experimente
gesichert



The Big Bang

