

Grundlagenforschung und Gesellschaft

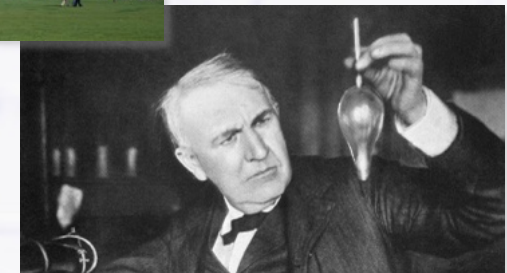
–

***am Beispiel des europäischen
Forschungszentrums
für Teilchenphysik
CERN***



Grundlagenforschung

- ist ein elementares Kulturgut des Menschen
- befriedigt die menschliche Neugier und den Drang, etwas Neues, Unbekanntes hinter dem bekannten Horizont zu finden
- schafft Wissen und Erkenntnisse über die tieferen Zusammenhänge der Natur und des Menschen
- dient keinen kommerziellen Zwecken und ist unvoreingenommen
- ist auf Finanzierung durch öffentliche Gelder angewiesen
- steht am Anfang einer Kette hin zur anwendungsorientierten Forschung bis zur Entwicklung konkreter Anwendungen



Grundlagenforschung

→ ...ist mehr als nur Erkenntnisgewinn

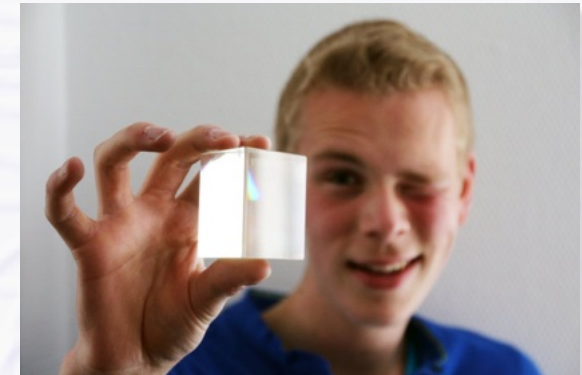
● Erkenntnisfortschritt benötigt Technologiefortschritt

- ♦ die meisten benötigten Technologien müssen erst entwickelt werden
- ♦ und führen oft zu Anwendungen ausserhalb der Grundlagenforschung



● Grundlagenforschung ist Talentschmiede

- ♦ Ausbildung von jungen Wissenschaftlern (Master-Studierende, Doktoranden, Post-Docs) im internationalen Umfeld
- ♦ erworbene Fähigkeiten können später gut in Industrie und Wirtschaft eingesetzt werden



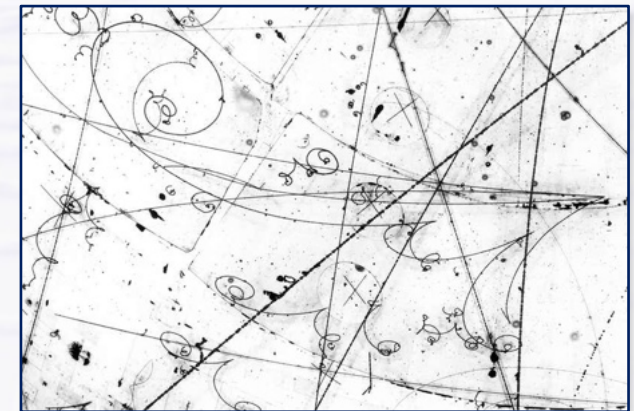
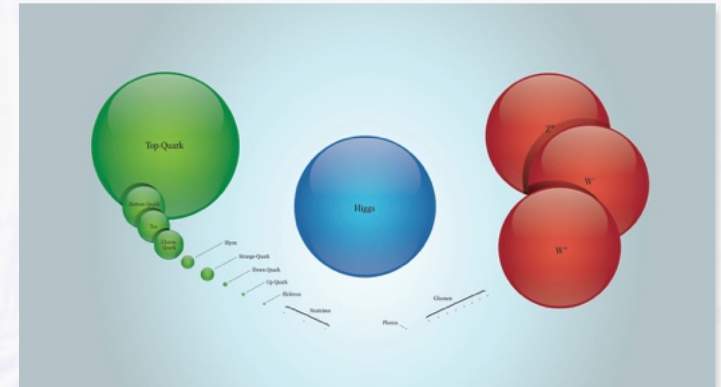
● Völkerverständigung: Brücken zwischen Nationen

- ♦ Grundlagenforschung ist international
- ♦ unterschiedliche Kulturen und Denkweisen ergänzen sich und haben gemeinsame Ziele



Teilchenphysik

- ist Teil der Grundlagenforschung
- befasst sich mit dem Aufbau und der Wechselwirkung von Materie



- versucht, elementare Fragen zu beantworten

- woraus bestehen wir?
- wie entstand unser Universum, wie hat es sich entwickelt?
- was sind die elementaren Bestandteile des Universums?



Geschichte des Universums

Der Urknall (Big Bang) war der Anfang von Raum und Zeit

→ Teilchenphysik bei hohen Energien (durch Beschleuniger) kann den Zustand des Universums nur **10^{-12} s nach dem Urknall erforschen**

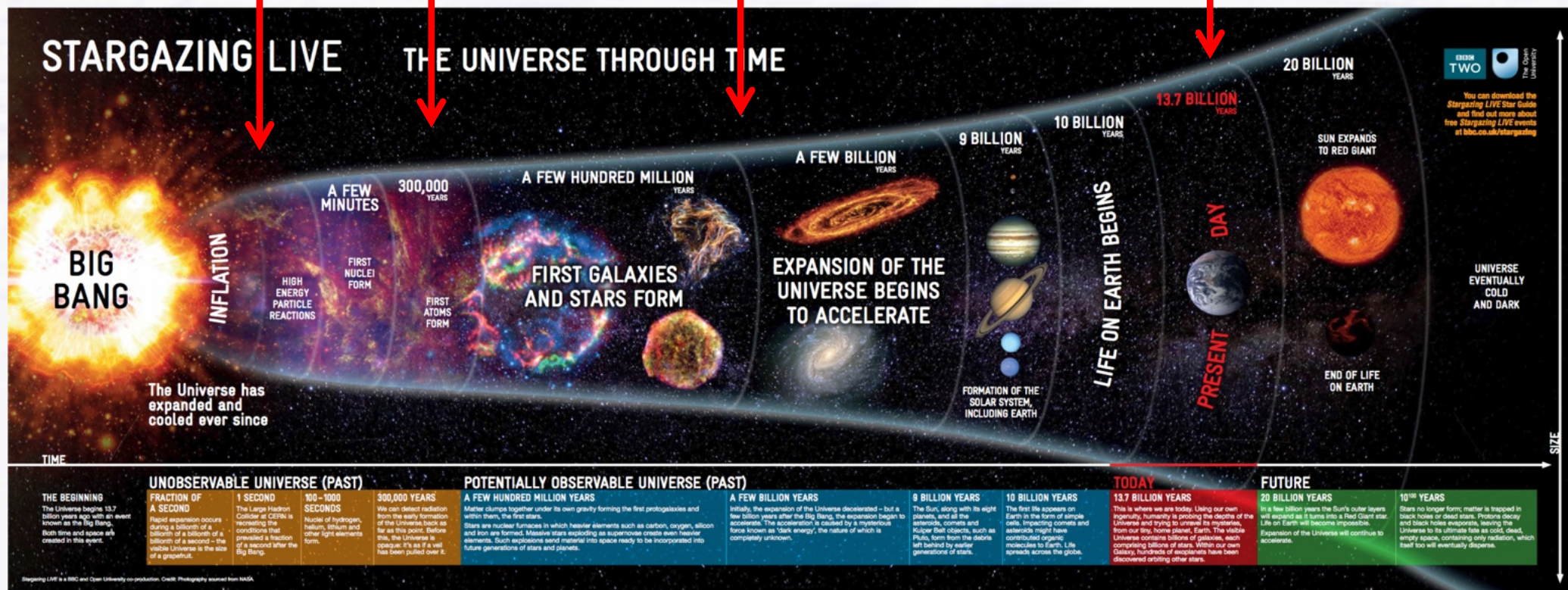
Die Energie in den Teilchenkollisionen ist die gleiche wie im frühen Universum

LHC

Satelliten

Teleskope

heute (13.7×10^9 Jahre nach dem Urknall)



Teilchenphysik und Technologie

● Teilchen-Beschleuniger

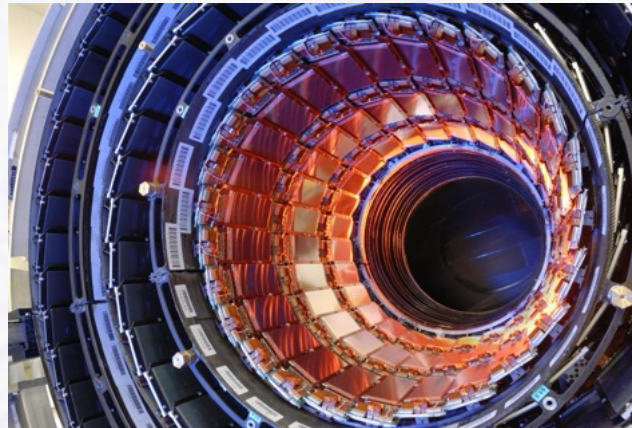
- Erzeugung verschiedener Teilchenarten
- Beschleunigung und Transport
- Speicherung und Führung von Teilchenstrahlen



CERN Large Hadron Collider LHC

● Teilchen-Detektoren

- Präzise Messung von Teilchenwechselwirkungen
- Simulation
- Rekonstruktion und bildgebende Verfahren



CMS Silizium Spurdetektor

● Computing

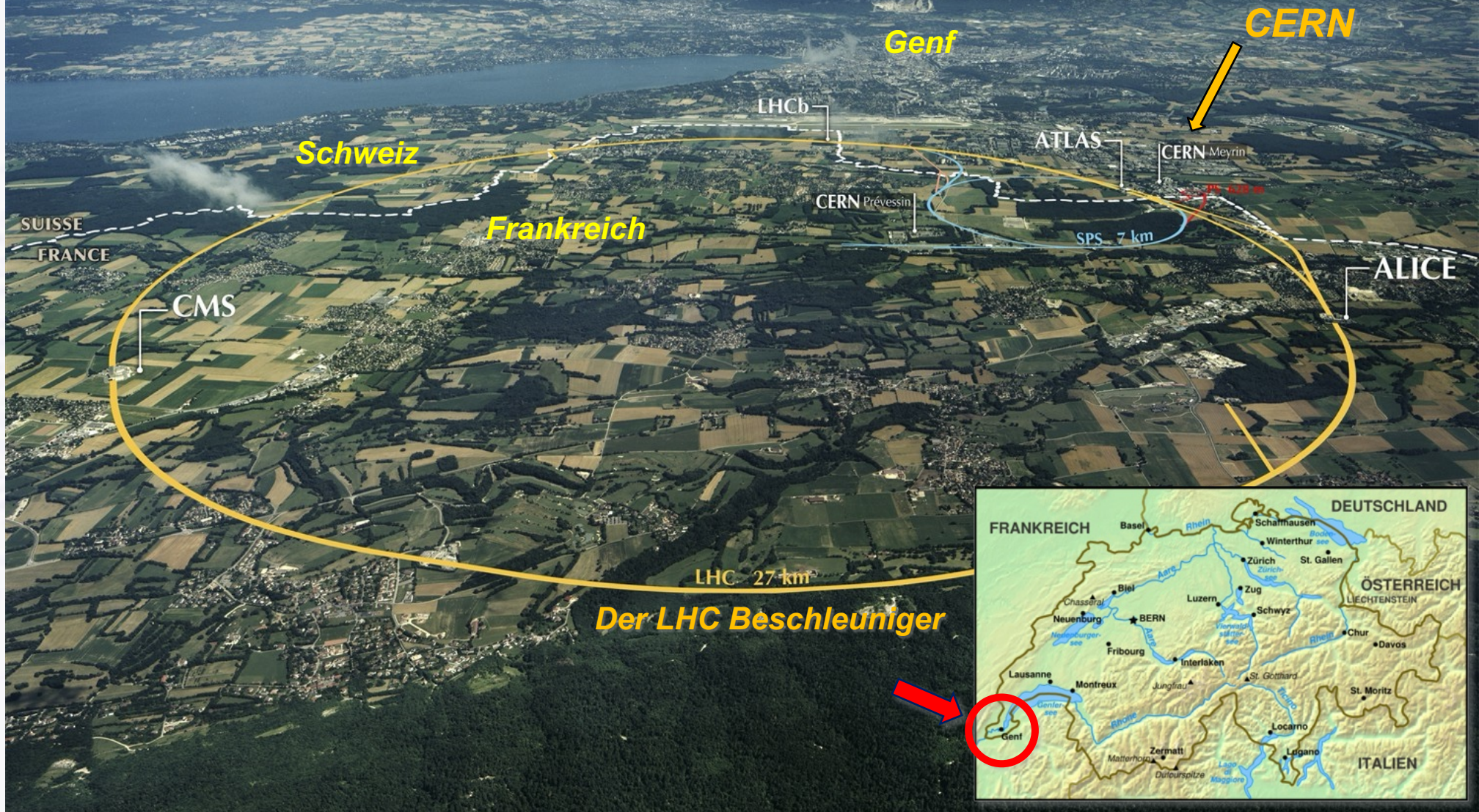
- Trigger und Datenprozessierung in Echtzeit
- Visualisierung
- Simulationsrechnungen
- verteiltes Rechnen (Cloud)
- Datenanalyse



CERN Computer Centre

CERN

Das europäische Forschungszentrum für Teilchenphysik
(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)



CERN wurde 1954 gegründet: 12 europäische Länder

“Wissenschaft für den Frieden”

Heute: 23 Mitgliedsländer (zuletzt: Serbien, 24. März 2019)

7 assoziierte Mitgliedsländer oder Beitrittskandidaten

(zuletzt: Litauen, 8. Januar 2018)

- ~ 2600 Staff (Angestellte)
- ~ 800 Fellows (Stipendiaten)
- ~ 13'500 “Benutzer” (Gastwissenschaftler)
- ~ 1000 weiteres Personal

Mitgliedsländer: Belgien, Bulgarien, Dänemark, **Deutschland**, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Israel, Italien, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowaken, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn

Assoziierte Mitglieder in der Vorstufe zur Mitgliedschaft:

Slowenien, Zypern

Assoziierte Mitglieder: Indien, Litauen, Pakistan, Türkei, Ukraine

Beobachter: Japan, Rußland, Vereinigte Staaten von Amerika;
Europäische Kommission, Joint Institute for Nuclear Research, UNESCO

Länder mit der Absicht auf (assoziierte) Mitgliedschaft:

Brasilien, Estland, Irland, Kroatien, Lettland



Der Beginn von CERN

● **1946**

- erste Ideen zur Gründung einer internationalen (europäischen) Wissenschaftsorganisation unmittelbar nach dem 2. Weltkrieg

● **Dezember 1949**

- erster konkreter Vorschlag bei der UNESCO Conference in Lausanne

● **Dezember 1951 und Februar 1952**

- Unterzeichnung eines Regierungsabkommen bei der UNESCO zur Gründung eines vorläufigen CERN Rates

● **4. Oktober 1952**

- vorläufiger CERN Rat entscheidet sich für Meyrin bei Genf als Standort (andere Vorschläge: Arnheim, Kopenhagen, Paris)
 - Gelände verfügbar, bereits existierende internationale Gemeinschaft, Neutralität

● **29. September 1954**

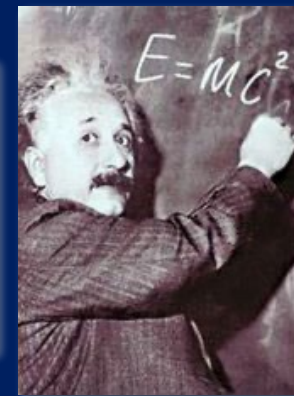
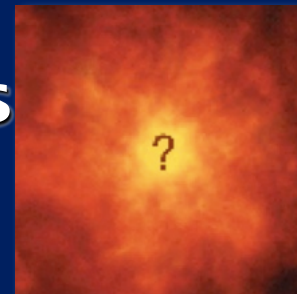
- Abkommen unterzeichnet von 9/12 Ländern, **offizieller CERN-Geburtstag**



Die Aufgaben von CERN

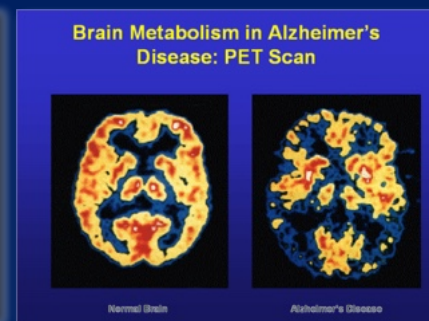
□ **Vorantreiben** der Grenzen des Wissens

den Urknall erforschen ...wie und was war die Materie in den ersten Momenten nach dem Urknall?

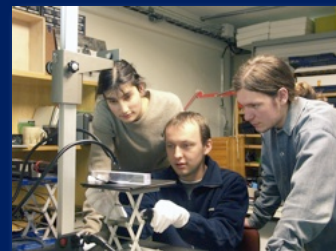


□ **Entwicklung** neuer Techniken für Beschleuniger und Detektoren

Informationstechnologie - das Web
Medizin - Diagnose und Therapie



□ **Ausbildung** von Wissenschaftlern und Ingenieuren von morgen



□ **Zusammenführen** von Menschen aus verschiedenen Ländern und Kulturen



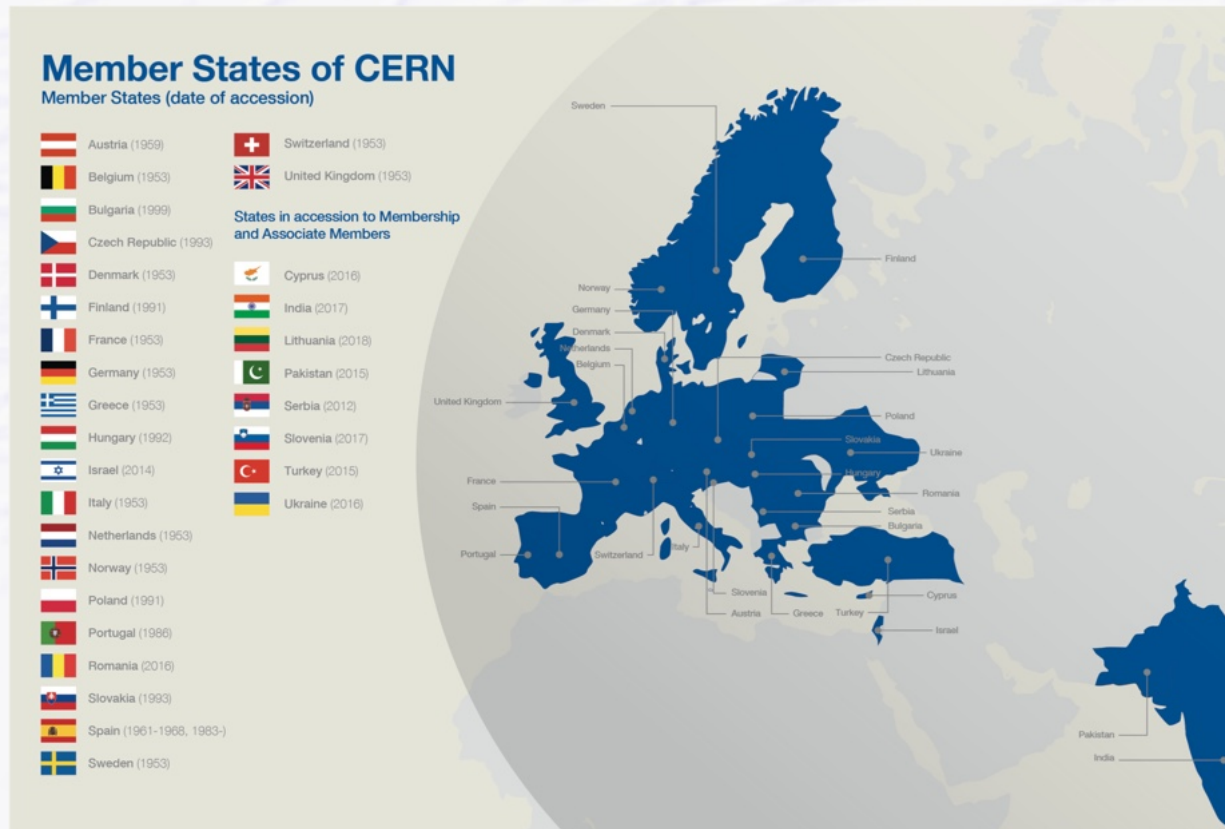
CERN Budget 2018: 1147 MCHF

(Mitgliedsländer: 1123 MCHF, Assoziierte Mitglieder: 24 MCHF)

→ umgerechnet ~1012 M€

↕ Universität Siegen zum Vergleich:
147,6 M€ (2017, mit Drittmitteln)
19'675 Studenten

→ anteilig nach Bruttoinlandsprodukt
der Mitgliedsländer



Mitgliedsland	Anteil [%]
Österreich	2.15
Belgien	2.71
Bulgarien	0.29
Tschechische Republik	0.93
Dänemark	1.80
Finnland	1.33
Frankreich	14.12
Deutschland	20.55
Griechenland	1.12
Ungarn	0.61
Israel	1.61
Italien	10.43
Niederlande	4.61
Norwegen	2.71
Polen	2.82
Portugal	1.11
Rumänien	1.02
Slovakische Republik	0.49
Spanien	7.04
Schweden	2.70
Schweiz	4.02
Großbritannien	15.84

Deutschland und CERN

- (West-)Deutschland ist einer der ersten 12 CERN Gründerstaaten (1954)

→ Werner Heisenberg (Nobelpreisträger 1932) (unterzeichnete CERN Vertragsurkunde)

- Teilchenphysik hatte immer eine hohe Bedeutung in Deutschland

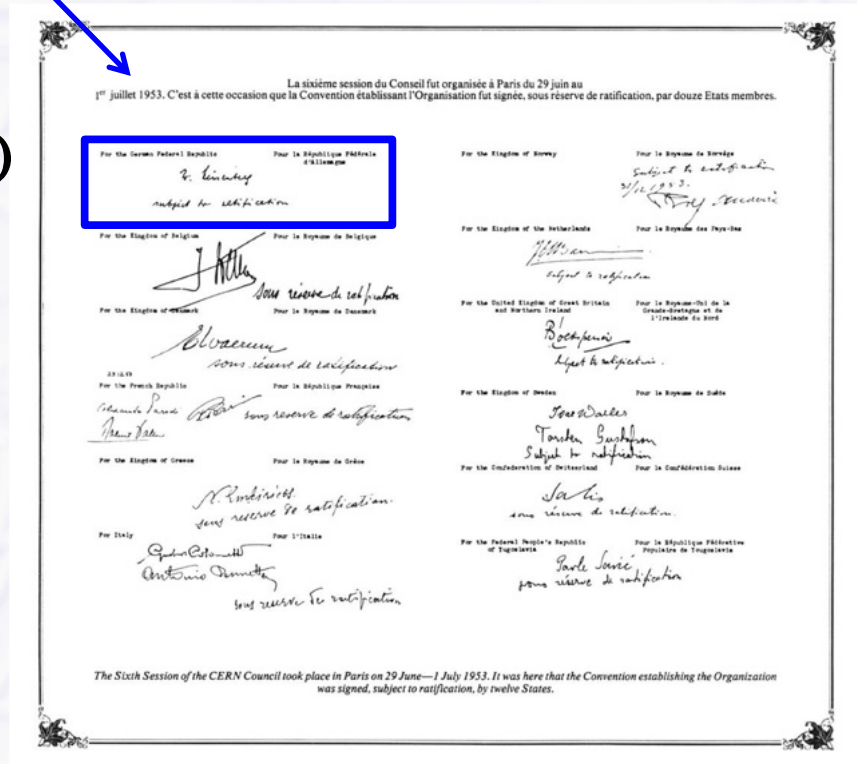
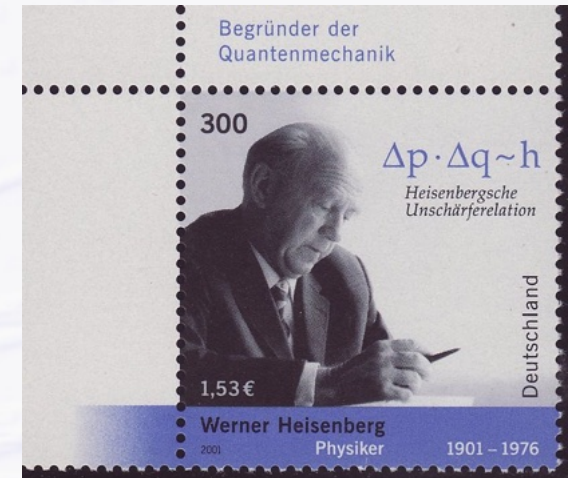
→ Nationales Labor: DESY (HH, Zeuthen)

→ Internationales Labor mit starker deutscher Beteiligung: CERN

- Zwei deutsche CERN General-Direktoren (beide vormals DESY)

→ **Herwig Schopper** (1981 – 1988)

→ **Rolf-Dieter Heuer** (2009 – 2015)



Teilchenphysik in Deutschland

- **Universitäten und Forschungszentren in Deutschland**
 - **Universitäten mit sowohl experimenteller und theoretischer Teilchenphysik: 14**
 - **Universitäten mit entweder experimenteller oder theoretischer Teilchenphysik: 12**
 - **Forschungszentren (Standorte) ausserhalb Universitäten: 6**

gelb: Universität (exp. und theo.)
grau: Universität (exp. oder theo. oder IT)
rot: Forschungszentrum (ausserhalb Universität)



Deutsche Prominenz am CERN



**Bundeskanzlerin Angela Merkel,
April 2008**



**Bundespräsident Joachim Gauck,
April 2014**

- **+ Ministerinnen für Bildung und Forschung (Johanna Wanka, Annette Schavan, Edelgard Bulmahn), weitere Landesminister, Staatssekretäre, Uni-Rektoren...**

Aufgabenteilung im CERN

- Hauptanteil der CERN Angestellten: **Ingenieure und Techniker**
 - nur 13% Physiker
- CERN ist beides:
Technologielabor + wissenschaftliches Zentrum
 - CERN Angestellte: **Technologie** (hauptsächlich)
 - Design, Bau und Betrieb grosser Beschleunigeranlagen (Infrastruktur “provider”)
 - CERN Gastwissenschaftler aus Universitäten und anderen Forschungszentren: **Wissenschaft** (hauptsächlich)
 - Design, Bau, Betrieb der Teilchendetektoren und Physikdatenanalyse
- Teilchenkollisionspunkt ist Schnittstelle zwischen CERN Angestellten und Gastwissenschaftlern
 - Erzeugung der Kollisionen
 - CERN Angestellte
 - Vermessung und Analyse der Kollisionen
 - Gastwissenschaftler



Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018

**13'342 CERN Gastwissenschaftler aus Instituten
in 78 Ländern (~9.9% Deutsche) und mit 111 Nationalitäten**

MEMBER STATES

7889

Austria	117
Belgium	120
Bulgaria	96
Czech Republic	244
Denmark	67
Finland	111
France	868
Germany	1342
Greece	237
Hungary	76
Israel	65
Italy	2045
Netherlands	168
Norway	67
Poland	350
Portugal	127
Romania	134
Slovakia	124
Spain	447
Sweden	85
Switzerland	228
United Kingdom	771

OBSERVERS

2718

Japan	314
Russia	1187
USA	1217

ASSOCIATE MEMBERS

745

India	357
Lithuania	35
Pakistan	65
Turkey	173
Ukraine	115

ASSOCIATE MEMBERS IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

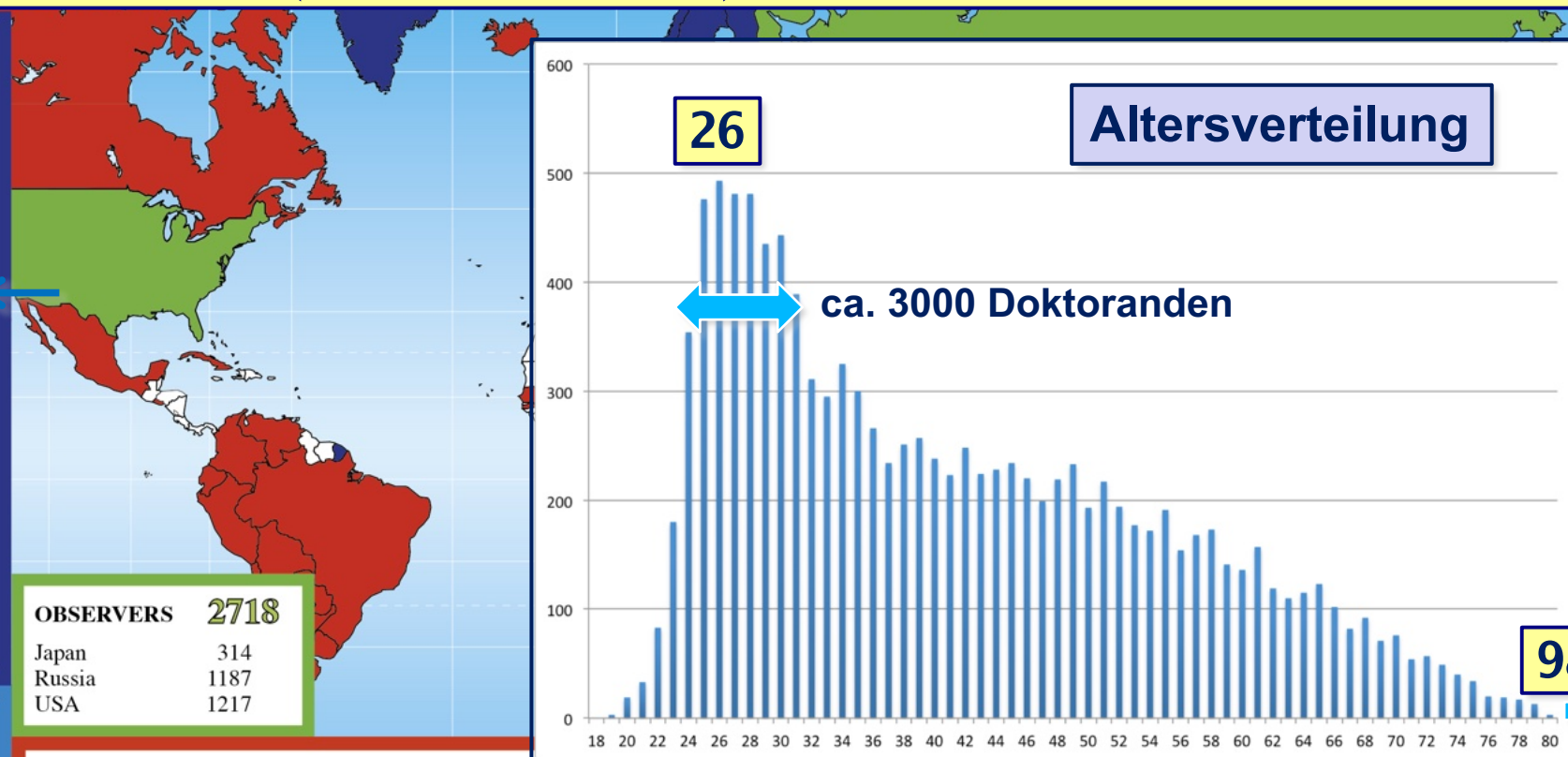
118

Cyprus	26
Serbia	57
Slovenia	35

OTHERS

1872

Bolivia	4	Egypt	31	Kazakhstan	5	Mongolia	2	Philippines	3	Thailand	22
Bosnia & Herzegovina	2	El Salvador	1	Kenya	3	Montenegro	11	Saint Kitts and Nevis	1	T.F.Y.R.O.M.	2
Brazil	135	Estonia	15	Korea Rep.	185	Morocco	20	Saudi Arabia	2	Tunisia	5
Burundi	1	Georgia	46	Kyrgyzstan	1	Myanmar	1	Senegal	1	Uruguay	1
Albania	3	Ghana	1	Latvia	2	Nepal	10	Singapore	4	Uzbekistan	4
Algeria	14	Hong Kong	1	Lebanon	23	New Zealand	5	South Africa	56	Venezuela	10
Argentina	27	Iceland	3	Luxembourg	2	Nigeria	3	Sri Lanka	6	Viet Nam	13
Armenia	19	Indonesia	11	Madagascar	4	North Korea	1	Sudan	1	Zambia	1
Australia	31	Iran	51	Malaysia	15	Oman	3	Swaziland	1	Zimbabwe	2
Azerbaijan	10	Iraq	1	Malta	9	Palestine (O.T.)	7	Syria	1		
Bangladesh	11	Ireland	16	Mauritius	1	Paraguay	2	Taiwan	51		
Belarus	48	Jordan	1	Mexico	82	Peru	7				
Benin	1	Ecuador	6								



Ausbildungsprogramme am CERN

- **Summer Students (2 – 3 Monate, ~350 Studenten)**
 - Studierende im 3. – 4. Jahr,
70% Physik – 30% Ingenieurwissenschaften und Informatik
 - 5 Wochen Vormittags-Vorlesungen + Arbeit in einer CERN Gruppe (kleines Projekt)
- **Technical Students (6 – 12 Monate, ~200 Studenten)**
 - Masterstudenten in technischen Bereichen
 - **Sonderprogramm Baden-Württemberg** (einige FHs + KIT) und **Rheinland-Pfalz**
- **Doctoral Students (3 Jahre, ~220 Studenten)**
 - Doktoranden mit technisch orientierten Themenbereichen
 - **Deutsches Sonderprogramm (Wolfgang-Gentner-Programm)**
- **Fellows (2 – 3 Jahre, ~850 Fellows)**
 - Junior-Fellowships: technischer Master, keine Promotion erforderlich
 - Senior-Fellowships: Promotion erforderlich oder >4 Jahre nach Master

Lehrer- und Schülerausbildung

- **High School Teachers Programme (HST)**

- 3 Wochen im Sommer, ~40-50 Teilnehmer/Jahr, auf Englisch

- **National Teacher Programmes (in Landessprache, 1 Woche)**

- 2017: 31 Kurse mit 952 Physik-Lehrern

- **S'Cool LAB**

- Experimente für Schüler

- ♦ Bau einer Nebelkammer
 - ♦ Röntgen-Röhre + Experimente
 - ♦ Supraleitung
 - ♦ Fadenstrahlrohr
 - ♦ ATLAS Magnetmodell

- 2017:

- ♦ 7240 Schüler aus 58 Ländern



CERN's wissenschaftliche Aufgaben

● Beantwortung fundamentaler Fragen

→ Warum haben Teilchen Masse (sind schwer)?

- Newton konnte dies nicht erklären, aber Higgs...



Higgs
Boson

→ Aus was besteht 96% des Universums?

- Nur 4% besteht aus Elementarteilchen, die wir kennen. Und der Rest???

→ Warum gibt es im Universum keine Antimaterie?

- Materie und Antimaterie sollte gleichermaßen nach dem Urknall entstanden sein. Es scheint nur Materie im Universum zu geben. Wo ist die Antimaterie?

→ Wie war der Zustand der Materie kurz nach dem „Urknall“?

- Wie hat sich unser Universum daraus entwickelt?

● Letztlichendlich: Warum gibt es uns überhaupt?

Die Teilchenwelt 1948

● Einige wenige “Elementarteilchen”

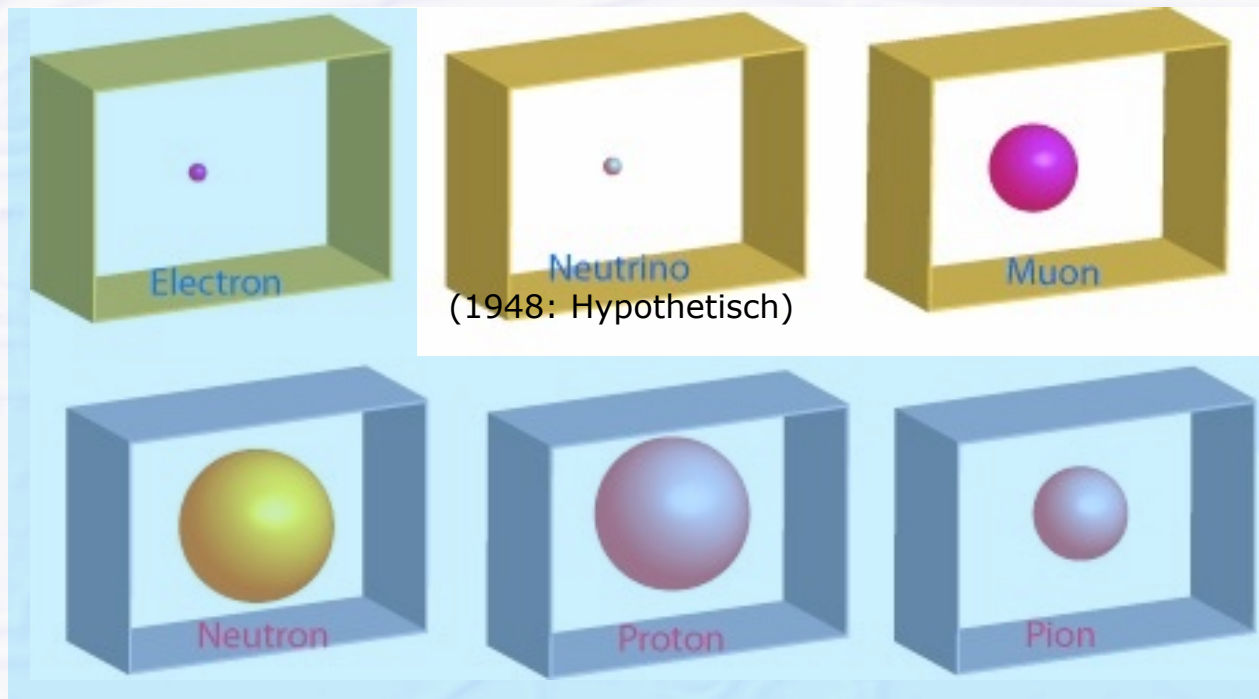
→ Bestandteile des Atoms

◊ **Elektron** = Hülle

◊ **Proton**, **Neutron** = Kern mit **Pion** als Teilchen, notwendig zum Zusammenhalt

→ **Neutrino** (hypothetisch) zur Erklärung des Betazerfalls der Neutronen

→ **Myon** in der Höhenstrahlung gefunden, aber unklare “Funktion”

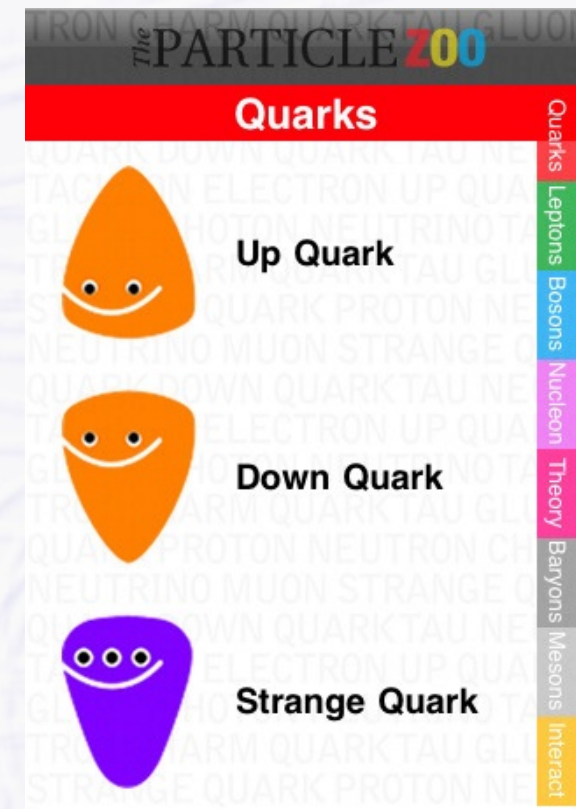
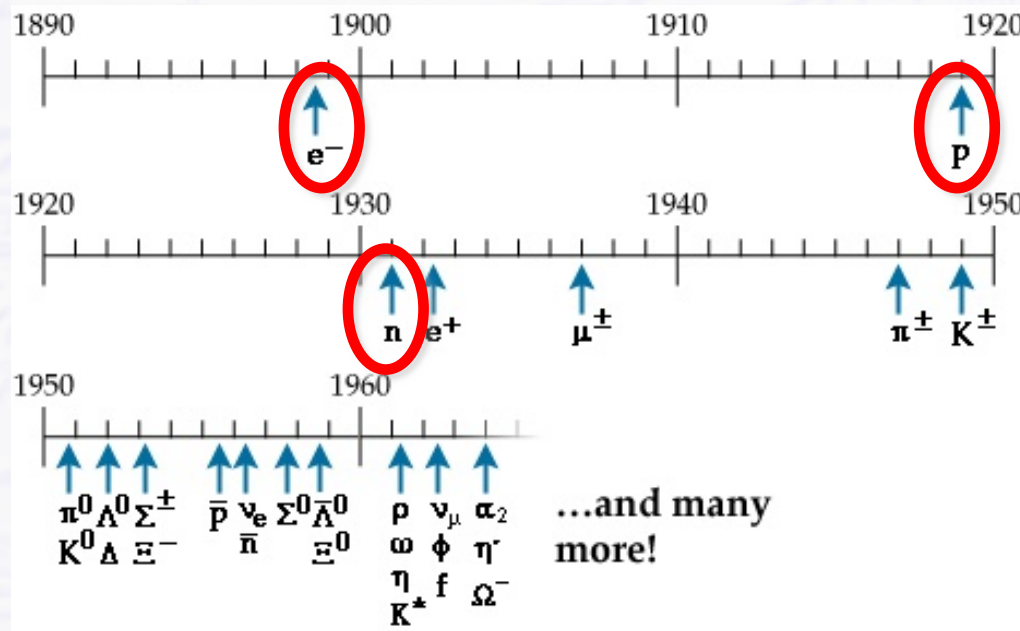


Teilchenphysik in den 1950...60ern

● Viele neue Teilchen wurden entdeckt (“Teilchenzoo”)

→ möglich gemacht durch immer stärkere Beschleuniger

→ 1959: CERN Proton Synchrotron (noch heute in Betrieb)



● Fundamentale Fragen

→ Was sind grundlegenden Bausteine der Materie? → **Quarktheorie** (1964)

→ Welche Kräfte wirken zwischen den Materieteilchen? → **Standardmodell**

→ Wie erhalten Teilchen ihre (verschiedene) Masse? → **Higgs** (1964/2012)

Aufbau der Materie

● Heutiges Wissen: Materie hat eine hierarchische Struktur

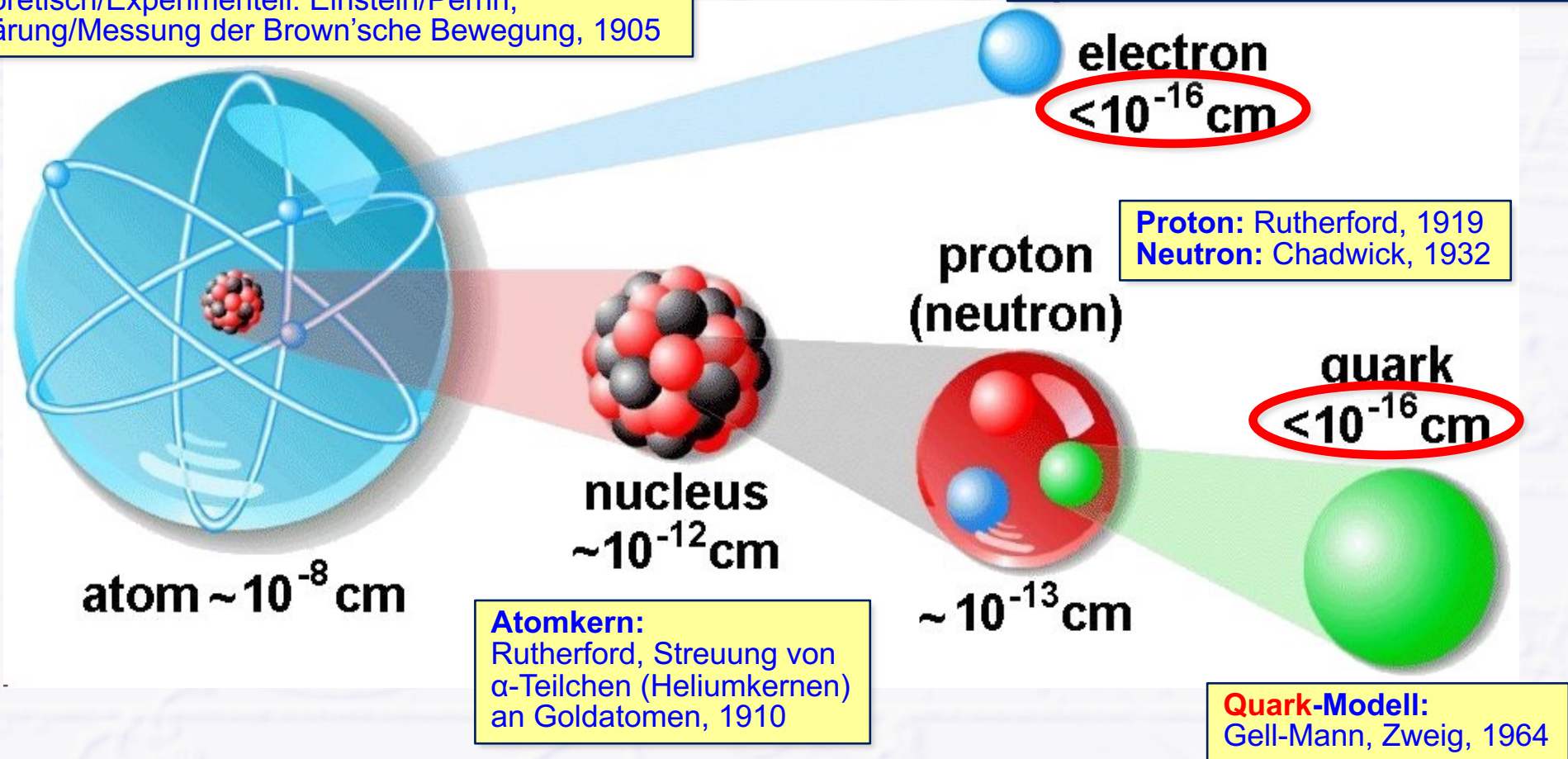
→ nur **Elektronen** und **Quarks** sind elementar (“punktförmig“)

Atom:

Philosophisch: Demokrit, 4. Jh. vor Christus
Theoretisch/Experimentell: Einstein/Perrin,
Erklärung/Messung der Brown'sche Bewegung, 1905

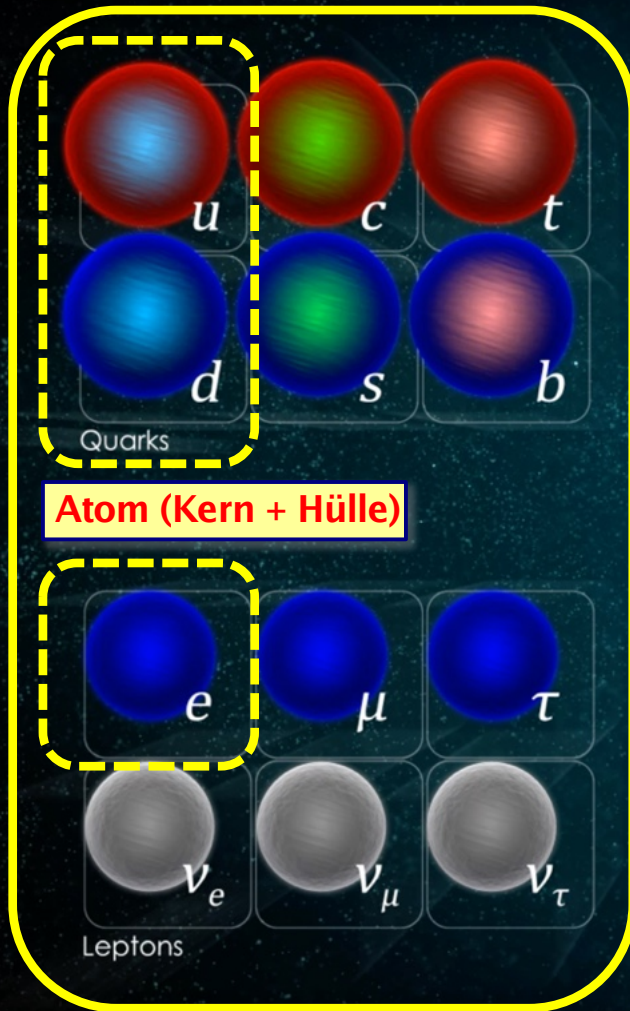
Elektron:

J.J. Thomson, Kathodenstrahlen, 1897



Das Standardmodell auf einen Blick

- Entwickelt seit den 1960er Jahren



Masse
(Higgs Teilchen)



Kräfte (Kraftteilchen)

Materie (Materieteilchen)

Antiteilchen

- Theoretische Vorhersage 1928 durch Paul Dirac

- kombinierte **Quantenmechanik** mit **Relativitätstheorie**
- fand Gleichung zur Beschreibung eines Elektrons...
 - ...und wunderte sich
- die Gleichung beschrieb **ein weiteres Teilchen mit umgekehrter Ladung**

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

- Vorhersage des Anti-Elektrons

- das **Positron**

Erstes ANTITEILCHEN!!!
zunächst noch theoretisch,
1932 entdeckt in kosmischer Strahlung



Paul Dirac
(1902-1984)
Nobelpreis 1933

Antimaterie

- Sehr populär seit Star Trek (Raumschiff Enterprise) und Illuminati
- Antiteilchen** verhalten sich wie normale Teilchen mit gleicher Masse aber mit umgekehrter Ladung



Name	Elektrische Ladung [e]	Masse [GeV/c ²]	Elektrische Ladung [e]	(Anti-) Name
Elektron	- 1	0.0005	+ 1	Positron
Proton	+ 1	0.938	- 1	Antiproton
Neutron	0	0.941	0	Antineutron

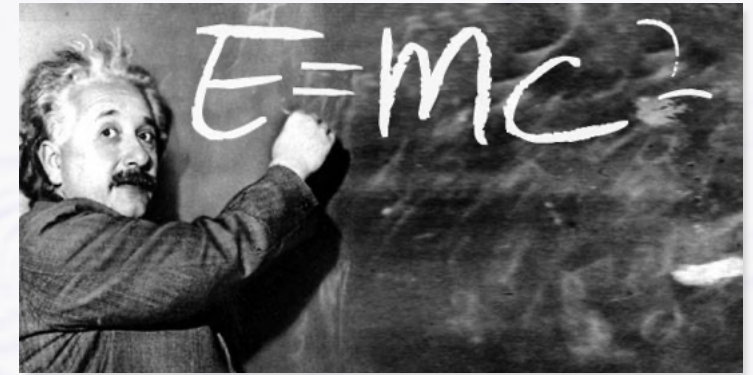
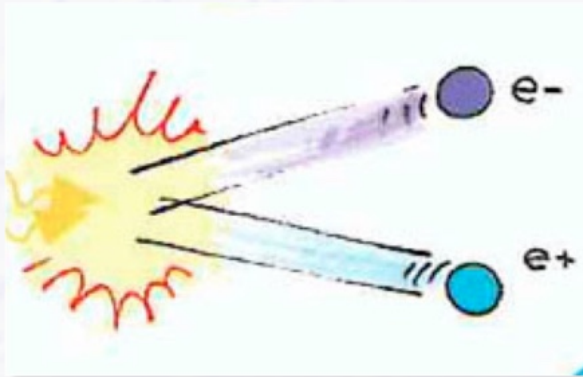
Neutron: Ladungen der Quarks im Neutron kehren sich um

Wasserstoff

Anti-Wasserstoff

Erzeugung von Antimaterie

● Umwandlung von Energie in Masse



$$E \rightarrow mc^2$$

● Produktion von Antiprotonen am CERN

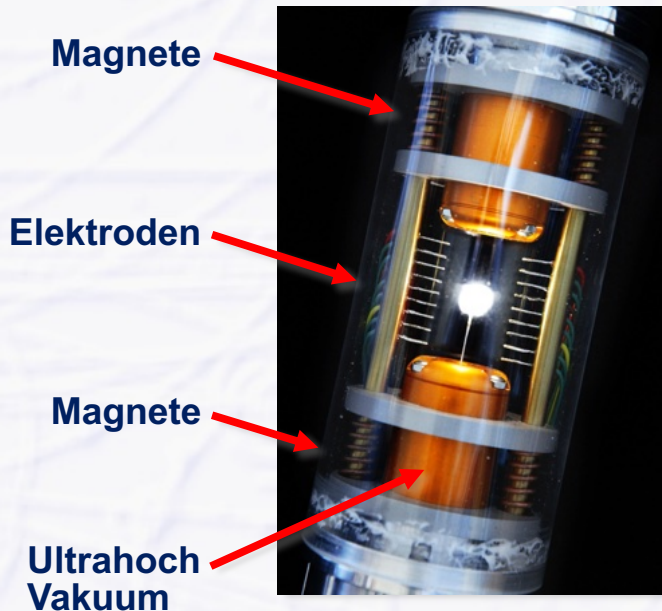
- intensiver Teilchen-Strahl mit hoher Energie (aus Beschleuniger) trifft auf Materieblock
- **Erzeugung** von neuen Teilchen und Anti-Teilchen aller Art
- **Aussortieren von Anti-Protonen** (Filterung durch Magnetfelder)
- **Verlangsamen der Anti-Protonen und Speicherung**



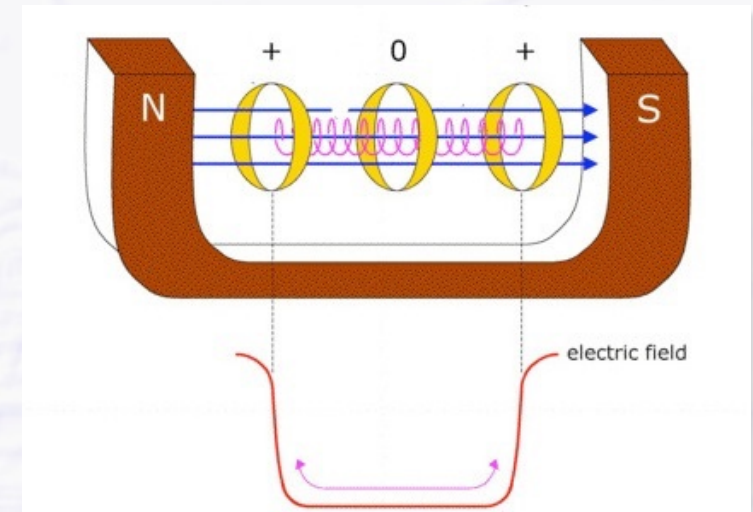
Speicherung von Antimaterie

● Speicherung in Antimaterie-„Falle“

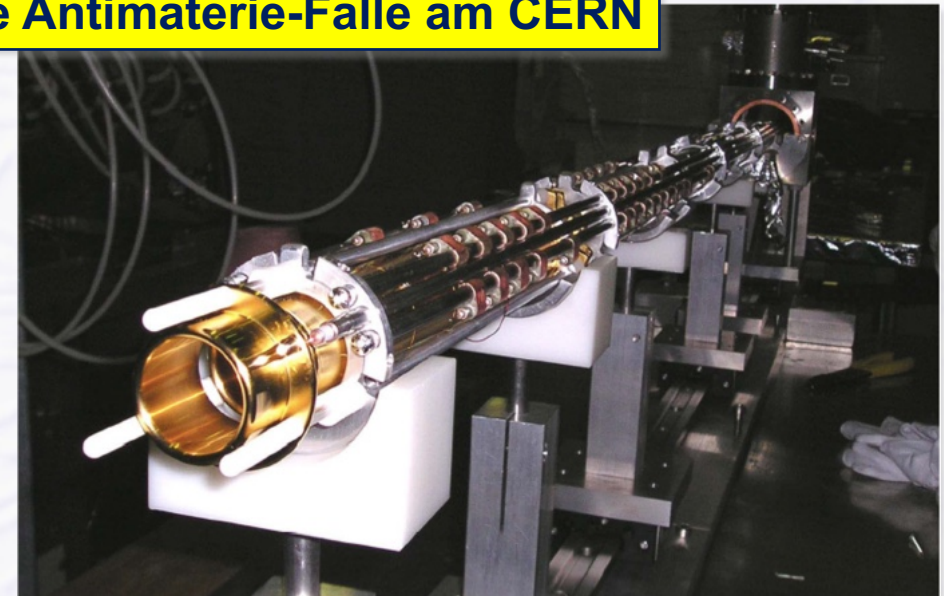
→ Kombination von magn.+ el. Feldern



Filmversion
aus „Illuminati“



Echte Antimaterie-Falle am CERN



→ Speicherdauer: ~viele Monate

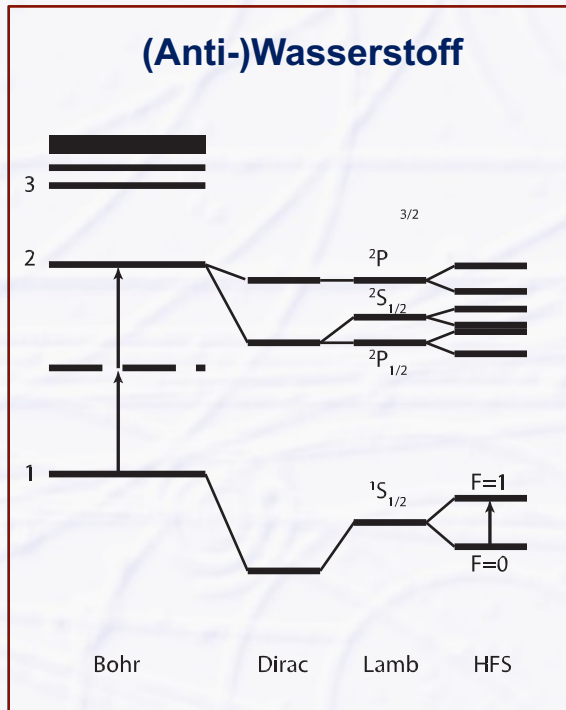
→ ~10 Millionen Anti-Protonen

◆ geplant: ~1 Milliarde Anti-Protonen

◆ = 0.000 000 000 000 002 Gramm (0.002 picogramm)

Grundlagenforschung mit Antimaterie

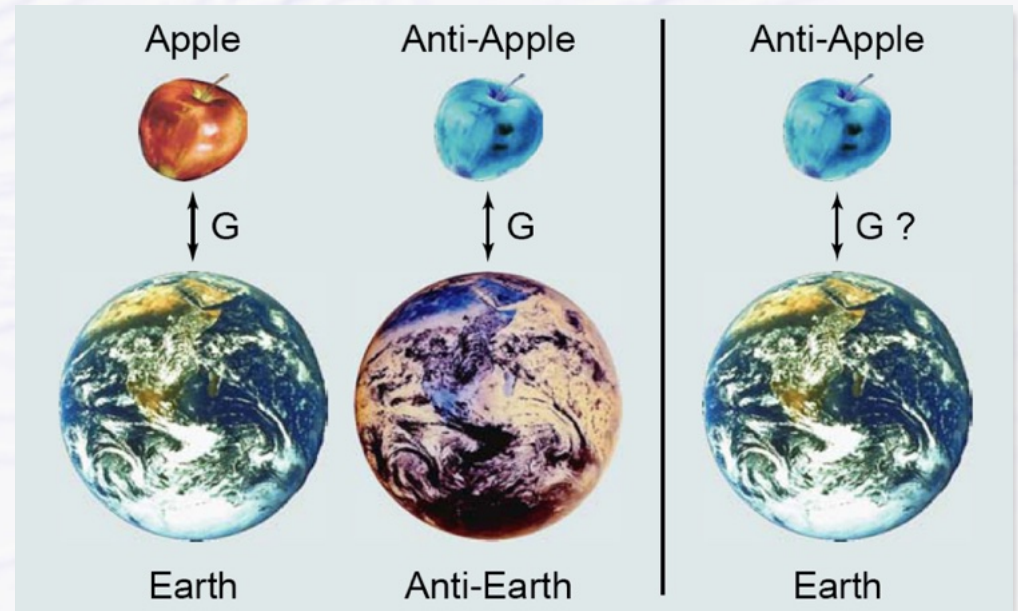
● Spektroskopie



● Gravitation

gemessen: erwartet:

unklar:



→ Vergleich der Spektren von Wasserstoff und Anti-Wasserstoff

• gibt es einen Unterschied?

→ Übereinstimmung auf $< 10^{-14}$

→ Keine Vorhersage für die Anziehung / Abstoßung von Materie und Antimaterie

→ **Antigravitation???**

→ bisher noch nicht gemessen

Anwendung von Antiteilchen

- Antiteilchen sind Alltag in der medizinischen Diagnostik!!!

- Positronen Emissions Tomographie (PET)

- ◊ entwickelt in den 1970er Jahren

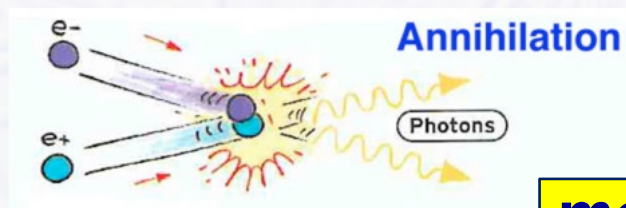
→ Verwendung von **radioaktiv markiertem Zucker**

- ◊ Zucker ist bevorzugt an Stellen hohen Energiebedarfs vorhanden

→ **Gehirn, Tumor**

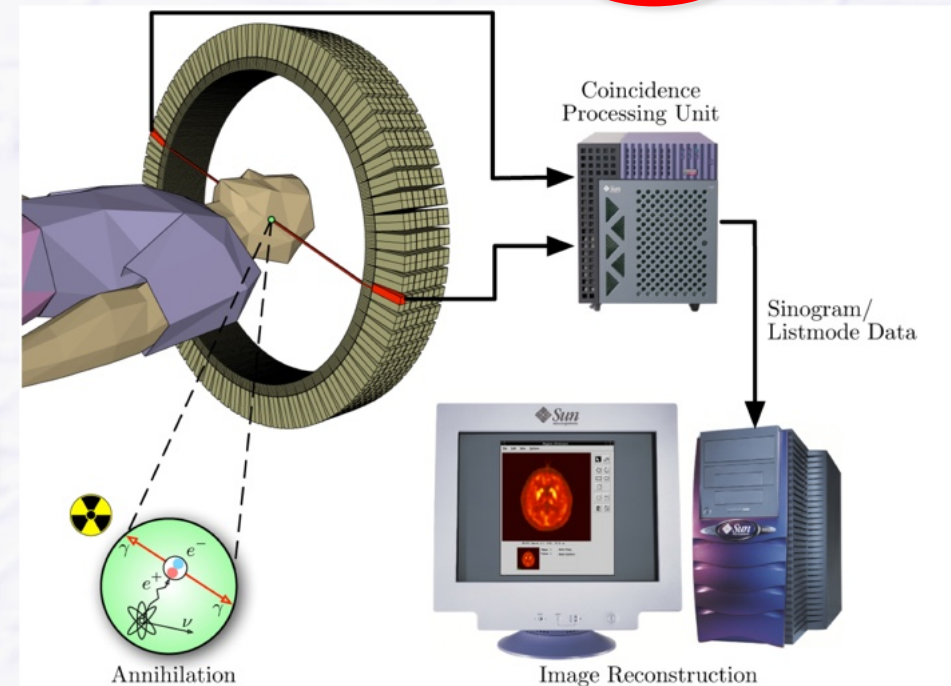
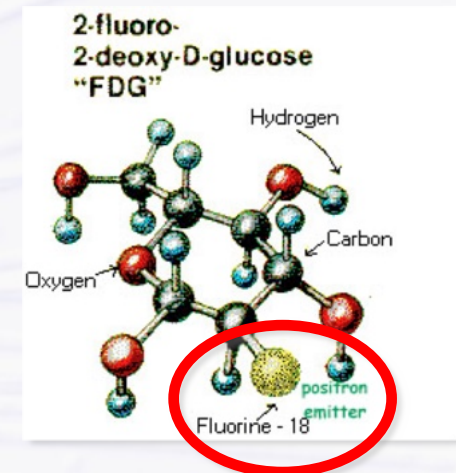
- ◊ **^{18}F Fluor zerfällt unter Aussendung eines Positrons (Antiteilchen!!!)**

- ◊ **Annihilation mit Elektron unter Aussendung zweier Photonen**



$$mc^2 \rightarrow E$$

- ◊ Nachweis der Photonen durch Detektor, damit **Rekonstruktion der Orte hohen Energiebedarfs im Körper**

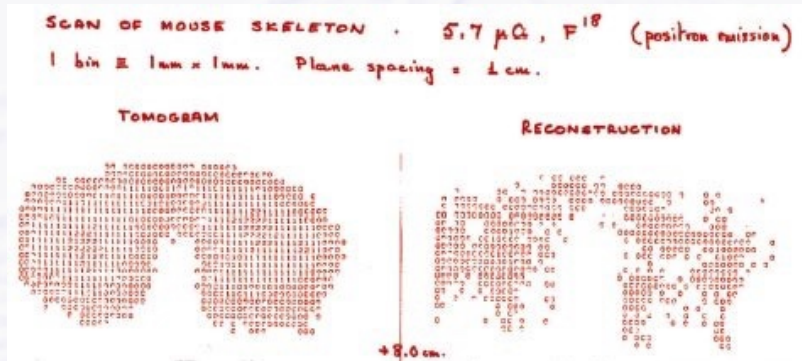


Positronen Emissions Tomographie

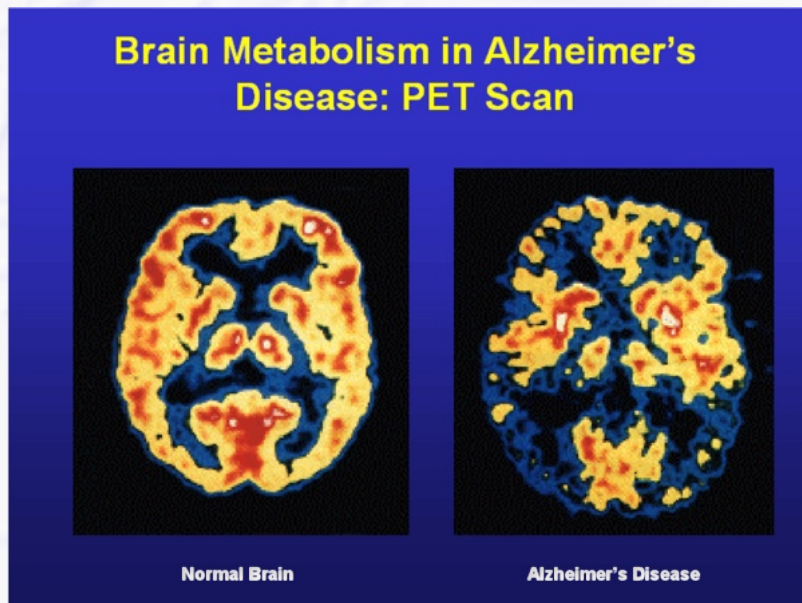
Visualisierung von Bereichen hohen Energiebedarfs im Körper

erster 2D PET Scan einer Maus am CERN 1977

heutige 3D Visualisierung

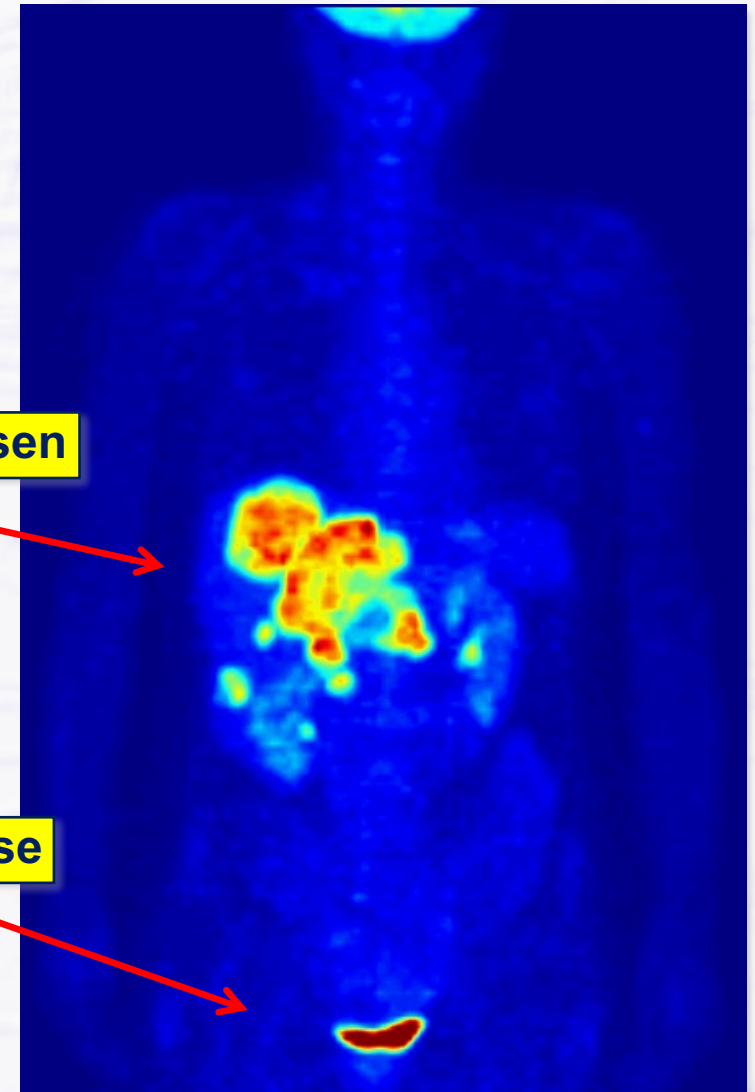


heutiger 2D PET Scan

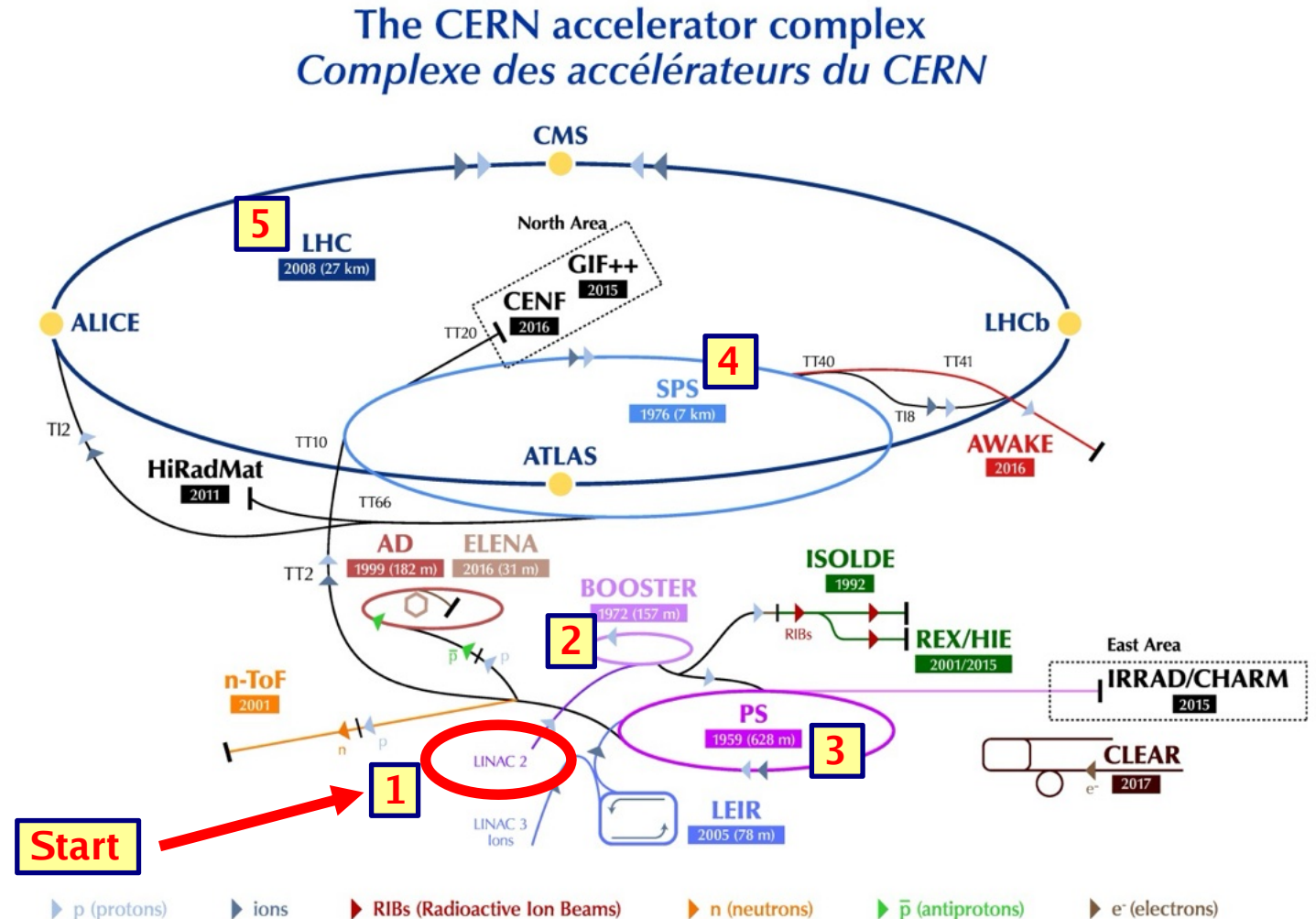
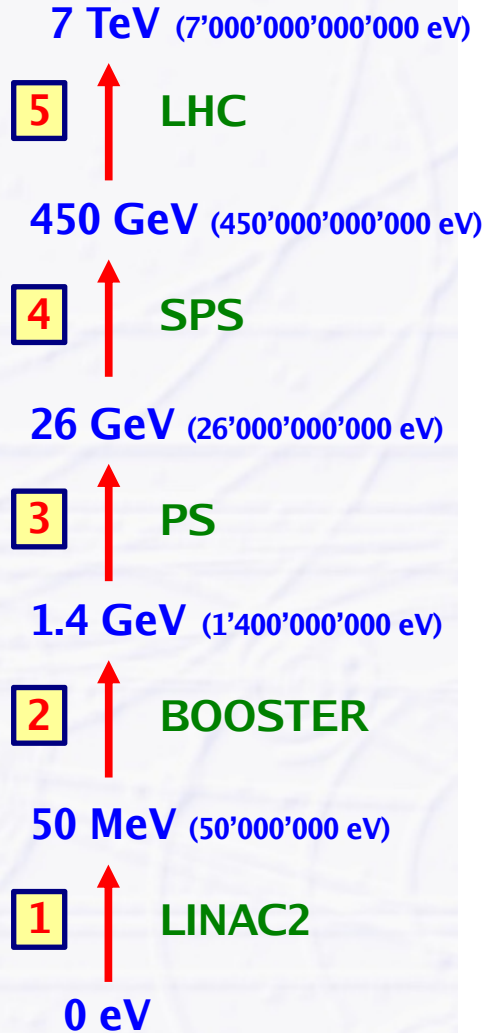


Leber-Metastasen

Urin in Blase



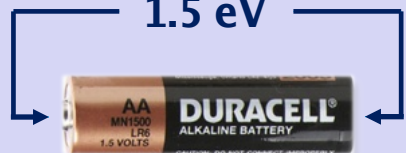
CERN Beschleuniger Komplex



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINEar ACcelerator // n-ToF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // CHARM - Cern High energy AcceleRator Mixed field facility // IRRAD - proton IRRADiation facility // GIF++ - Gamma Irradiation Facility // CENF - CErn Neutrino platForm

zum Vergleich:

1.5 eV



CERN Large Hadron Collider LHC

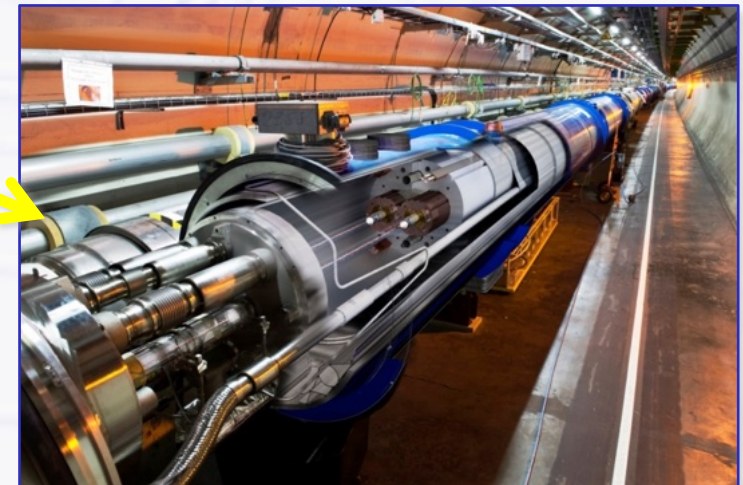
- Umfang: 27 km
- Tunnel mit 3.8 m Durchmesser
- 100 m unter der Erdoberfläche

● **Umfangreiche Spitzentechnologien**

- Supraleitung
- Magnete
- Vakuum
- Hochfrequenz
- Strahlkontrolle
- Sicherheit



- **Die meisten Technologien mussten erst entwickelt werden**



LHC in Zahlen

● 1232 Ablenkmagnete (Dipole)

→ Länge: 15 m, Gewicht: 35 t

→ Magnetfeld: bis **8.33 Tesla**

• entspricht 170'000-faches
Erdmagnetfeld

• typischer Magnet Resonanz Tomograph
MRT bis maximal 3 Tesla

→ Stromstärke: bis **11850 Ampere**
(Haushalt: bis 16 Ampere)

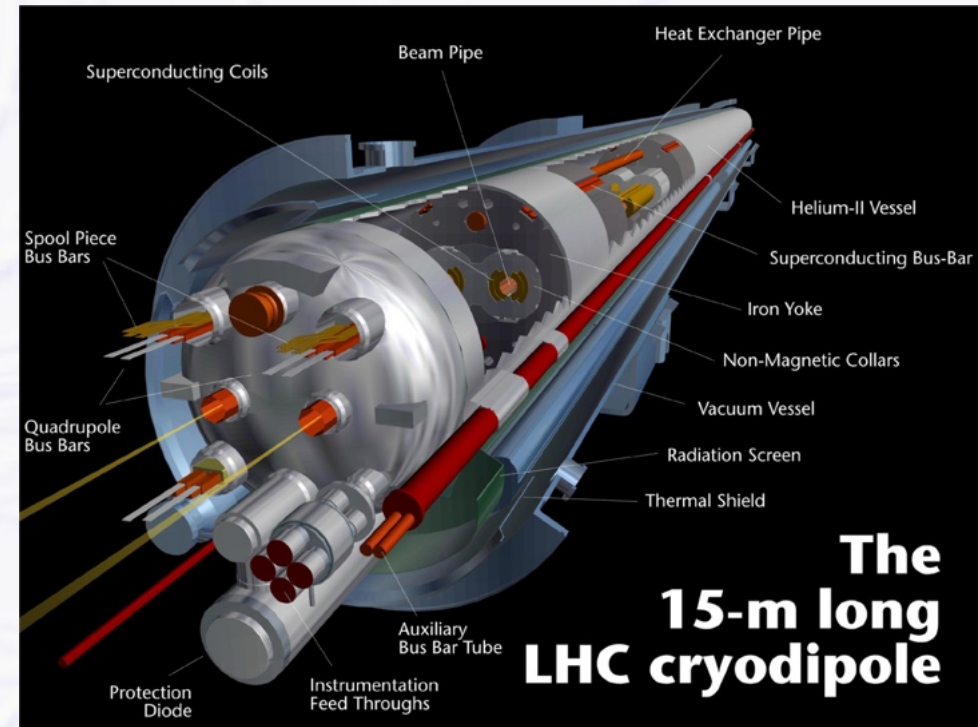
→ **1200 Tonnen NbTi supraleitendes
Kabel** mit 7600 km Länge

● gesamte Kaltmasse: **30'000 Tonnen**

→ **120 Tonnen suprafluides Helium** (1.9 K oder -271.3°C) zur Kühlung

● Vakuum: 10^{-10} mbar = 3 Millionen Moleküle pro cm^3

→ 10x besser als auf der Mondoberfläche



LHC Magnete

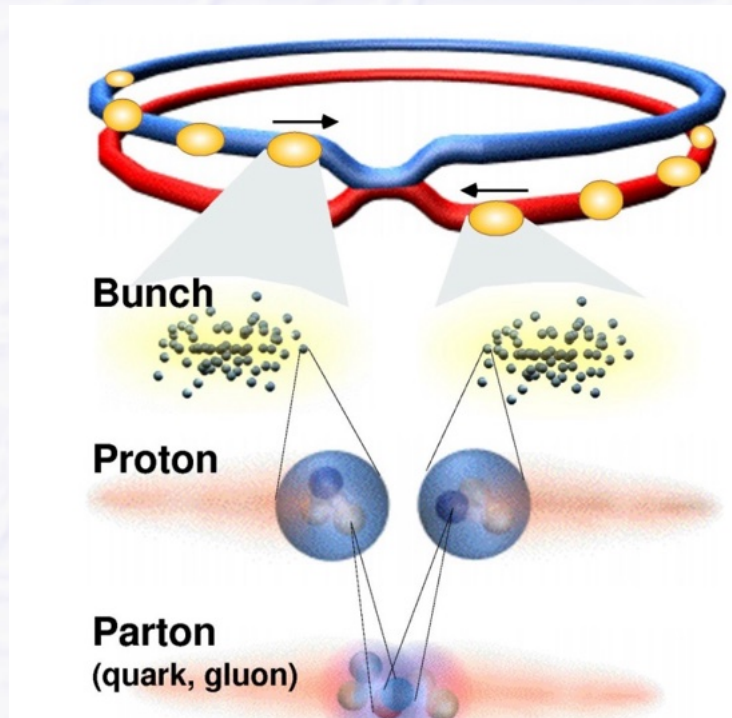
- **LHC Magnete sind ein komplexes High-Tech-Produkt mit hohen Anforderungen an Qualität und Präzision**
- **Entwicklung durch CERN, Fertigung durch europäische Industrie**
 - **1/3 Italien, 1/3 Frankreich, 1/3 Deutschland**
 - **wichtiger Technologietransfer zum Bau kostengünstiger, starker Magnete z.B. für Magnet-Resonanz-Tomographen**



Proton – Proton Kollisionen* im LHC

- * = Der LHC kann auch schwere Bleikerne (Schwerionen) beschleunigen und kollidieren lassen

→ Spezialexperiment für Schwerionenphysik: ALICE



Proton – Proton
(Design Parameter)

2808 x 2808 Protonenbündel (bunches)
mit 7.5 m Abstand (25 ns zeitlich)

1.1×10^{11} Protonen/Bündel

$\sim 10^9$ pp Kollisionen/s

= Überlagerung von ~ 50 pp-Kollisionen
pro Strahlkreuzung: **pile-up**

~ 1600 geladene Teilchen im Detektor
pro Strahlkreuzung

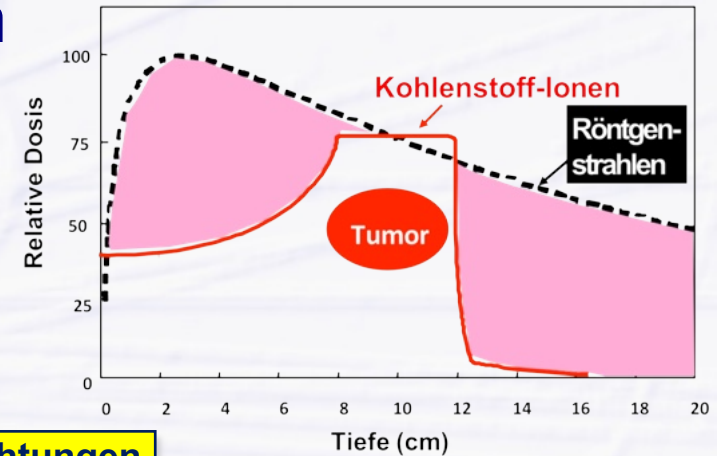


Hadron-Therapie

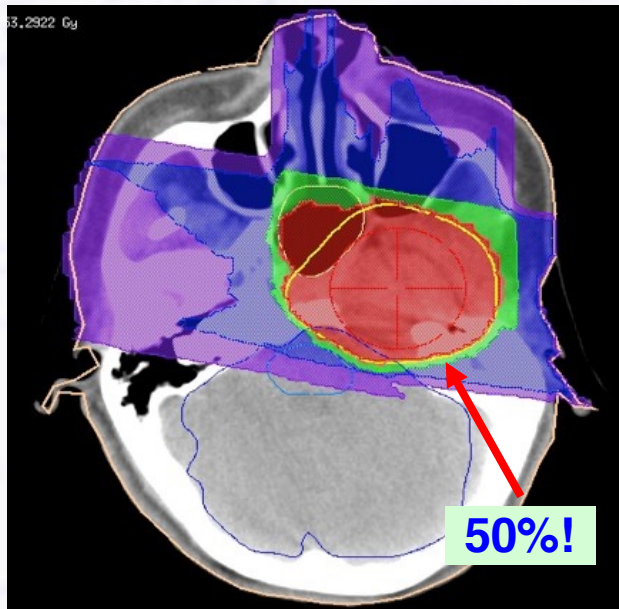
● Tumorbehandlung mit Protonenstrahlen oder (besser) Teilchenstrahlen aus Kohlenstoff-Ionen

→ Vorteile gegenüber Röntgenstrahlen

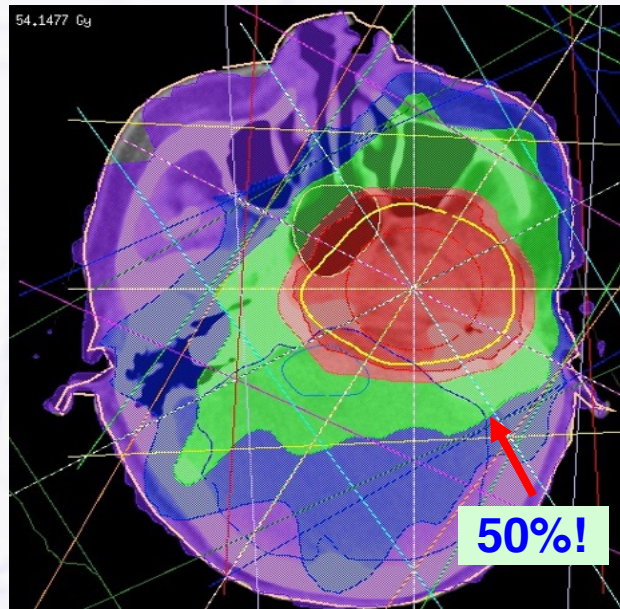
- ◊ Eindringtiefe steuerbar (über Energie der Ionen)
- ◊ dadurch maximale Energie gezielt auf Tumor
- ◊ weniger Schädigung gesunden Gewebes



Kohlenstoff-Ionen, 3 Richtungen

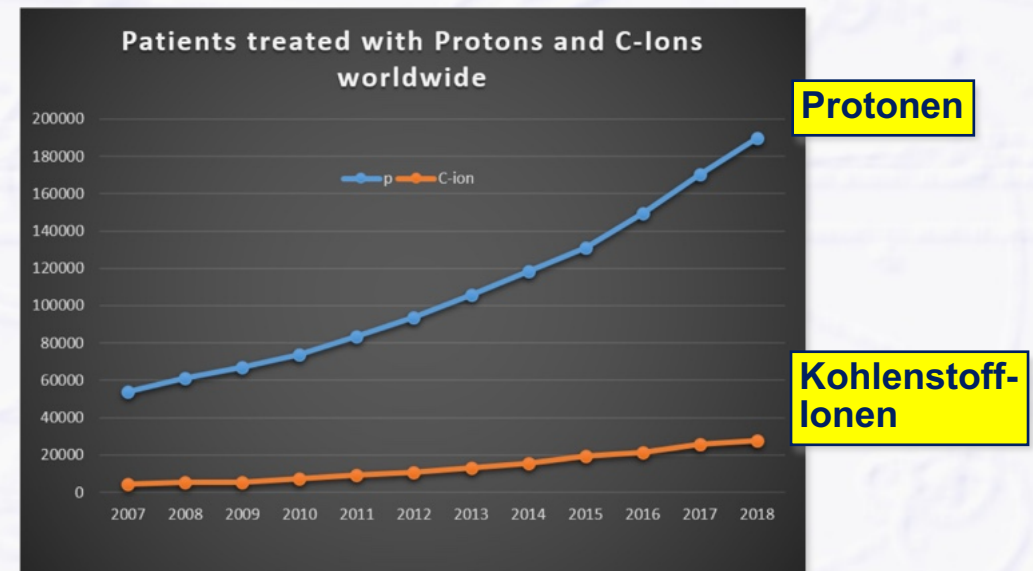
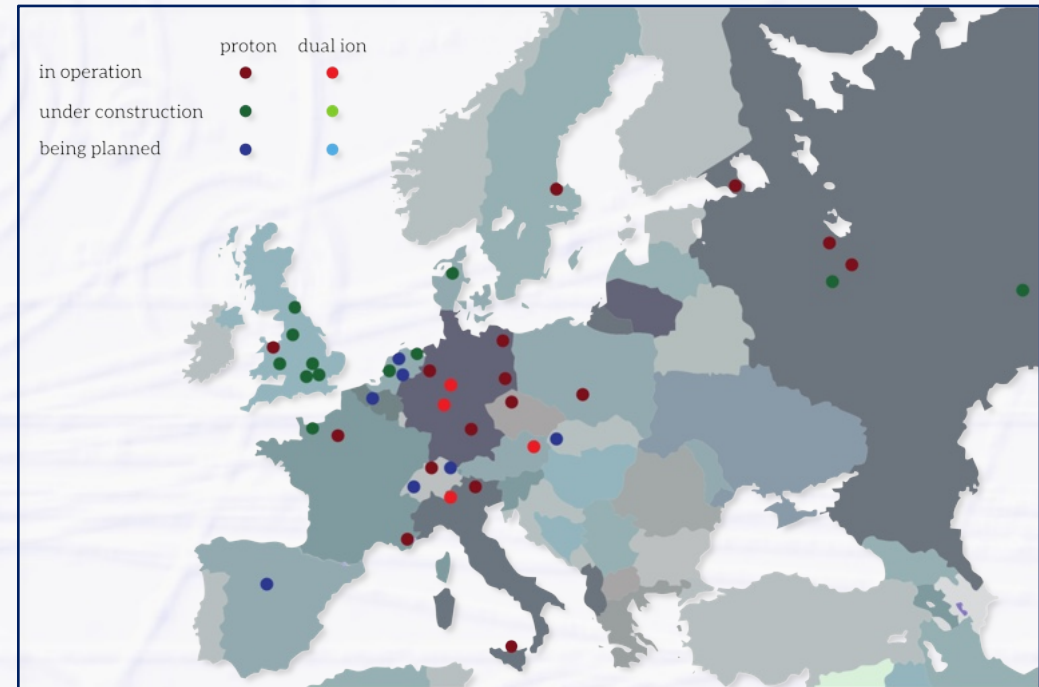


Röntgenstrahlung, 9 Richtungen



Hadron-Therapiezentren in Europa

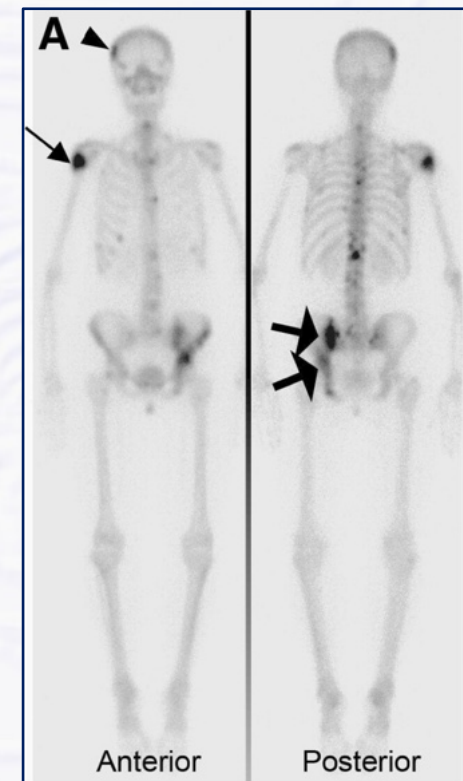
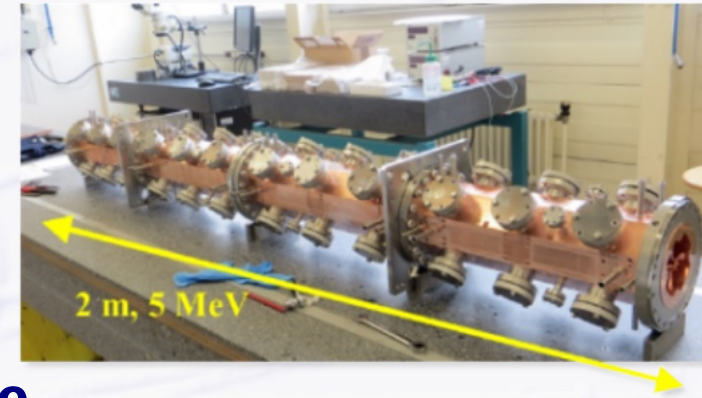
Austria	Med-AUSTRON, Wiener Neustadt	2017
Czech Republic	PTC Czech s.r.o, Prague	2012
United Kingdom	Clatterbridge	1989
France	CAL, Nice	1991
France	CPO, Orsay	1991
Germany	HZB, Berlin	1998
Germany	RPTC, Munich	2009
Germany	HIT, Heidelberg	2009, 2012
Germany	WPE, Essen	2013
Germany	PTC, Uniklinikum Dresden	2014
Germany	MIT, Marburg	2015
Italy	INFN-LNS, Catania	2002
Italy	CNAO, Pavia	2011
Italy	APSS, Trento	2014
Poland	IFJ PAN, Krakow	2011
Russia	ITEP, Moscow	1969
Russia	St. Petersburg	1975
Russia	JINR 2, Dubna	1999
Sweden	The Skandion Clinic, Uppsala	2015
Switzerland	CPT, PSI, Villigen	1984, 1996, 2013



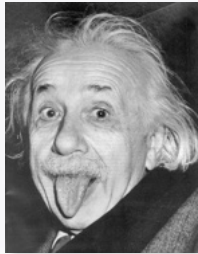
→ **220'000 Patienten weltweit behandelt (Stand: Ende 2018)**

Kompakter Beschleuniger

- Derzeitige Beschleuniger für Hadron-Therapie sind teuer in Bau und Unterhalt
- CERN Projekt eines kompakten Beschleunigers für medizinische Zwecke
 - erste Stufe eines Beschleunigers für Hadron-Therapie (2 m Länge)
 - Produktion von Radionukliden (5 – 10 m Länge)
 - ◊ ^{18}F für PET Scanner + andere Isotope
 - ◊ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ für Szintigraphie, z.B. Schilddrüse, Knochen
 - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ wird derzeit aus ^{99}Mo gewonnen
 - ◊ ^{99}Mo wird in nur 5 Kernreaktoren weltweit erzeugt (3 in Europa)
 - ◊ Reaktoren sind alt und werden bald außer Betrieb gehen
 - kompakter Beschleuniger ist Alternative
 - ◊ Vorteil: keine nuklearen Abfälle



Methoden der Teilchenphysik

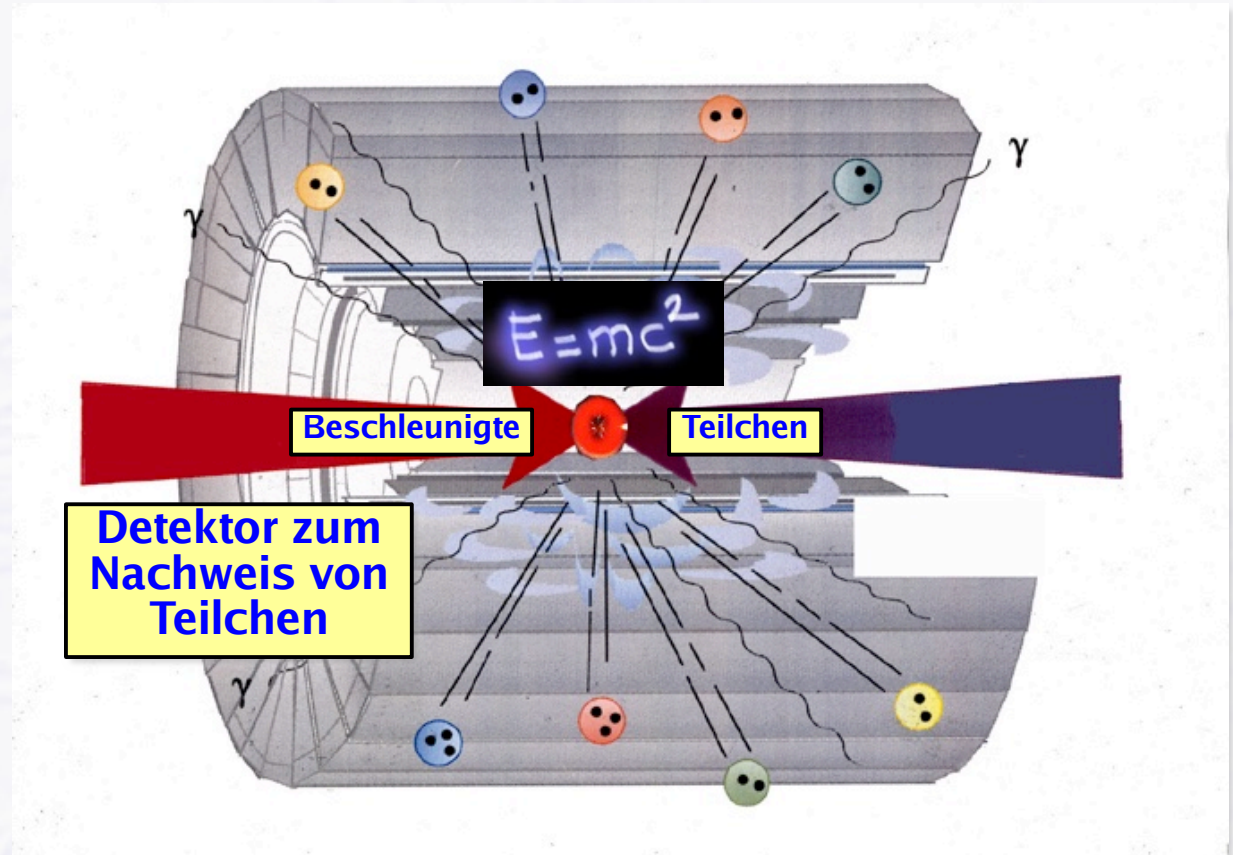


**Einstein
(1905):**

**Materie ist
konzentrierte Energie!**

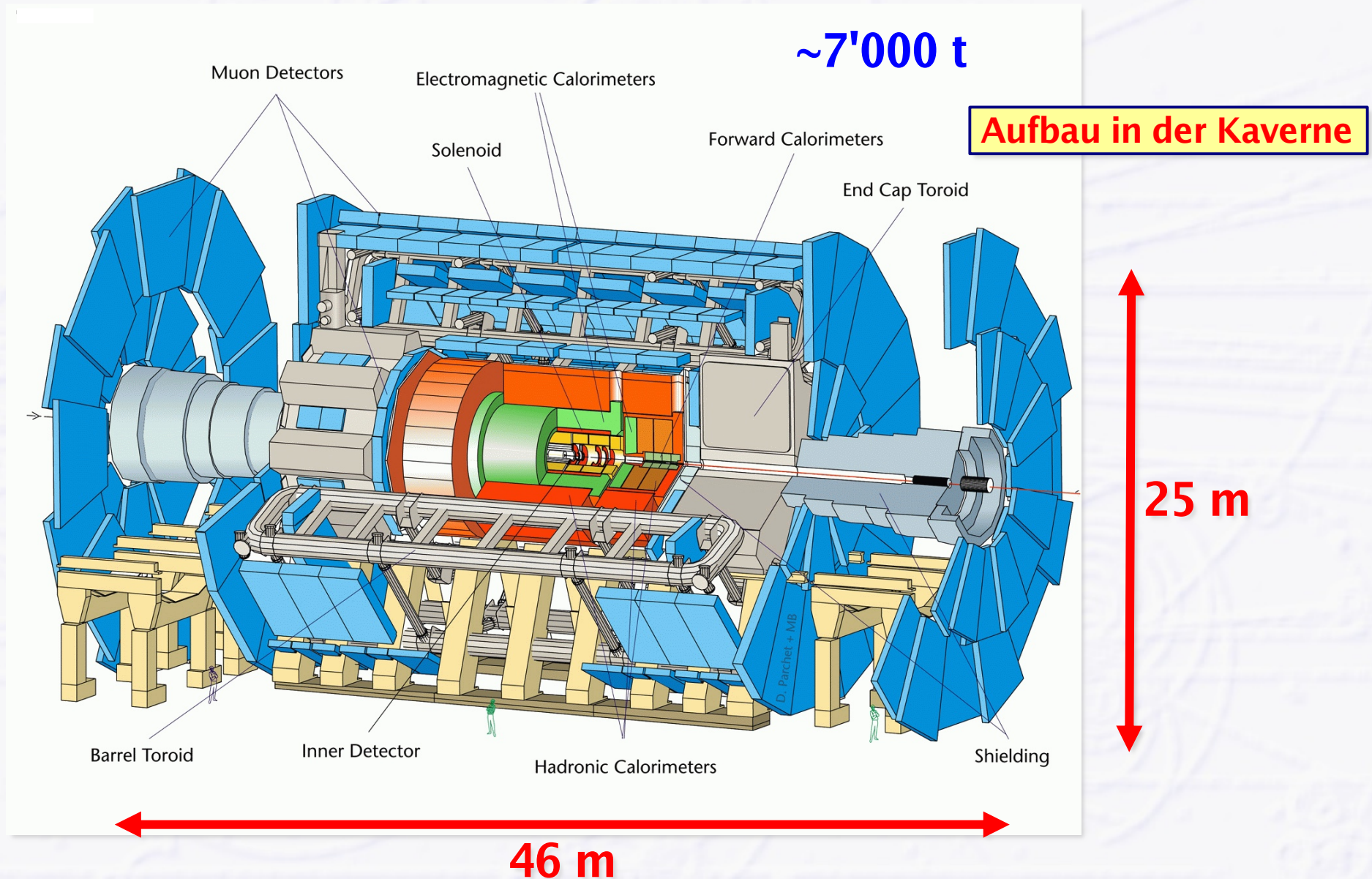
**Materie lässt sich in
Energie umwandeln
und umgekehrt!**

$$E = mc^2$$



- Dies nutzen wir bei einem Teilchenbeschleuniger
 - Protonen werden beschleunigt ⇒ kinetische Energie
 - Umwandlung der kinetischen Energie bei der Kollision in Materie
 - Neue Teilchen entstehen (neue Materie) und müssen vermessen werden

ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)

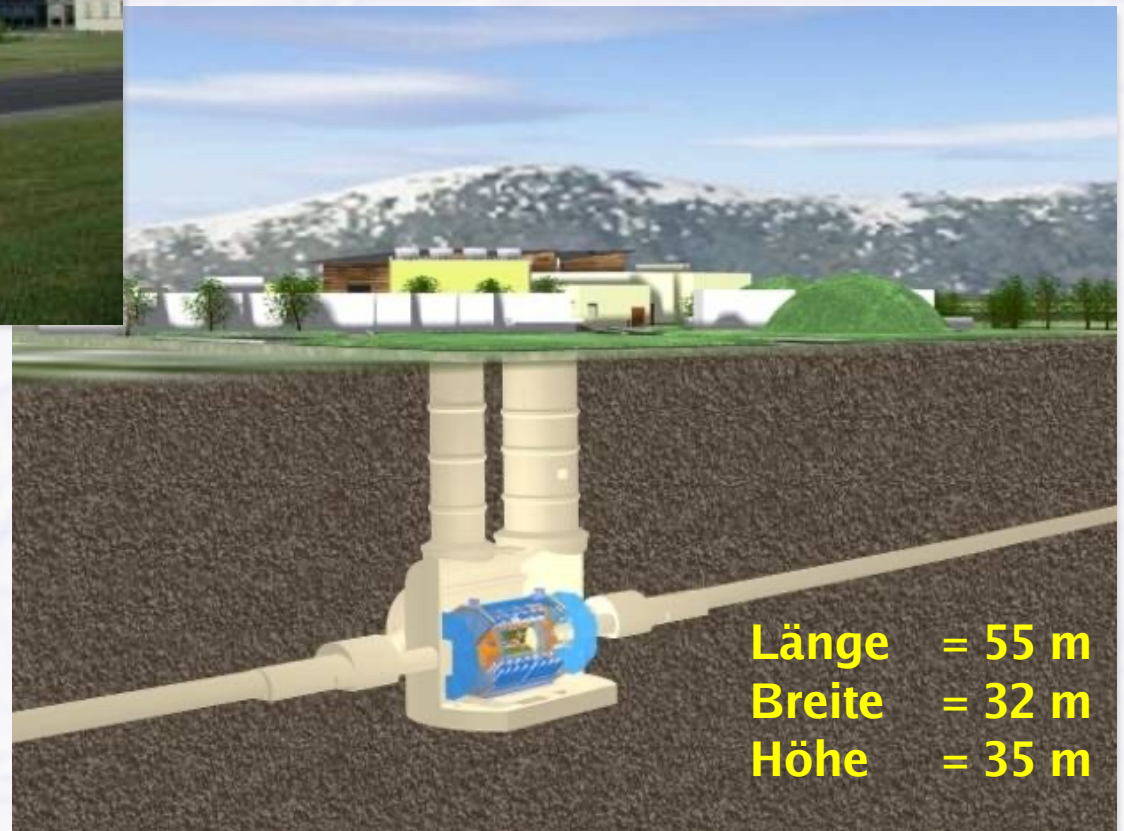


ATLAS unterirdische Kaverne



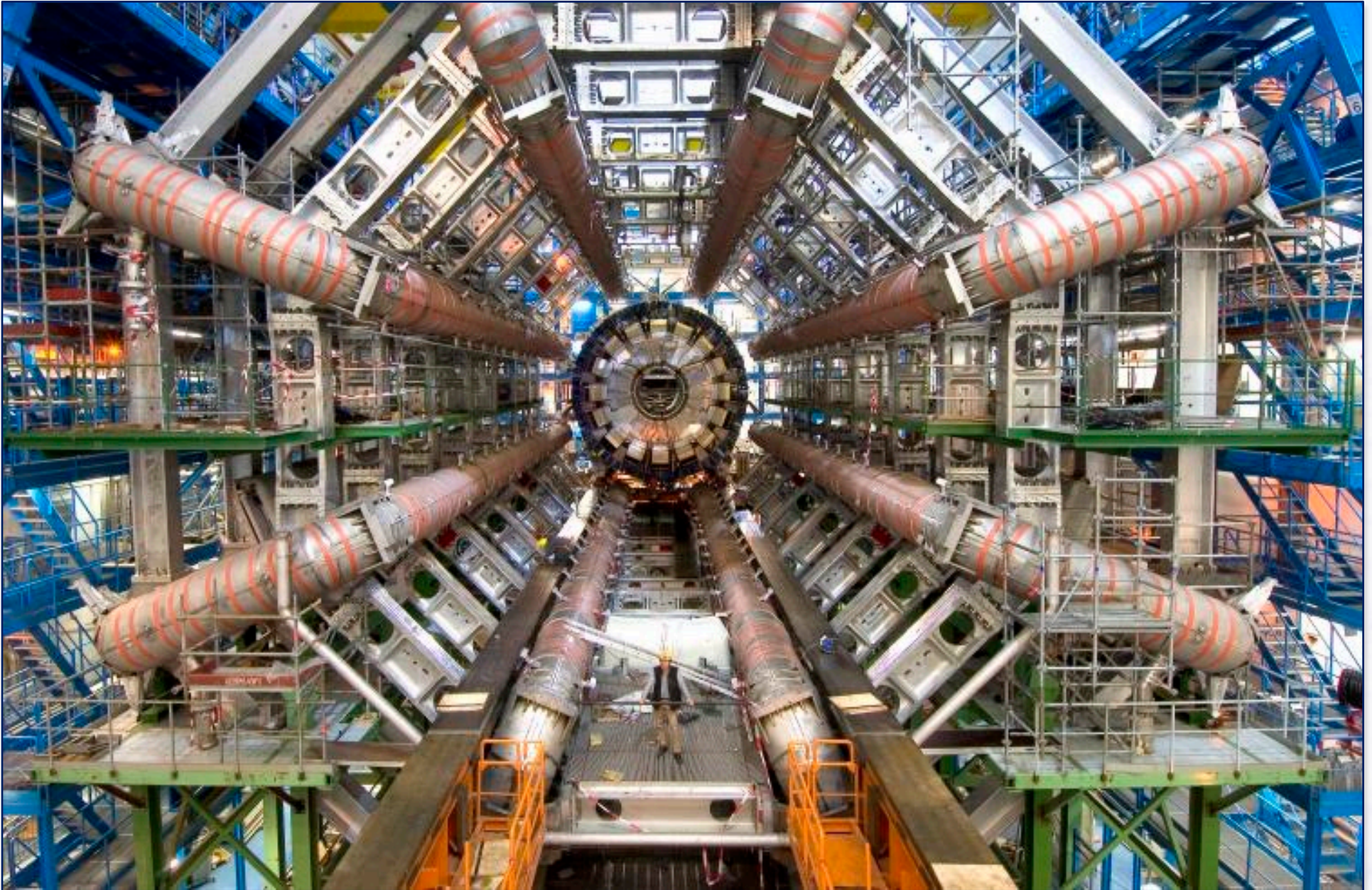
ATLAS Detektor im Vergleich
zum 5-stöckigen ATLAS+CMS
Hauptgebäude am CERN

**Große Kaverne,
2 Materialschächte 18m + 12m Ø,
2 kleine Schächte für Fahrstühle + Treppen**



**Länge = 55 m
Breite = 32 m
Höhe = 35 m**

ATLAS Barrel Toroid fertiggestellt (Nov 2005)



Detektortechnologie und Kunst

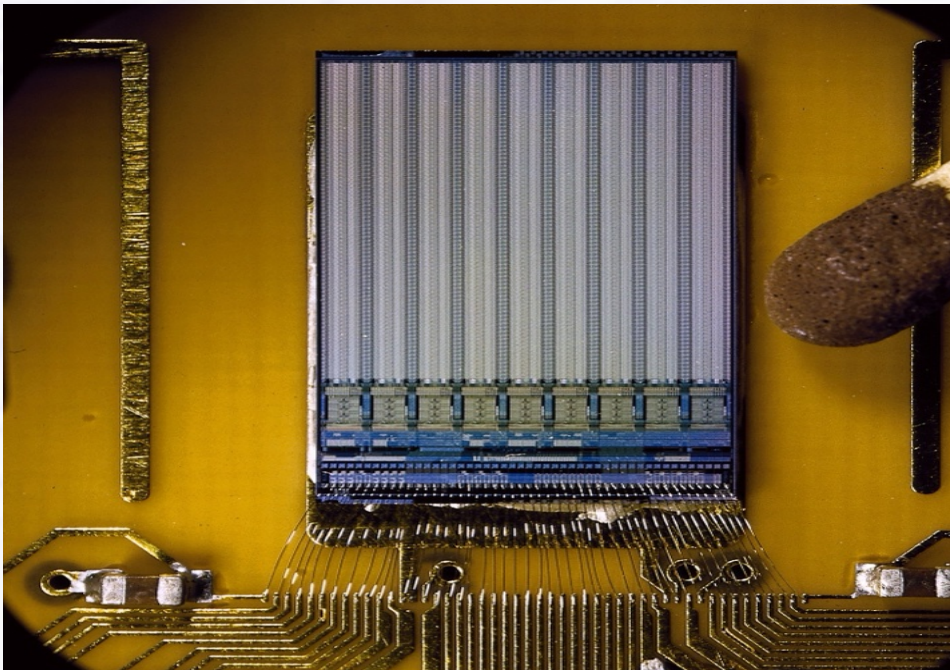
Bühnenbild der Oper “Les Troyens” in Valencia, Oktober 2009



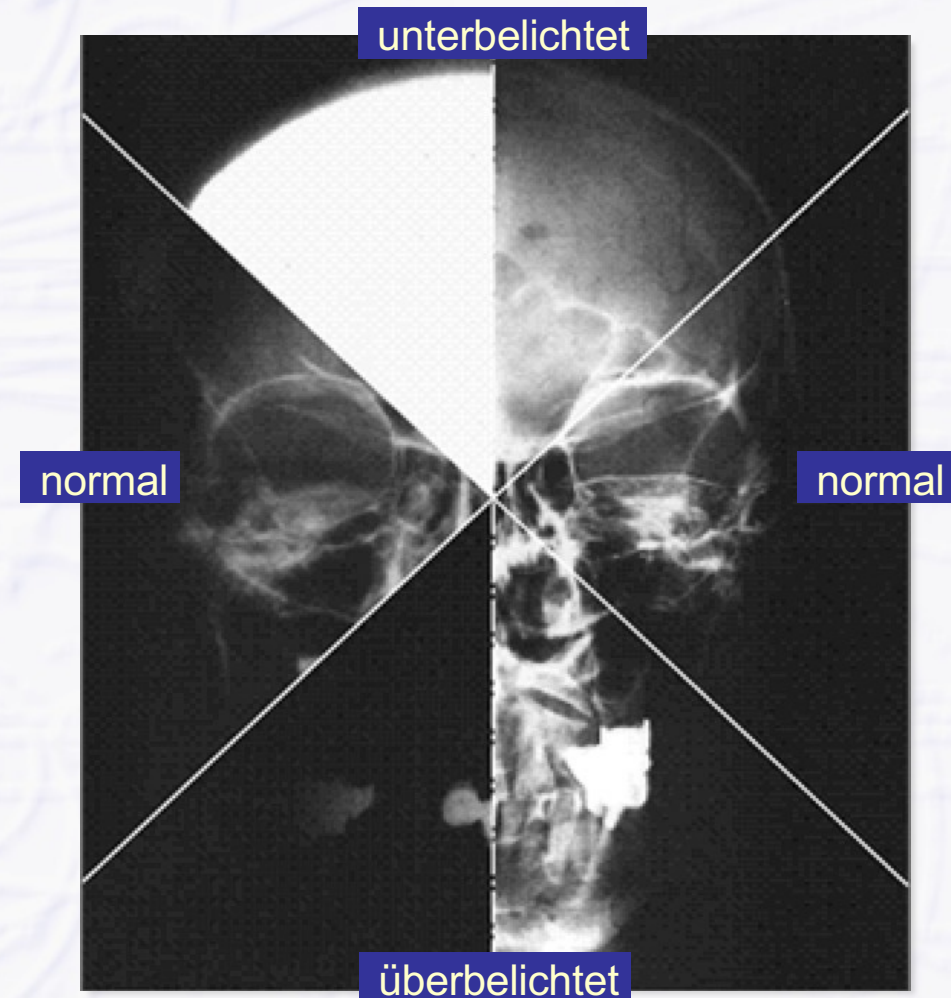
Digitales Röntgen

● Anwendung von Silizium Pixel-Detektoren aus der Teilchenphysik

- ♦ hoher dynamischer Bereich
- ♦ schnelle Bildfolgen
- ♦ geringere Strahlendosis oder mehr Information bei gleicher Dosis



Silizium Pixel-Detektor



herkömmlich

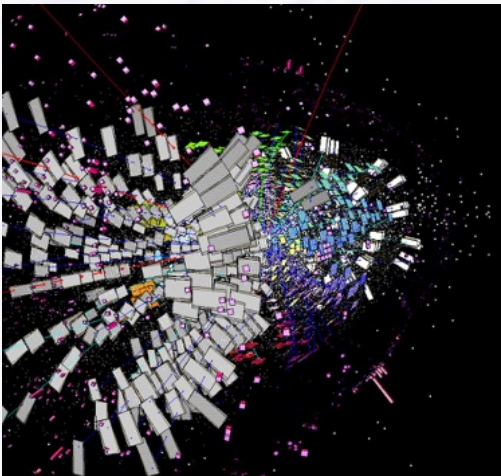
digital

Simulationen von Teilchenwechselwirkungen

● **GEANT4** = **Ge**ometry **and** **T**racking Version 4

- OpenSource-Projekt der Teilchenphysik (CERN Entwicklung)
- **simuliert Wechselwirkung von Strahlung und Teilchen** in Detektoren und Material mit komplexen Geometrien
- **genutzt in Medizin und Raumfahrt** für
 - Bildgebende Verfahren (z.B. PET-Scanner)
 - Abschätzung von Strahlenbelastungen
 - Planung von Tumor-Bestrahlungen

Geant 4



Simulierte Teilchenkollision
im CMS Teilchen-Detektor



PET Scanner



Geant 4

CERN und das World Wide Web

● **Im Jahr 1989**

➡ das **Internet** war schon erfunden

Vorläufer ARPANET seit 1969, initiiert durch US Verteidigungsministerium

Zusammenführung verschiedener Netze in 1980er Jahren

➡ **e-mail** existierte

erste e-mail über ARPANET 1971

➡ **remote login** existierte

Verbindungsaufbau zu einem entfernten Rechner und Nutzung

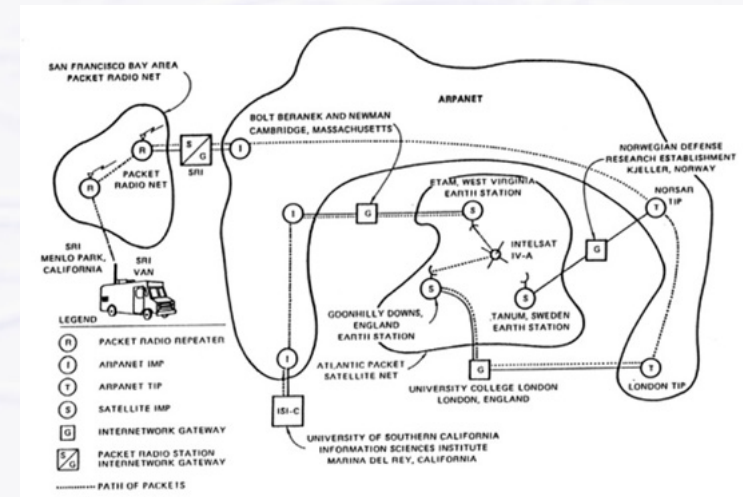
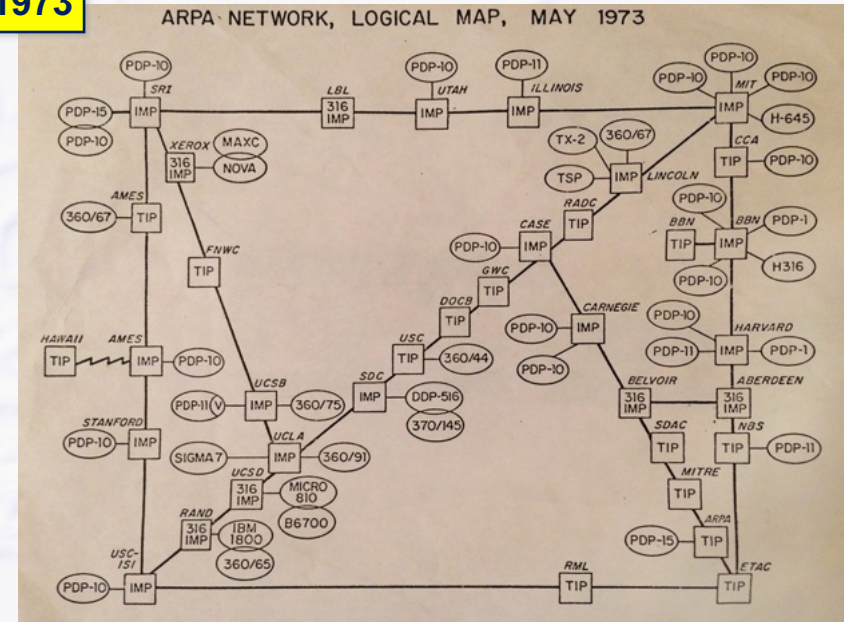
- ➡ verschiedene **Netzwerk-Protokolle**

Konzentration auf heutiges genutztes TCP/IP Protokoll Ende 1980er / Anfang 1990er Jahre

● **Nicht vorhanden**

➡ Einfache Möglichkeit des Informationsaustauschs

ARPANET 1973



**Erste Verbindung verschiedener Netzwerke 1977:
ARPANET, PRNET, SATNET = Erstes "Internet"**

CERN: “Where the Web was born...”

1989 am CERN

- Start des neuen Large Electron Positron Colliders LEP stand bevor
- Wachsende Anzahl Gastwissenschaftler (4'500) aus immer mehr Ländern
- Wunsch nach besserem Informationsaustausch entstand

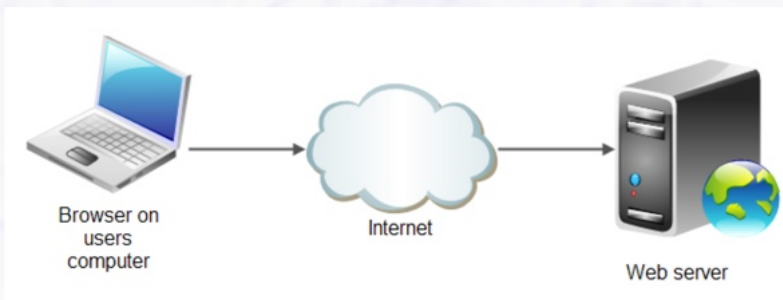
Idee von Tim Berners-Lee (März 1989)

→ Nutzer verbinden sich durch einen **Browser** über das Internet mit einem **Server**

http Protokoll (<http://cern.ch>)

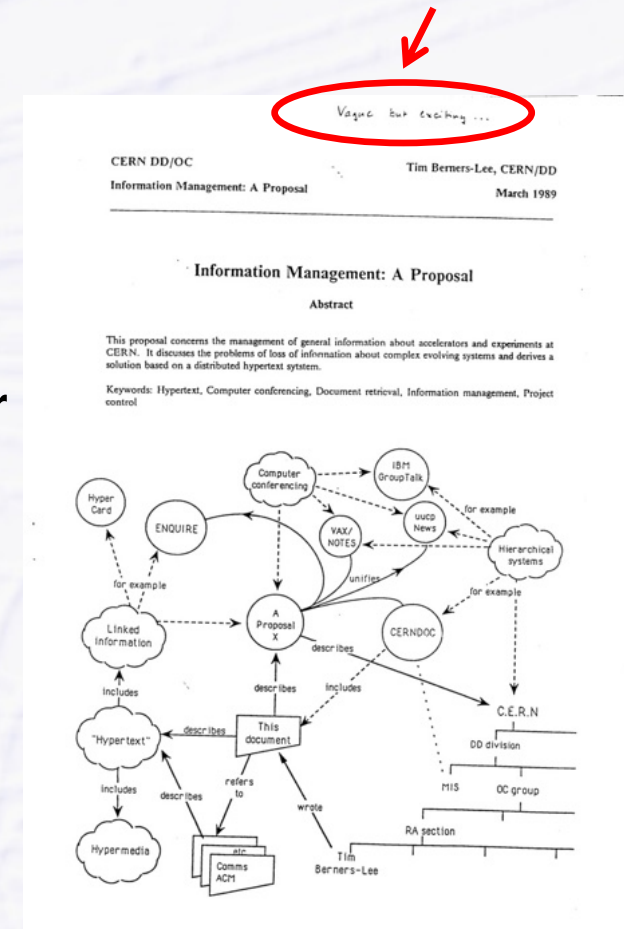
→ **Server** schickt Information an **Browser** zurück, der die Information darstellt

html Seitenbeschreibung mit Links zu anderen Servern



Kommentar des damaligen Chefs:

“Vague but exciting...”



Erster Vorschlag von Tim Berners-Lee, spätere Konzeptentwicklung zusammen mit Robert Cailliau

CERN: “Where the Web was born...”

● Erster Webserver Januar 1991

→ ein NeXT computer

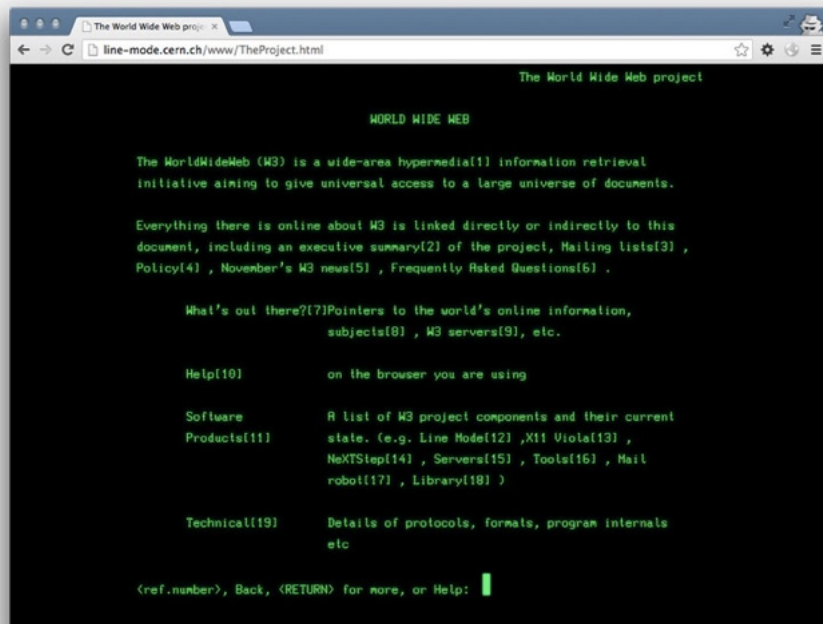
- NeXT durch Steve Jobs 1985 gegründet
- 1997 durch Apple übernommen

● Erster Webbrowser

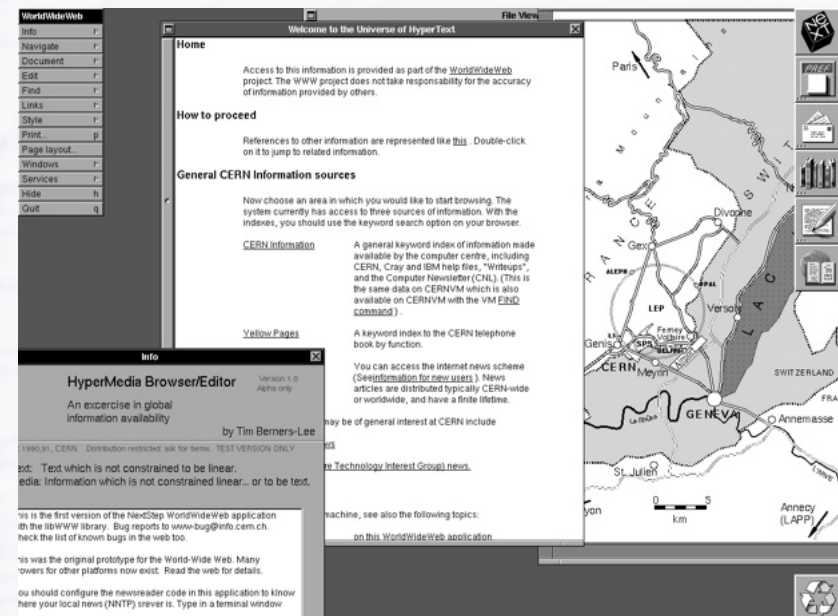
→ noch "line-mode" (ohne Maus)



● Später mit Maus und Graphik



<http://line-mode.cern.ch/www/hypertext/WWW/TheProject.html>



CERN: “Where the Web was born...”

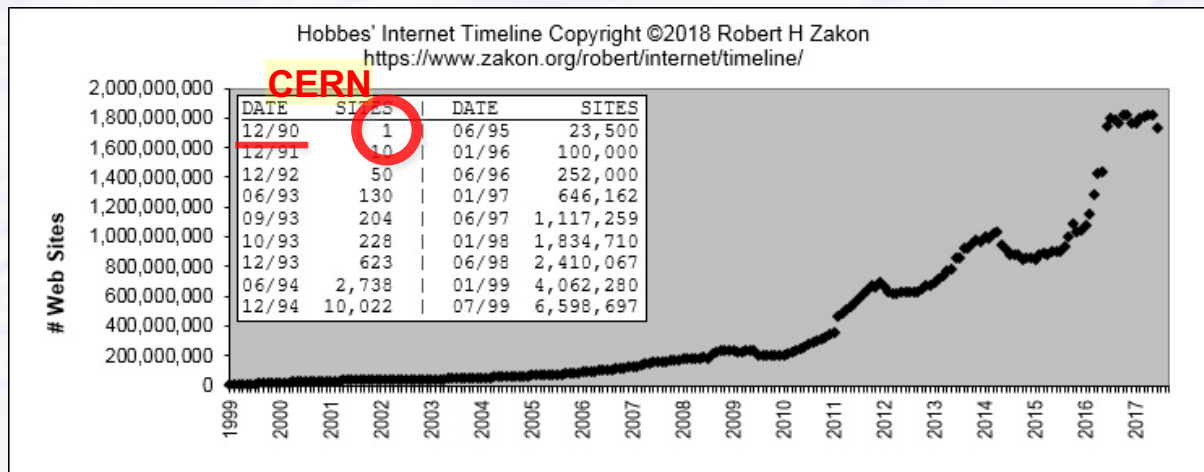
Freigabe des WWW durch CERN im April 1993

→ unentgeltlich, ohne Lizenzgebühren

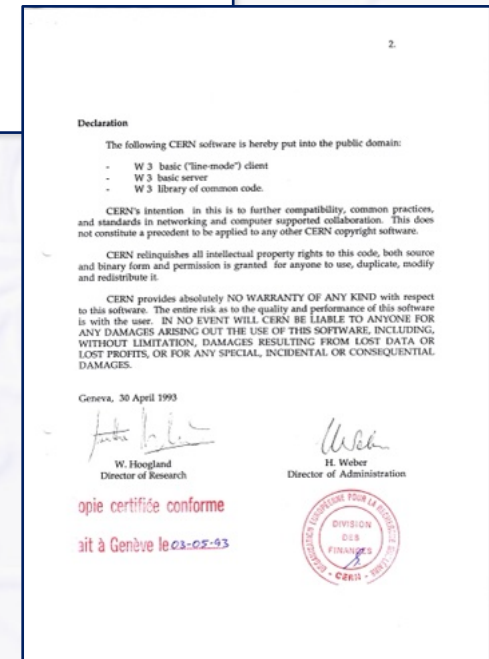
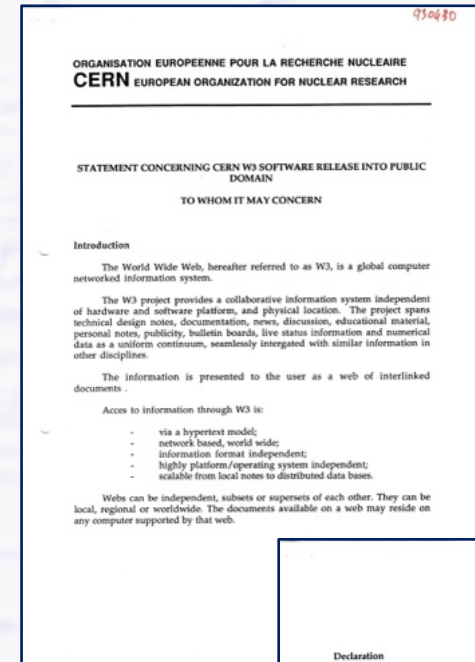
- ca. 50 Webserver weltweit Anfang 1993,
- mehr als 500 im Oktober 1993

Seither (fast) ständiges Wachstum

→ ca. 1.8 Mrd. websites 2017

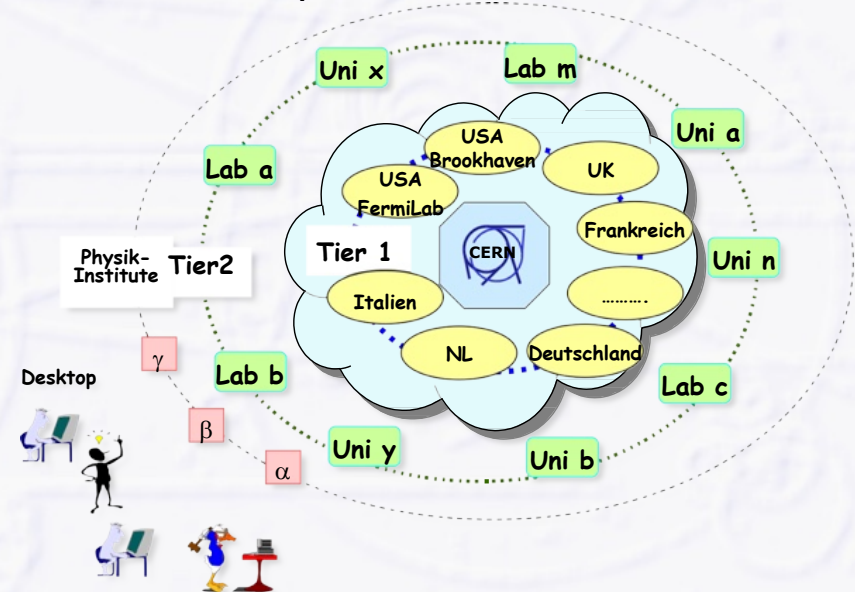
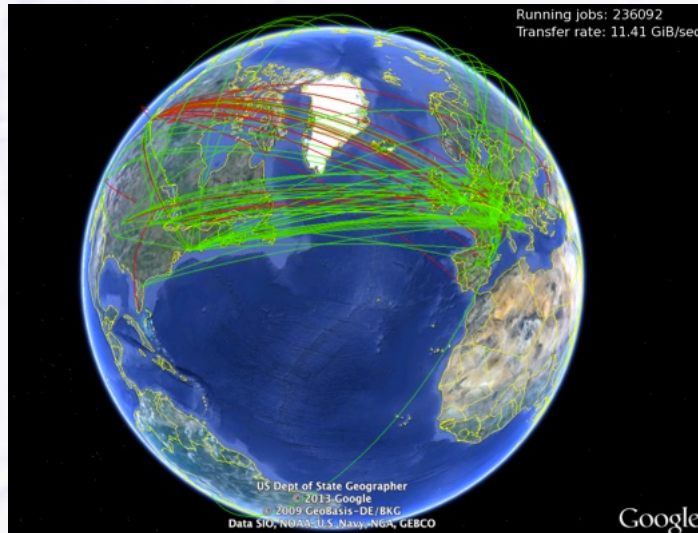


→ im Jahr 2000 erreichten die Gewinne der Web-basierten Firmen die Gesamtsumme des CERN-Budgets seit Gründung 1954



Datenverarbeitung

- **Rohdatenrate eines LHC Experiments: 1 PB/s (1 000 000 GB/s)**
 - zu gross für permanente Speicherung
 - 2-stufige Filterung: 1 PB/s $\rightarrow$ 1 TB/s $\rightarrow$ 1 GB/s (Speicherung)
- **Datenrekonstruktion und -analyse durch weltweites Computer-Netzwerk (LHC Computing Grid)**
 - $\rightarrow$ gestartet 2002, Vorläufer des “Cloud-Computing”
 - mehr als 170 Rechenzentren in 42 Ländern
 - 1 Mill. CPU cores, 1 Exabyte (1000 PB = 1 000 000 TB) Speicherkapazität
 - Netzwerk-Verbindungen zwischen Rechenzentren bis 100 Gb/s



Datenanalyse

- Suche die Nadel im Heuhaufen...

- Heuhaufen: 1 Nadel in 40 Millionen Halmen

- ...oder das Higgs-Teilchen im LHC

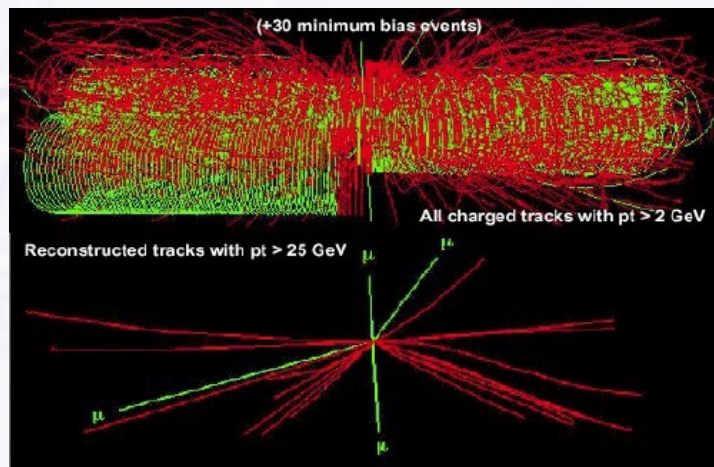
- LHC: 1 Higgs in 100 Milliarden Kollisionen

- erfordert leistungsfähige Algorithmen zur Suche und Filterung



- Data Mining in LHC Daten

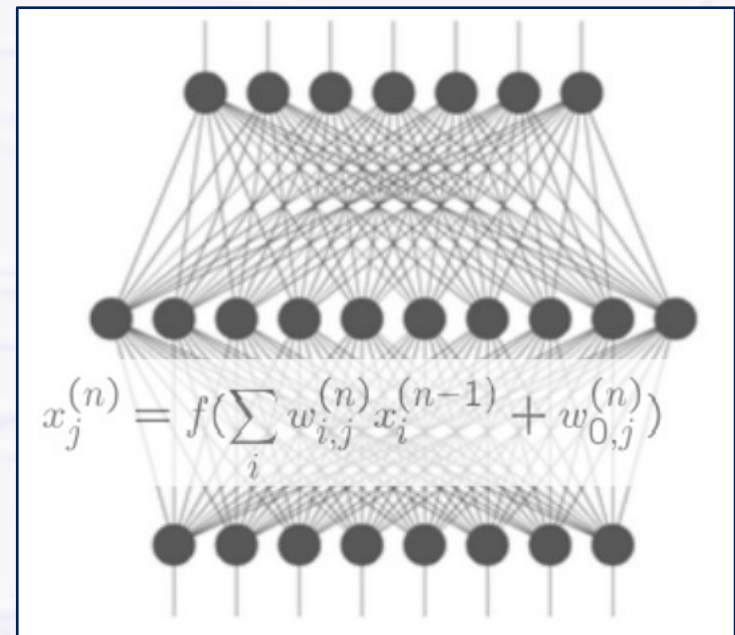
ungefiltert



Higgs-Zerfall
in 4 Myonen

- Ähnliche Verfahren zunehmend bei Industrie und Banken

Anwendung künstlicher neuronaler Netze



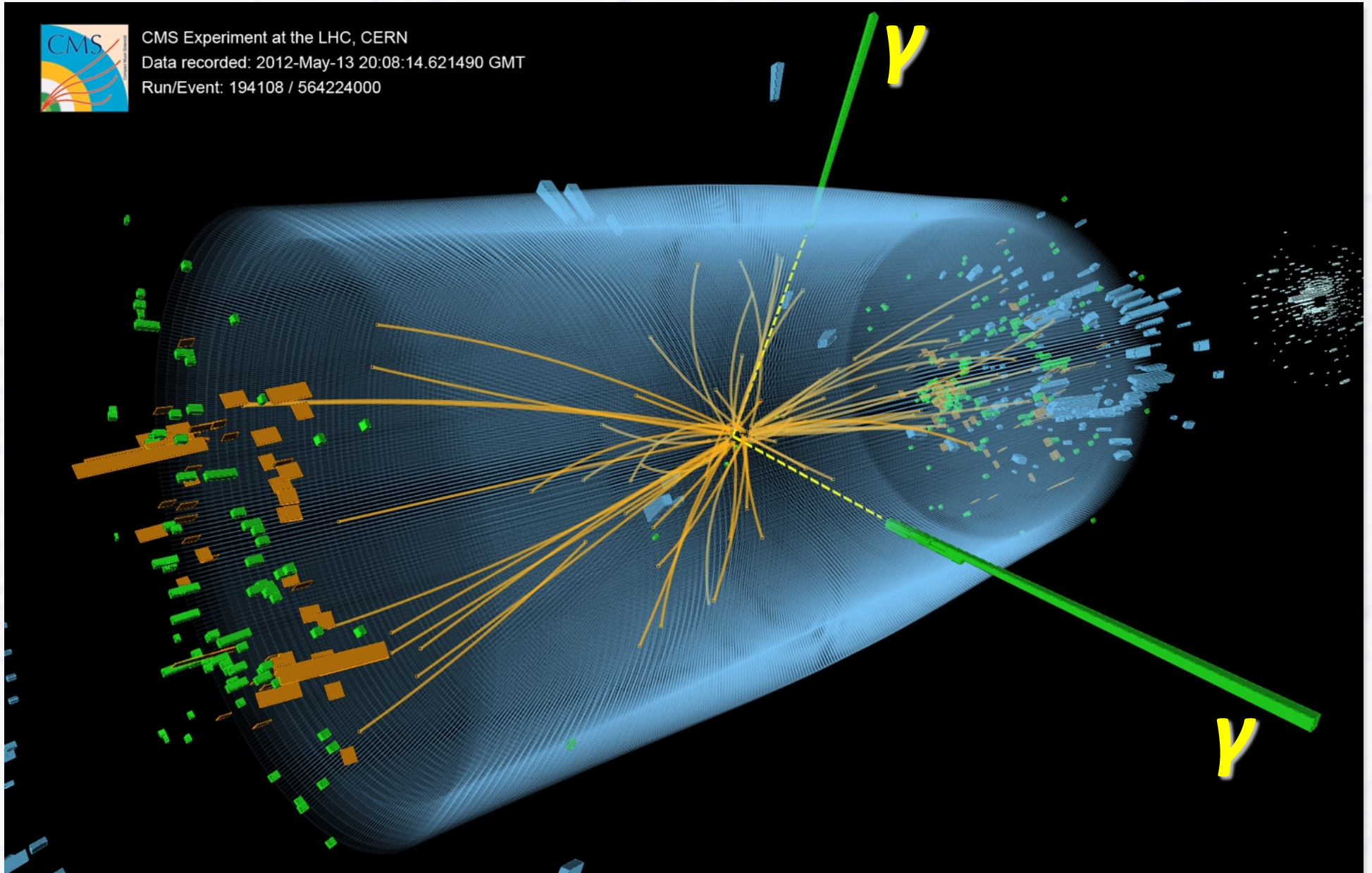
Higgs-Teilchen Entdeckung 4. Juli 2012



Higgs Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



Higgs in den Medien

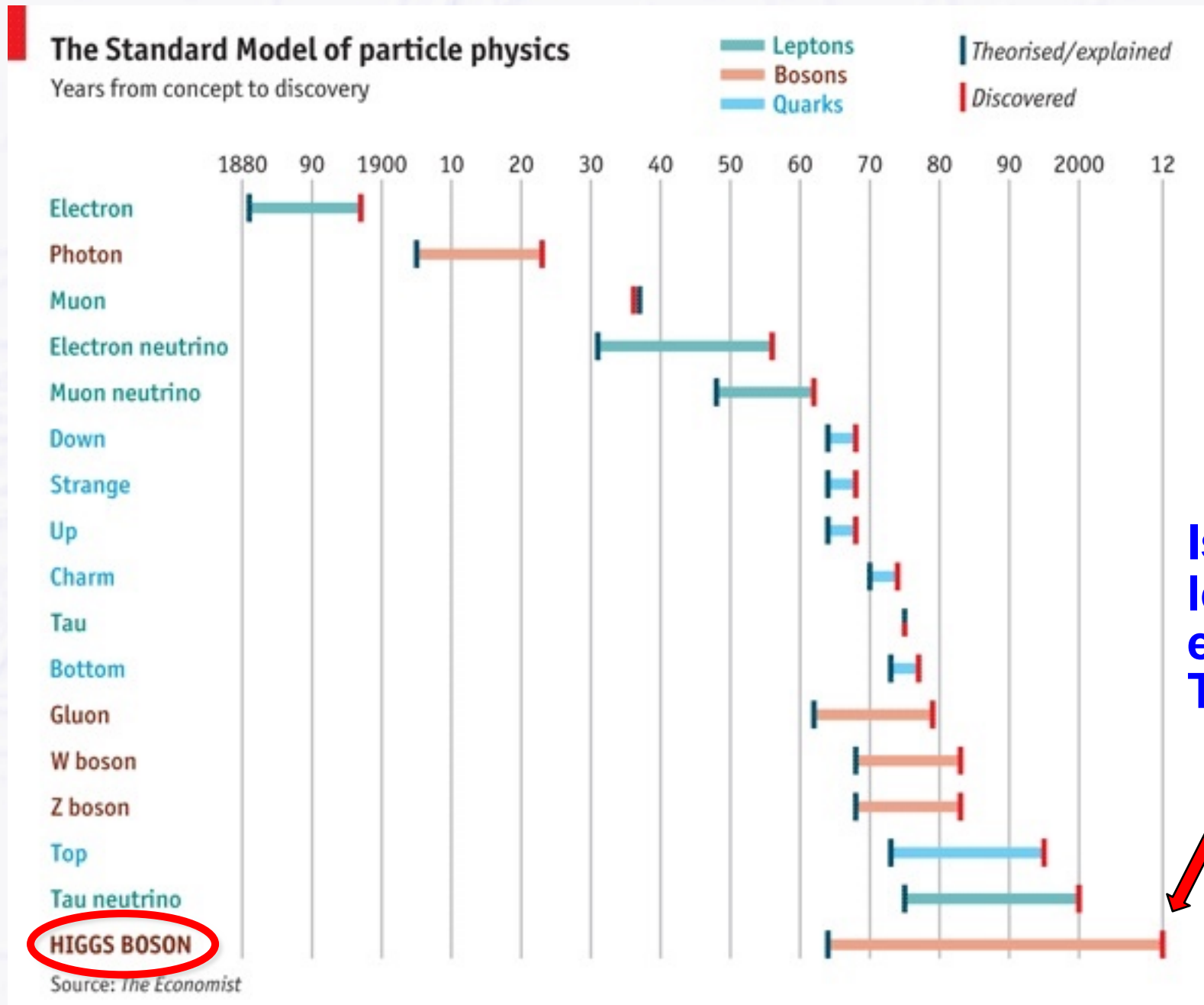


Nobelpreis für Englert und Higgs 2013

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



Standardmodell: Teilchenentdeckungen



Bestandteile des Universums

- Parameter basierend auf Daten von Planck + WMAP polarisation + highL + BAO

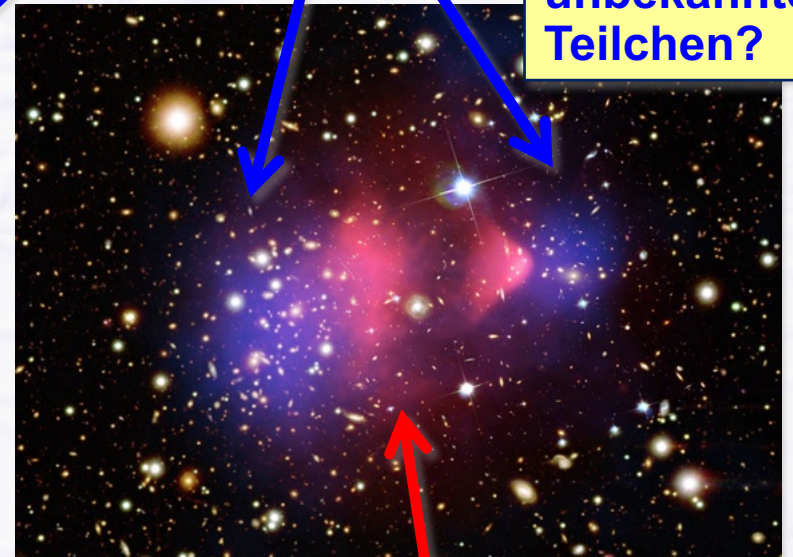
Dunkle Energie:
 $69.2\% \pm 1.0\%$

noch viel
unbekannter!!!

LHC???

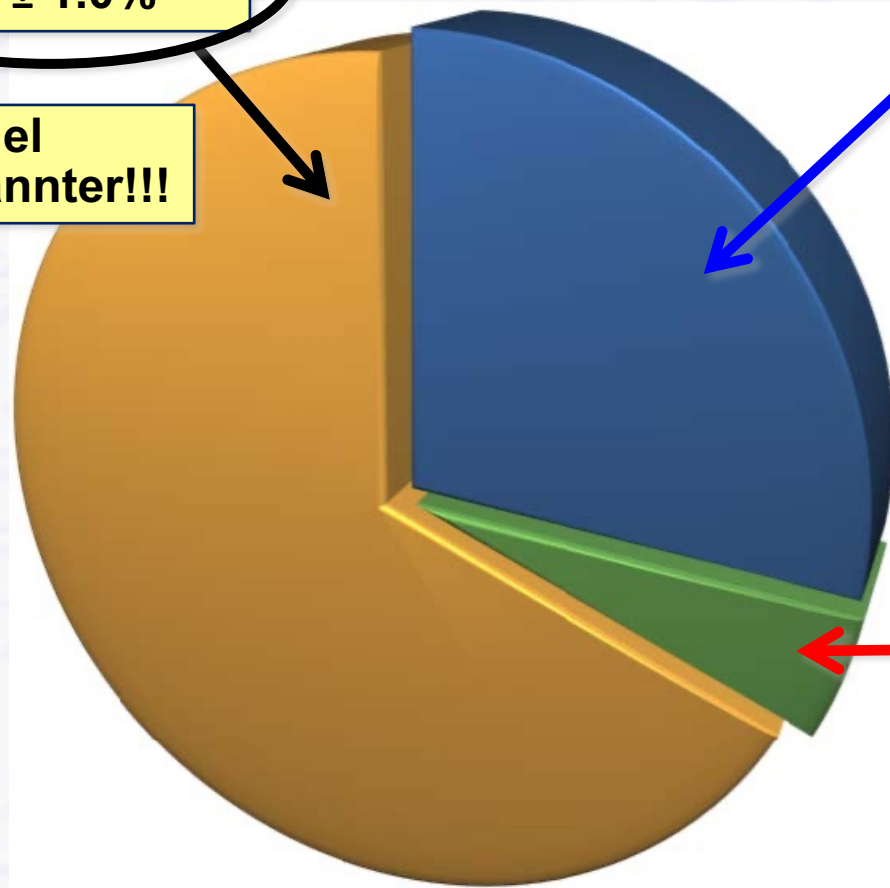
Dunkle Materie:
 $25.7\% \pm 0.4\%$

unbekannte
Teilchen?



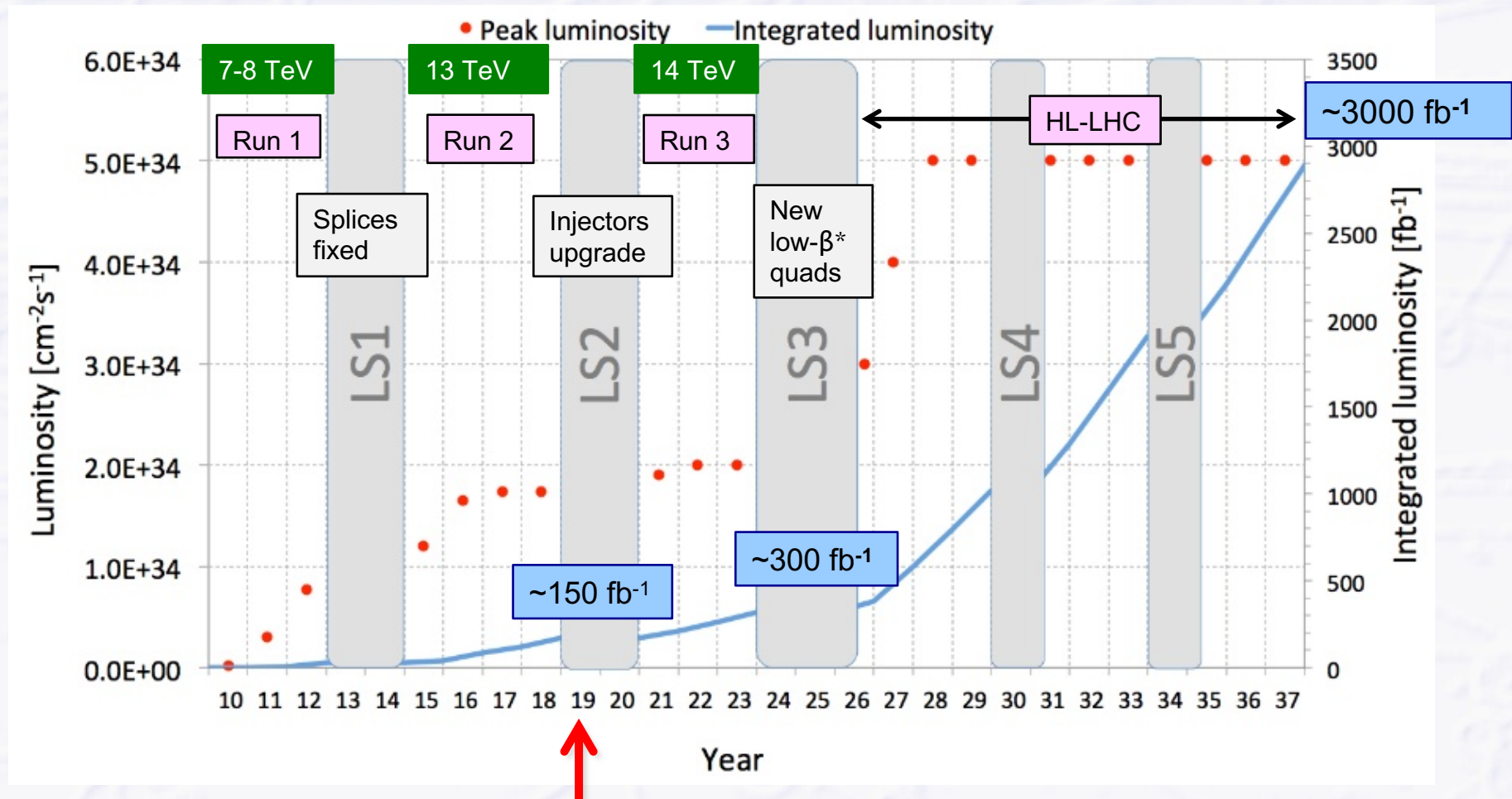
Gewöhnliche Materie:
 $4.82\% \pm 0.05\%$

bekannte
Teilchen des
Standardmodells



LHC: Wie geht es weiter?

- LHC wird bis ~2037 laufen (ab 2026 mit höherer Intensität)
 - präzise Vermessung des Higgs-Teilchens
 - neue bisher unbekannte Teilchen???



Zusammenfassung

● Grundlagenforschung

- ist ein elementares Kulturgut
- schafft Wissen und Erkenntnis
- ist die Basis jeder neuen Anwendung



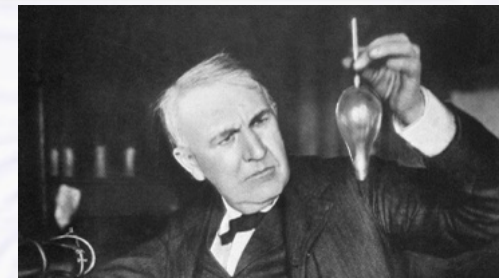
● Allgemeine Anwendungen

- ergeben sich aus den gewonnenen Erkenntnissen selbst
- und aus der Entwicklung der zur Grundlagenforschung notwendigen Technologien



● Junge Wissenschaftler

- werden ausgebildet in einem internationalen Umfeld



● Unterschiedliche Kulturen und Denkweisen

- ergänzen sich und haben gemeinsame Ziele

