

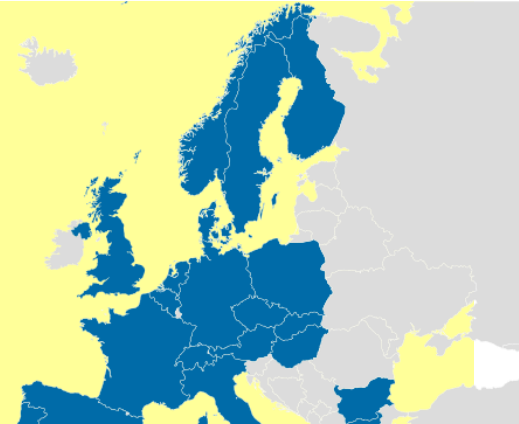
## Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf

- **Funktion und Aufbau von Teilchenbeschleunigern**
- **Technische Daten zum LHC**
- **Ausgangslage / Standardmodell der Elementarteilchen**
- **Wissenschaftliche Ziele der Experimente mit dem LHC**
- **Teilchenphysik und Kosmologie**
- **Detektoren**

**CERN = Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire**



- **multinationale europäische Organisation**
- **Gründung :** 1954
- **Zielsetzung :** Schaffung einer weltweit führenden Organisation in Europa für Forschungen zu physikalischen Grundlagenproblemen
- **Schwerpunkt :** zunächst Kernphysik  
später ausgedehnt auf Teilchen  
außerhalb des eigentlichen Atomkerns



- führendes Zentrum für Experimente zur Elementarteilchenphysik in Genf
- weltweit leistungsfähigster Teilchenbeschleuniger

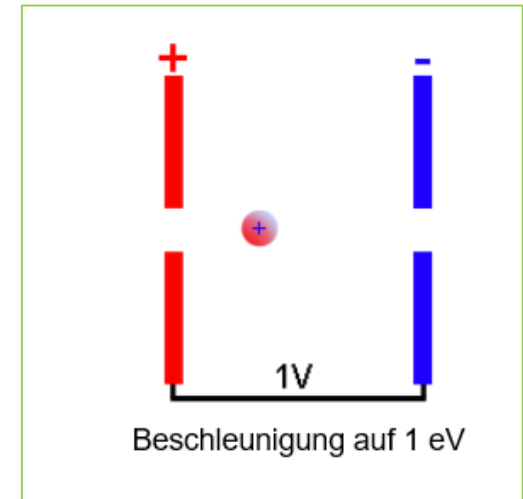
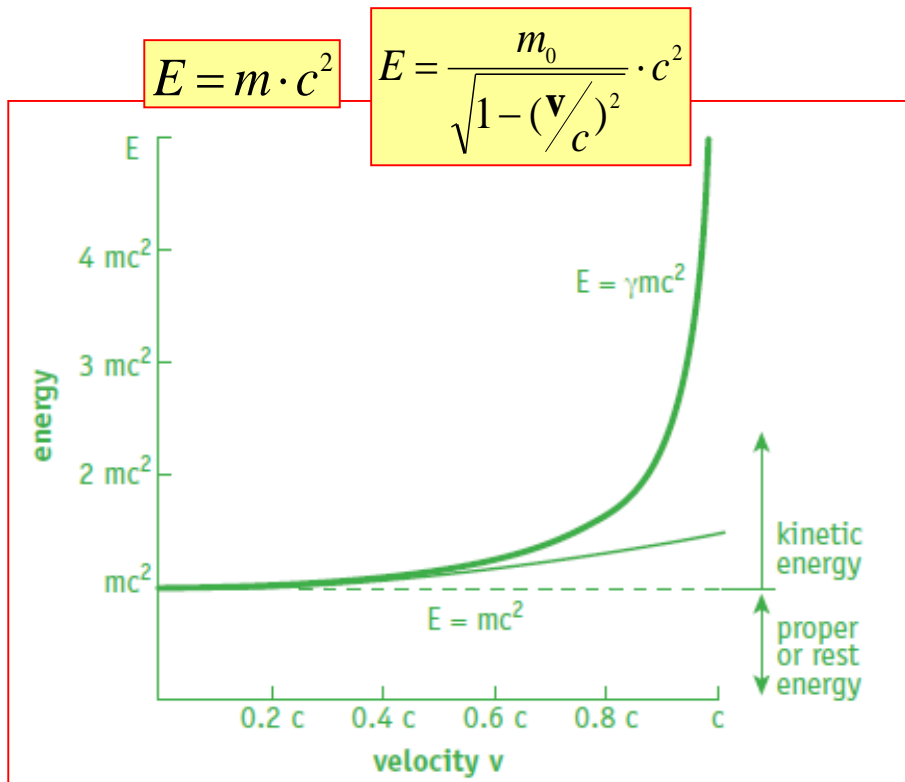
**LHC = Large Hadron Collider**

- Ringbeschleuniger für *Protonen* und *Blei-Ionen*



- Nachweis und Erforschung neuer Teilchen :
  - bekannte Teilchen mit hoher Energie zu Kollision bringen  
→ dabei entstehende Zerfallsprodukte untersuchen
- je höher die Energie, desto eher kann man „fest zusammenhaftende“, evtl. vorher als „elementar“ betrachtete Teilchen in noch kleinere Bestandteile zerlegen

Energieeinheit : „eV“ (1 eV = 1.6\*10<sup>-19</sup> J)

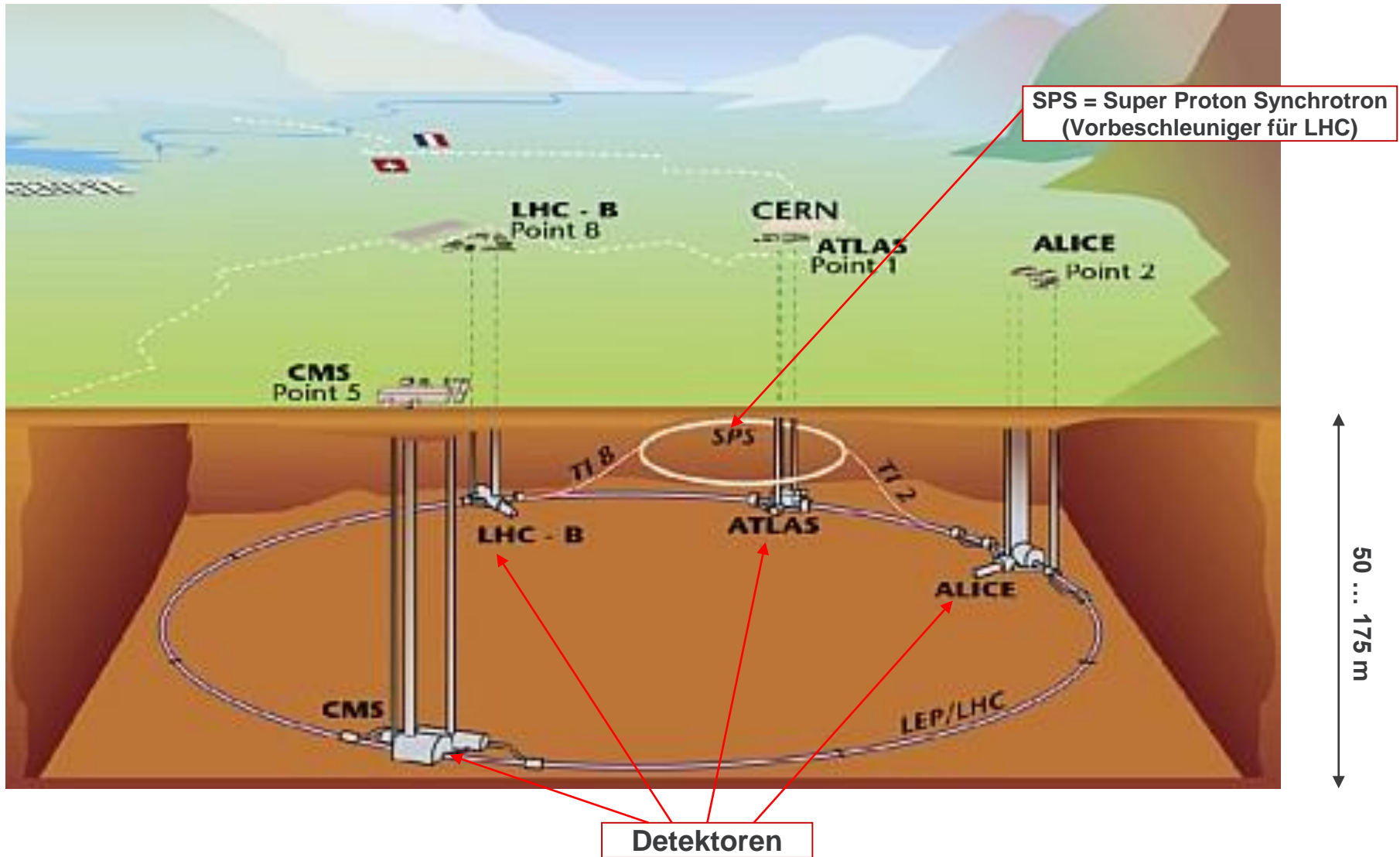


Kinetic energy of a proton (K)	Speed (%c)	Accelerator
50 MeV	31.4	Linac 2
1.4 GeV	91.6	PS Booster
25 GeV	99.93	PS
450 GeV	99.9998	SPS
7 TeV	99.9999991	LHC

Relationship between kinetic energy and speed of a proton in the CERN machines. The rest mass of the proton is  $0.938 \text{ GeV}/c^2$

Power of ten	Number	Symbol
$10^{-12}$	0.000000000001	p (pico)
$10^{-9}$	0.000000001	n (nano)
$10^{-6}$	0.000001	$\mu$ (micro)
$10^{-3}$	0.001	m (milli)
$10^{-2}$	0.01	
$10^{-1}$	0.1	
$10^0$	1	
$10^1$	10	
$10^2$	100	
$10^3$	1000	k (kilo)
$10^6$	1 000 000	M (mega)
$10^9$	1 000 000 000	G (giga)
$10^{12}$	1 000 000 000 000	T (tera)
$10^{15}$	1 000 000 000 000 000	P (peta)

# Gesamtbild der LHC-Anlage



# Woher kommen die Teilchen (Protonen) ?

**Proton : Kern des Wasserstoffatoms**

elektrisch geladen → kann durch elektrische Felder beschleunigt werden

**Primärquelle : Flasche mit Wasserstoffgas**

Protonen entstehen, wenn von den Wasserstoffatomen im Duoplasmatron die Elektronen abgestreift werden.

**1. Stufe : Linearbeschleuniger**

→ Energie 50 MeV

**2 .Stufe : PSB (Proton Synchrotron Booster)**

→ Energie 1,4 GeV

**3. Stufe : Protonen-Synchrotron (PS)**

→ Energie 25 GeV

**4. Stufe : Super Protonen-Synchrotron (SPS)**

→ Energie 450 GeV

**5. Stufe : Einspeisung in den LHC**

ein Teil im Uhrzeigersinn ;

ein Teil entgegen Uhrzeigersinn

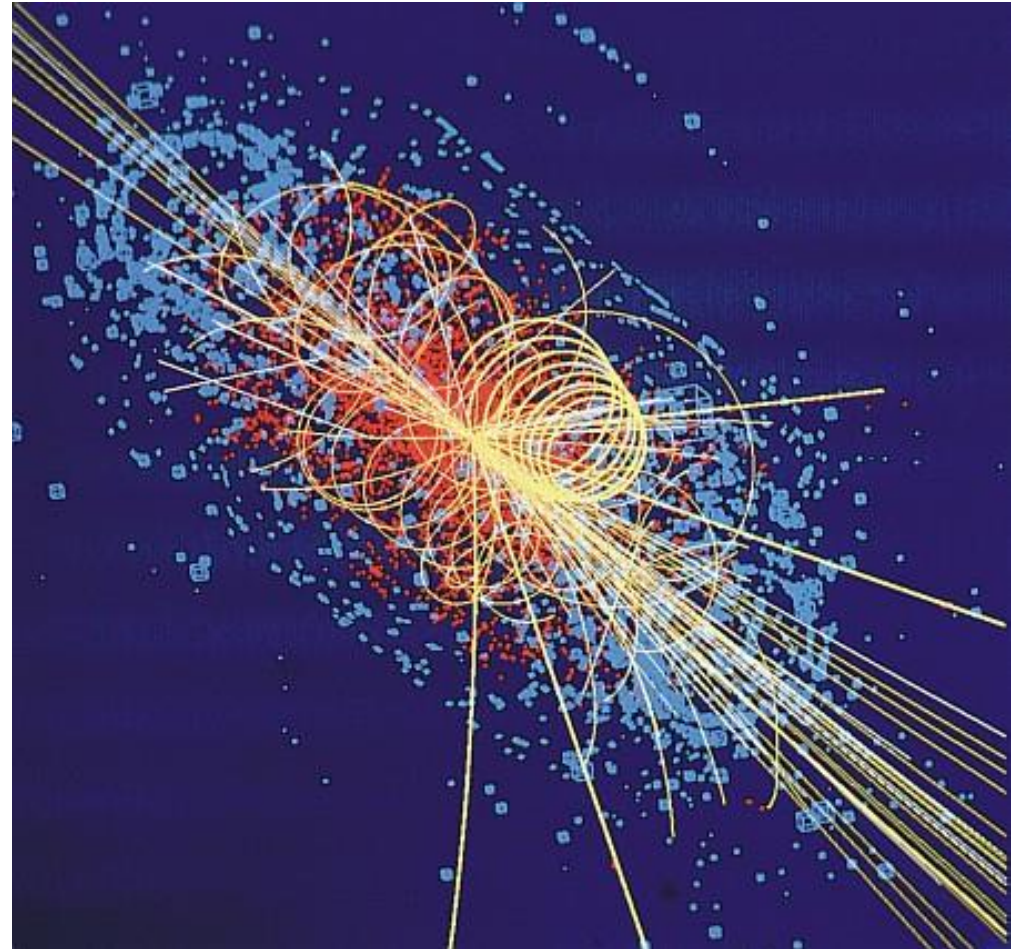
→ im LHC jeweils auf Energie von 7000 GeV beschleunigt (Dauer 20 Min.)

→ Strahl steht nach Beschleunigung für ca. 10 Stunden für Experimente zur Verfügung



# Die Protonen im LHC-Speicherring

- **Protonen** werden *in Bündeln* in den LHC eingeschossen
- **alle 25 ns ein Bündel** eingeschossen  
→ räumlicher **Abstand ca. 7,5 m**
- jedes Bündel enthält ca.  **$10^{11}$  Protonen**
- jeweils **11.240 Umläufe pro Sekunde**
- Räumliche **Ausdehnung** der Bündel :  
**einige cm lang, 1 mm Durchmesser**  
**am Kollisionspunkt :**  
fokussiert auf ca.  **$d=16\mu\text{m}$**   
(menschl. Haar :  $d \approx 50\mu\text{m}$ )
- bei **Durchdringen zweier Bündel :**  
**ca. 20 Kollisionen**  
(bei 200 Milliarden Partikeln !)
- insgesamt **2800 Bündel im Rohr,**  
jeweils **11240 Umläufe pro Sek.**  
→  $20 \cdot 2800 \cdot 11240 \approx 600$  Mio. **Kollisionen pro Sek. in jedem der Detektoren !!**





# Rekonstruktion eines Kollisions-Events

## May 2010: Strange Beauty and Charm

LHCb has reconstructed an event having all characteristics of a Strange Beauty Particle decay! A computer view of this event is shown below.

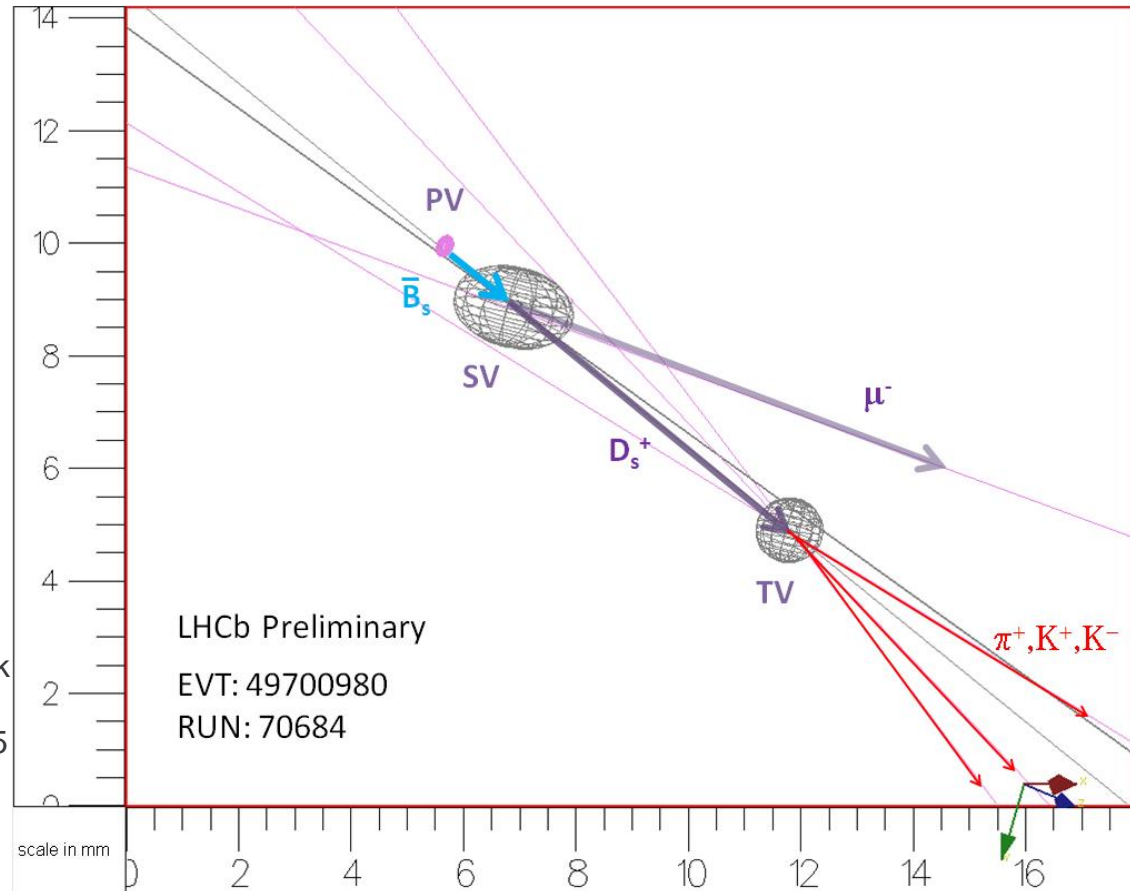
The Strange Beauty Particle (called  $B_s$ ) is composed of a quark  $b$  (b is for beauty) and an anti-quark  $\bar{s}$  (s is for strange). It is produced by the collision of two 3.5 TeV protons from the LHC at a location marked as "PV" (**Primary Vertex**), together with many other particles (not shown). The  $B_s$  decays after travelling about 1.5 mm into three particles called  $\mu^-$ ,  $D_s^+$  and neutrino  $\bar{\nu}$  at a place marked "SV" (**Secondary Vertex**).

The  $\bar{\nu}$  is not detected since it can even traverse the whole Earth without any interaction.

The Charm Particle  $D_s^+$  is composed of a  $c$  quark (c is for charm) and anti-quark  $s$ .

The  $D_s^+$  particle decays in turn after travelling 6.5 mm into three long lived particles  $K^+$ ,  $K^-$  and  $\pi^+$  in a place called "TV" (**Tertiary Vertex**).

The  $K^+$ ,  $K^-$  and  $\pi^+$  are traversing the LHCb detector where the tracking system is used to reconstruct their trajectories with such a very high precision that it is clear that the particles come from three different places called vertices.



## ▪ Beschleunigung der (geladenen) Teilchen

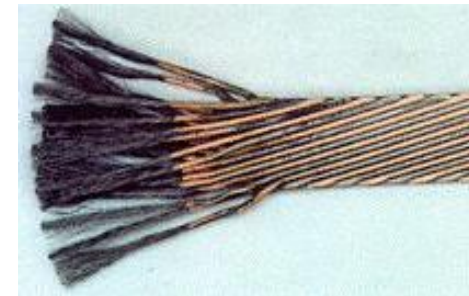
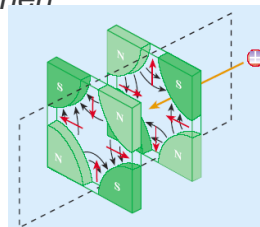
- Durch starke elektrische Felder, oder
- Mittels **Hohlraumresonatoren** (Cavities)  
→ Teilchen „surfen“ auf den dort erzeugten elektromagnetischen Wellen, werden dabei beschleunigt
- Energieverluste durch Synchrotronstrahlung müssen permanent kompensiert werden
- Je höher die Energie sein soll, desto näher müssen die Hadronen an die Lichtgeschwindigkeit kommen

## ▪ Teilchenstrahl auf der Kreisbahn halten

- Mit extrem starken (supraleitenden) Magneten / **Dipolmagnete**

## ▪ Teilchenstrahl im Rohr fokussieren

- im Kollisionsbereich der Detektoren  
→ *hohe Luminosität*  
→ *hohe Ausbeute an Kollisionen*
- **Quadruplomagnete**



## Magnetspezifikationen

- Magnetfeld bis 8.3 T
- Spulenströme bis 11850 A  
→ nur mit supraleitenden Spulen erreichbar
- Betriebstemperatur der Magnete  $T = -271,3^\circ \text{C}$   
(*Drähte supraleitend & Kühlmittel Helium flüssig & suprafluid*)

## Spulendrähte

- Material : Niob-Titan-Legierung
- Draht aus 36 verdrehten Adern ( $\varnothing$  je 0,8 mm)
- jede Ader enthält 6500 Einzeldrättchen ( $\varnothing$  je 6  $\mu\text{m}$ )  
→ Gesamtlänge der Drähte im LHC  $\approx 10 \cdot$  Abstand (Erde  $\leftrightarrow$  Sonne)
- über 5 Jahre hinweg wurden für den LHC im Mittel ca. 28% der Weltproduktion an Supraleiter-Rohmaterial verbaut

- **Energieverbrauch : ca. 120 MW** (soviel wie alle Haushalte der Stadt Genf)
- **Die schnellste „Rennstrecke“ auf der Erde :**  
Protonenbündel kreisen mit 99.999999% der Lichtgeschwindigkeit  
→ jedes Proton hat dann Energie von 7 TeV  
→ 14 TeV beim Zusammenstoß zweier gegenläufiger Protonen
- **Der „leerste“ Raum innerhalb des Sonnensystems**  
Druck in den Röhren  $10^{-13}$  bar → Protonenpakete sollen nur innerhalb der Detektoren mit entgegenkommenden Paketen kollidieren, nicht mit „Restteilchen“ im Ring !
- **Die heißesten Stellen im Sonnensystem**  
in den Kollisionszonen der Detektoren lokale Temperaturen 100.000 mal höher als im Innern der Sonne
- **Die weltgrößte Kühlanlage**  
die Strahlrohre und die umgebenden Magneten werden auf  $-271.3^{\circ}$  C (1.9K) gehalten  
→ kälter als die Temperatur im interstellaren Raum (2.72 K)  
Herunterkühlen bzw. „Auftauen“ der Ringsektoren dauert jeweils einen Monat!
- **Die größten und empfindlichsten Detektorsysteme weltweit**  
600 Mio. Kollisionen pro Sekunde müssen genau analysiert werden bezüglich der Bahnen der entstehenden Teilchen (zeitliche Auflösung im Nanosekunden-; räumliche Auflösung im Mikrometerbereich)  
→ bei jeder Kollision entsteht eine Vielzahl von Teilchen als Reaktionsprodukte !!
- **Das leistungsfähigste Computersystem der Welt**  
Analyse der anfallenden Datenmenge (ca. 50 Mio. Gigabyte p.a.) nicht bei CERN allein möglich  
→ Zehntausende Großcomputer weltweit zu einem verteiltem Rechnernetzwerk (Grid) verbunden

# Elementarteilchen – Entwicklung unseres „Bildes“

**1808 - Dalton** : **Gesetz der „Multiplen Proportionen“** bei chemischen Reaktionen  
→ Elemente gehen nur in bestimmten ganzzahligen Verhältnissen Verbindungen ein  
→ Elemente bestehen aus kleinsten, nicht mehr teilbaren Einheiten (Atomen)

**1897 - Thompson** : **Entdeckung des Elektrons** aus Experimenten mit Kathodenstrahlen  
→ „Rosinenkuchenmodell“ des Atoms ; Elektronen in einen positiv geladenen „Brei“ eingebettet

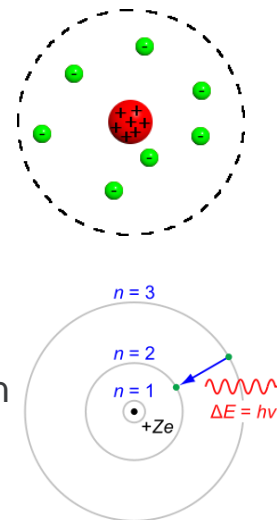
**1911 - Rutherford** : Streuversuche von Heliumkernen bei Durchgang durch Goldfolien  
→ **positive Ladung** muss **in sehr kleinem „Atomkern“ konzentriert** sein  
Rutherfordsches Atommodell:  
positiver Kern umgeben von negativ geladenen Elektronen

**1913 – Bohr** : **Bohrsches Atommodell (Postulat)**  
Elektronen umkreisen den Kern auf konzentrischen Bahnen;  
dabei nur bestimmte Radien erlaubt;  
Sprünge zwischen zwei Radien sind mit elektromagnetischer Strahlung verbunden

**1917-19 – Rutherford** : Entdeckung des **Protons** in den „Reaktionsprodukten“ nach dem Beschuss von Stickstoff mit  $\alpha$ -Teilchen

**1923 -26 – Heisenberg, Schrödinger, Dirac** u.a. : Entwicklung der **Quantenmechanik**  
→ Erklärung dafür, dass die Elektronen auf ihrer Bahn um den Kern nicht ständig Energie abstrahlen und so in den Kern stürzen

**1932 – Chadwick** : Entdeckung des **Neutrons** bei Beschuss von Berylliumfolie mit  $\alpha$ -Teilchen  
→ alle Atomkerne bestehen aus Protonen und Neutronen (Nukleonen)



# Elementarteilchen – Verfeinerung des „Bildes“

**1932 – Anderson** : Entdeckung des **Positrons** in der kosmischen Strahlung (erstes Antiteilchen)

→ Antiteilchen zum Elektron (gleiche Masse, entgegengesetzte Ladung)

→ erster Nachweis der 1928 von Dirac vorhergesagten „Antimaterie“

→ Teilchen und Antiteilchen zerstrahlen beim Zusammentreffen

**1936** – Entdeckung des **Muons** in der kosmischen Strahlung

**1947 – Entdeckung der Pi-Mesonen**

(1935 von Yukawa vorausgesagt in einer ersten Theorie der Kernkraft :  
Pi-Mesonen werden zwischen Proton und Neutron ausgetauscht)

**1956 – Entdeckung des Elektron-Neutrinos**

in der Strahlung von Kernreaktoren

(1930 von Pauli vorausgesagt, um Beta-Zerfall zu erklären)



... – Entdeckung immer neuer „Elementar“teilchen (1964 : > 100)

**1964 – Quarkmodell** (*Murray Gell-Mann, George Zweig*)

→ alle Teilchen im Atomkern sind aus Quarks zusammengesetzt

(1968 experimenteller Nachweis der Quarks in Stanford anhand von  
Elektron-Proton-Streuexperimenten)

**1972 – Quantenchromodynamik** (*Gell-Mann & Fritzsche*)

Theorie der starken Wechselwirkung

→ Quarks halten über den Austausch von **Gluonen** zusammen



# Standardmodell der Teilchen und Kräfte

- zwei Gruppen von Elementaren **Materieteilchen**

- Quarks
- Leptonen

jeweils charakterisiert durch spezifische Werte von Masse, Ladung und Spin

- Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen durch **vier Kräfte** bestimmt :


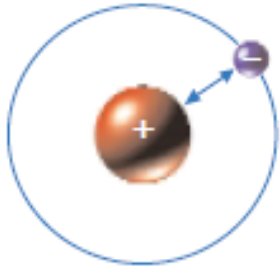
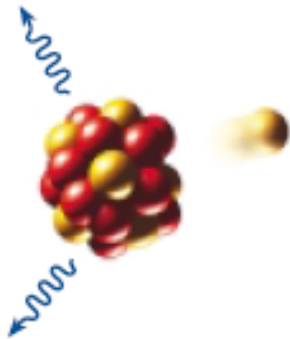
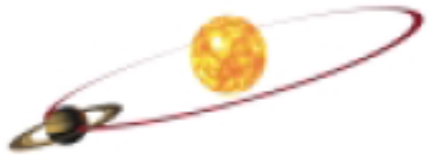
- **Elektromagnetische Kraft**
  - wirkt zwischen allen Teilchen mit Ladung
  - unendliche Reichweite
- **Starke Wechselwirkung**
  - wirkt nur zwischen Quarks, nicht auf Leptonen
  - Reichweite nur im subatomaren Bereich
- **Schwache Wechselwirkung**
  - wirkt auf Quarks und Leptonen
  - Reichweite nur im subatomaren Bereich
- **Gravitation**
  - wirkt zwischen allen massebehafteten Teilchen
  - unendliche Reichweite

- jede **Kraft** wirkt über den Austausch von „**Trägerteilchen**“ mit Spin gleich Null oder ganzzahlig (Bosonen)

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon
Quarks				
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> Myon-Neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> Elektron	<b>μ</b> Myon	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> W Boson
Leptonen				Eichbosonen

# Standardmodell - Trägerteilchen der Kräfte

	<b>Gluon</b>	<b>Photon</b>	<b>W- und Z-Boson</b>	<b>Graviton</b>
<b>Träger der:</b>	starken Kraft	elektromagnetischen Kraft	schwachen Kraft	Gravitationskraft
<b>wirkt auf:</b>	Quarks und Gluonen	Quarks und geladene Leptonen	Quarks und Leptonen	alle Teilchen
<b>verantwortlich für:</b>	Zusammenhalt der Hadronen und der Atomkerne	Chemie, Elastizität und Magnetismus	Radioaktivität	Zusammenhalt der Erde, der Sonne, des Planetensystems
				

# „Teilchengenerationen“

- Begriff **Generationen** hat in der Teilchenphysik nichts mit Eltern-Kind-Relationen zu tun

- alle **bekannte Materie** besteht aus **Teilchen der 1. Generation** (Atome, Moleküle, Zellen)



- Teilchen der **2. und 3. Generation** sind bezüglich ihrer Eigenschaften im wesentlichen **Kopien** derjenigen **der 1. Generation**, allerdings

- mit weit **höherer Masse**
- oft **instabil**
- existierten **kurz nach dem Urknall** bei extrem **hohen Energiedichten**
- können **in Teilchenbeschleunigern** bei **Kollisionen** erzeugt werden (*kurze Lebensdauer*)

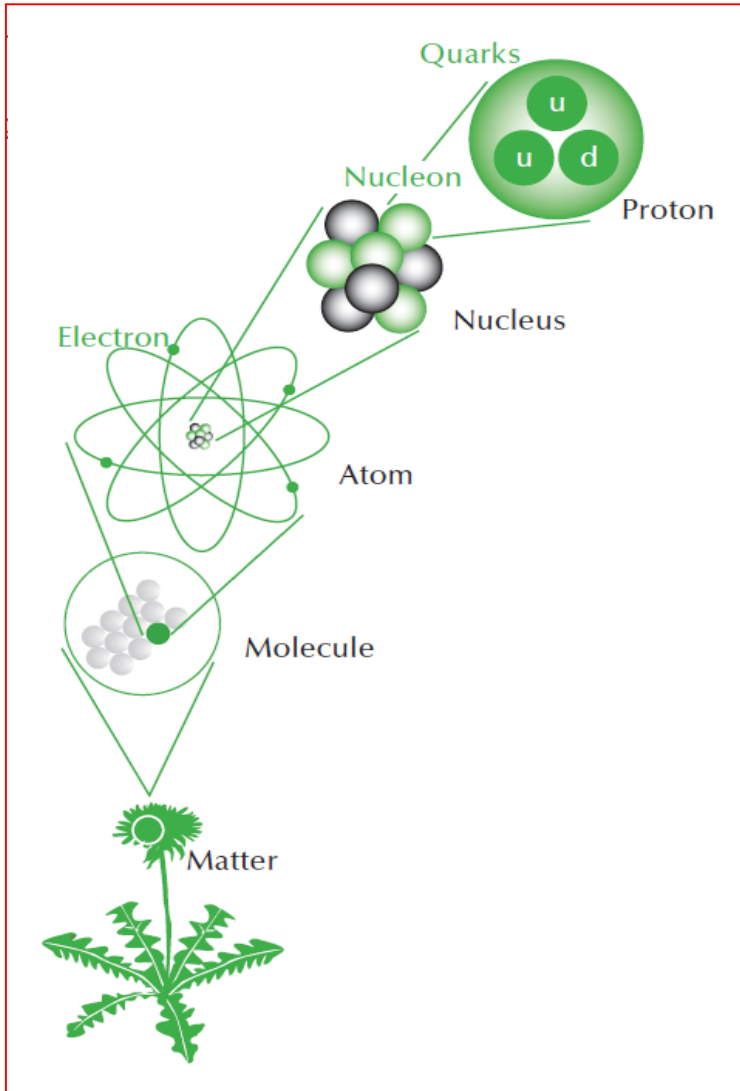
Bekannte elementare Materieteilchen

	Generation 1		Generation 2		Generation 3	
<b>geladene Leptonen</b>	Elektron	$e$	Myon	$\mu$	Tau	$\tau$
<b>Neutrinos (ungeladene Leptonen)</b>	Elektron-neutrino	$\nu_e$	Myon-neutrino	$\nu_\mu$	Tau-neutrino	$\nu_\tau$
<b>Quarks</b>	Up	$u$	Charm	$c$	Top	$t$
	Down	$d$	Strange	$s$	Bottom	$b$





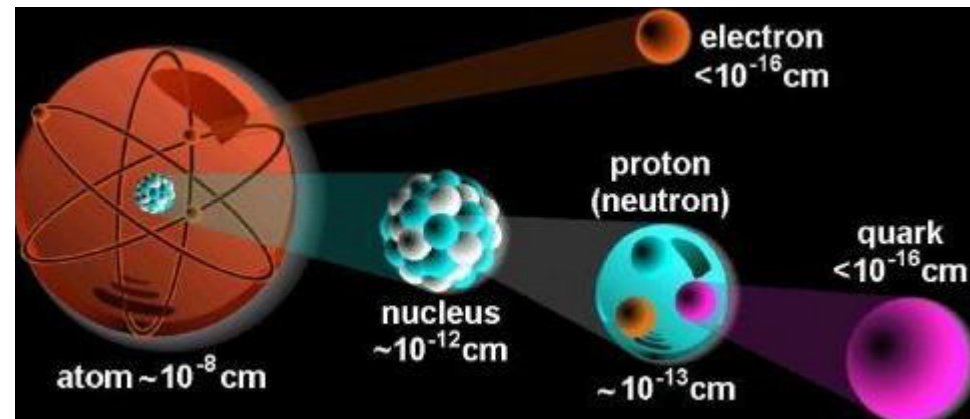
# Aufbau der Materie nach Standardmodell

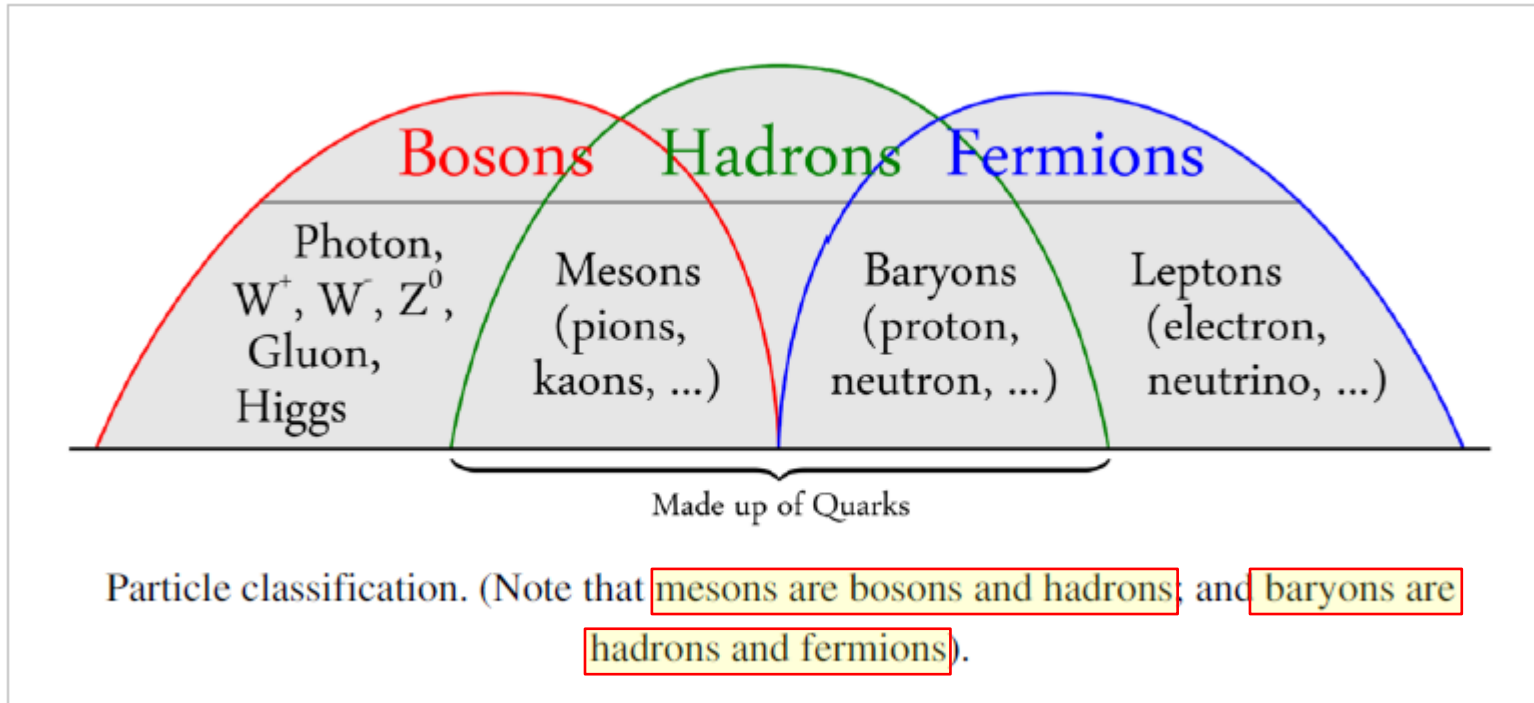


## Periodensystem der Elemente

1																	2									
H																	He									
3	4											5	6	7	8	9	10									
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne									
11	12											13	14	15	16	17	18									
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar									
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36									
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54									
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
55	56											72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba											Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88											104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra											Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71										
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu										
		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103										
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr										

## Größenverhältnisse





Quelle : Large\_Hadron\_Collider Wiki\_Book

## Klassifikationskriterien :

- **Bosonen / Fermionen** : nach Wert ihres Eigendrehimpulses (**Spins**)  
(geradzahlig / ungeradzahlig)
- **Hadronen** : nach der Art der Wechselwirkung untereinander  
(unterliegen alle der **Starken WW**); aus Quarks aufgebaut

# Standardmodell – experimentelle Untermauerung

## 1979 – erster Nachweis von Gluonen - DESY in Hamburg

Elektron-Positron-Kollisionen am PETRA Collider

→ „three-jet events“, bei denen 3 Strahlen von Teilchen in konischen Bündeln vom WW-Punkt wegfliegen

## 1983 - Entdeckung der W- und Z-Bosonen - CERN

beschreiben die Umwandlung von Quarks ineinander

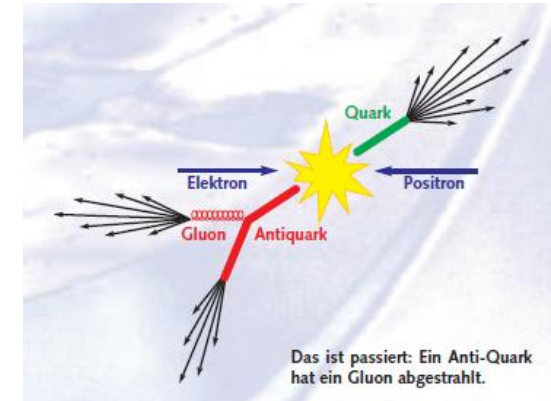
→ radioaktiver Zerfall von Atomen

→ Schwache Wechselwirkung → **Quantenflavourdynamik**

## 1995 – experimenteller Nachweis des massereichen Top Quarks - Fermilab Chicago

## 2002 – Erzeugung von Anti-Wasserstoff-Atomen (Antiproton & Positron) - CERN

(zerstrahlen nach ca.  $10^{-8}$  s bei Begegnung mit „normaler“ Materie)



*dennoch bleiben einige Beobachtungen, die mit dem Standardmodell derzeit nicht erklärt werden können*

→ *Suche nach Erweiterungen bzw. neuen Teilchen*

- Teilchen des Standardmodells werden charakterisiert durch **Quantenzahlen** „*Ladung*“, „*Spin*“, „*Farbladung*“
- diese können jeweils nur **wenige diskrete Werte** haben; nur für diese existieren in den Zustandsgleichungen (Schrödinger, Dirac, ...) überhaupt Lösungen
- die gefundenen **Massen der Teilchen** haben dagegen völlig unterschiedliche Werte ohne erkennbare Systematik  
warum haben die Teilchen überhaupt eine Masse?
- **Neutrinos** sollten lt. Standardmodell **keine Masse** haben
- erklärt nicht die **Dominanz von Materie** und das **Fehlen von Antimaterie** im Universum
- beschreibt die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung sowie deren Vereinheitlichung bei hohen Energien, aber **nicht die Gravitation**
- erklärt nicht die extrem verschiedene **Stärke der vier Wechselwirkungen**
- ist mit den derzeit bekannten Teilchen nicht in der Lage, verschiedene **kosmologische Beobachtungen** zu erklären, vor allem Befunde, die hinweisen auf
  - **dunkle Materie**
  - **dunkle Energie**

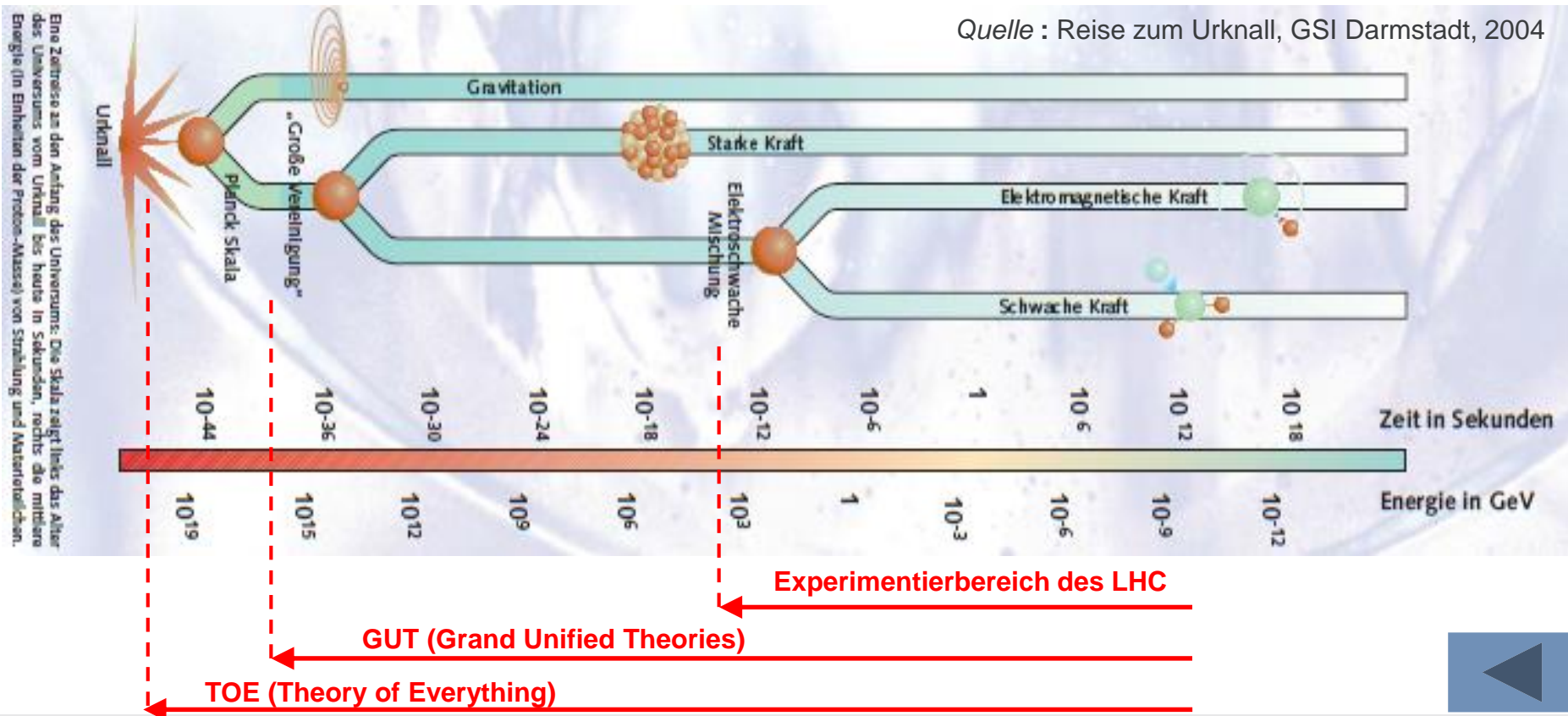
## Entstehung der Masse der Teilchen

- Standardmodell erklärt nicht, warum Teilchen eine Masse haben bzw. die Massen stark unterschiedlich sind
- Vereinheitlichung von Elektromagnetischer und Schwacher Kraft im Rahmen des Standardmodells funktioniert mathematisch nur, wenn alle kraftübertragenden Teilchen die Masse Null haben  
(→ Widerspruch zu Messungen : W- und Z-Bosonen haben Masse)
- Hypothese des **Higgs-Feldes** (Higgs, Englert, Brout - 1964)
  - Unmittelbar nach Urknall waren alle Teilchen masselos
  - Beim Ausdehnen und Abkühlen des Universums bildet sich unterhalb einer gewissen Schwelle durch Symmetriebrechung ein unsichtbares Kraftfeld (Higgs-Feld)
  - Teilchen erhalten ihre Masse durch WW mit diesem Higgs-Feld
  - Je stärker die jeweilige WW, desto höher die Masse des Teilchens
  - WW wird durch ein Boson vermittelt (**Higgs-Boson**)
- Mit dem **LHC** wurden **erstmalig Energien** erreicht, bei denen **erstmalig der Nachweis dieses Higgs-Bosons möglich** wurde



# Vereinigung der Kräfte hin zum Urknall

- Unmittelbar nach dem Urknall waren alle 4 Kräfte in einer universellen „Urkraft“ vereinigt
- Zuerst Abspaltung der Gravitation, dann die der Starken Kraft
- „später“ spaltet sich die verbleibende „Elektroschwache WW“ auf in die Schwache Kraft und die Elektromagnetische Kraft



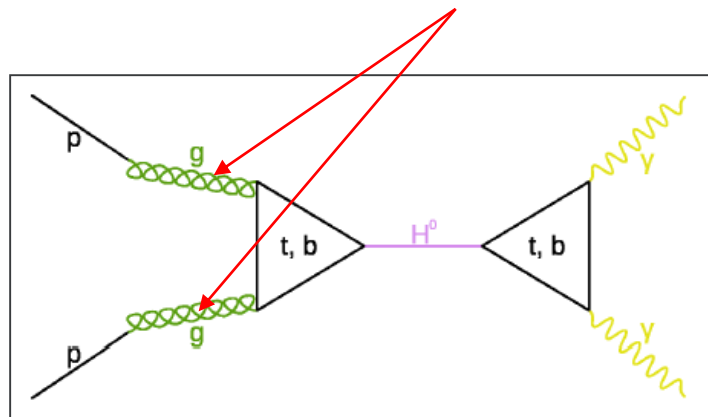
- Higgs-Teilchen **experimentell extrem schwer nachzuweisen** wegen

- ihrer großen vermuteten Masse
- der extremen Seltenheit ihrer Produktion (im LHC nur auf ca. 10 Milliarden Kollisionen ein Higgs-Teilchen gebildet)
- ihrer extrem kurzen Zerfallszeit ( $\approx 10^{-22}$  s)  
→ direkte Beobachtung unmöglich;

„**Gottesteilchen**“, verfälscht in Buch von Ledermann vom Verleger (1993), ursprünglich „**Goddamn particle**“

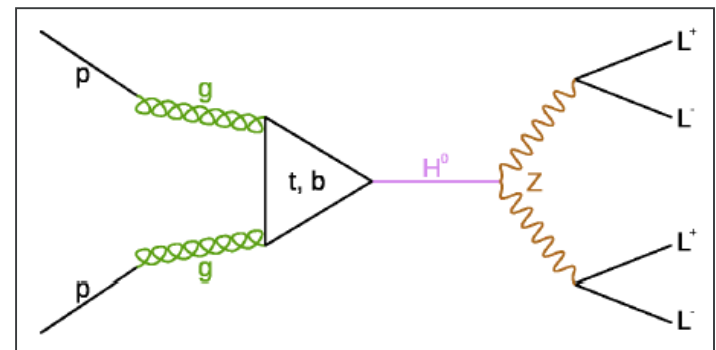
**Nachweis nur über Zerfallsprodukte und deren Eigenschaften**

- Mehrere Wege zur **Higgs-Produktion** bei Proton-Proton-Kollisionen möglich, z.B. über Fusion zweier Gluonen aus den Protonen



Zerfall des Higgs über „loop of virtual quarks“ in 2 Photonen

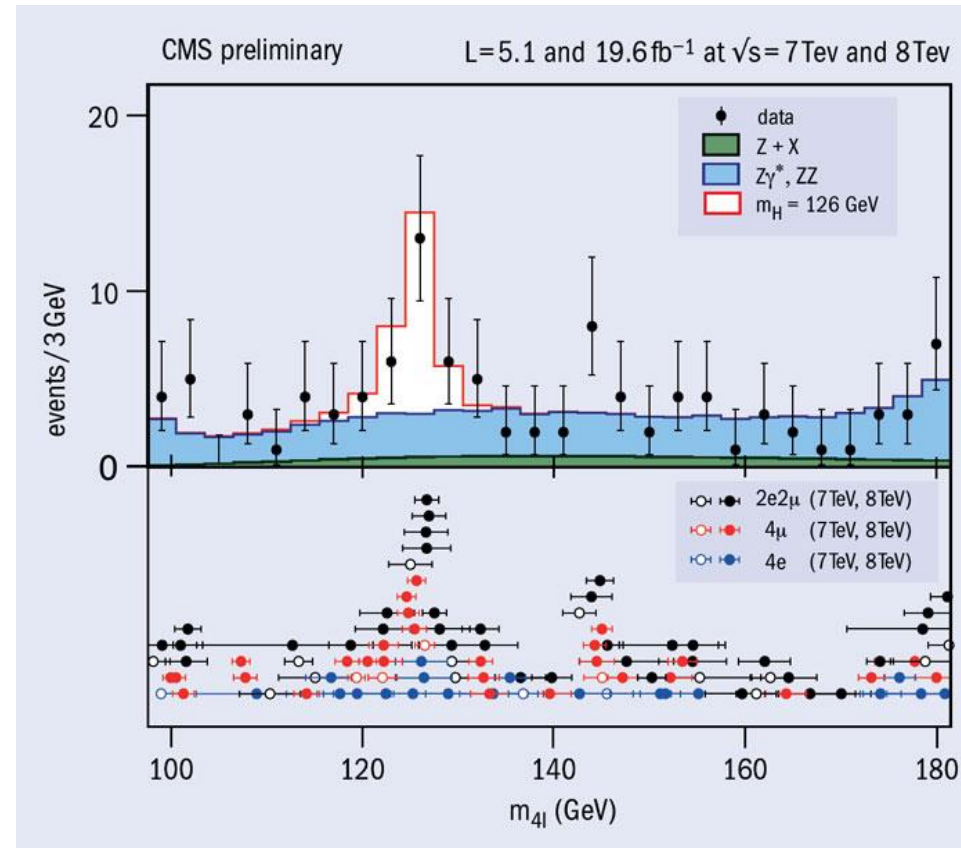
oder ...



Zerfall des Higgs über Z-Bosonen in 4 Leptonen (z.B. Myonen)

# „Higgs Teilchen gefunden !!“

- **Juli 2012:** mit den Detektoren CMS und ATLAS wurde für mehrere vorhergesagte Zerfallskanäle eine signifikante **Häufung von Events bei einer Teilchenmasse von ca. 126 GeV** gefunden
- Auswertung ergab eine Übereinstimmung der Eigenschaften mit den vom Standardmodell für das Higgs vorhergesagten Werten
  - Spin 0
  - Parität gerade
- Auswertung von mehr Events aus dem zweiten Run des LHC (2015-18)  
→ Daten durchweg **im Einklang mit** den Vorhersagen des **Standardmodells** (insbesondere die gemessene Häufigkeit der verschiedenen möglichen Zerfallskanäle des Higgs-Teilchens)

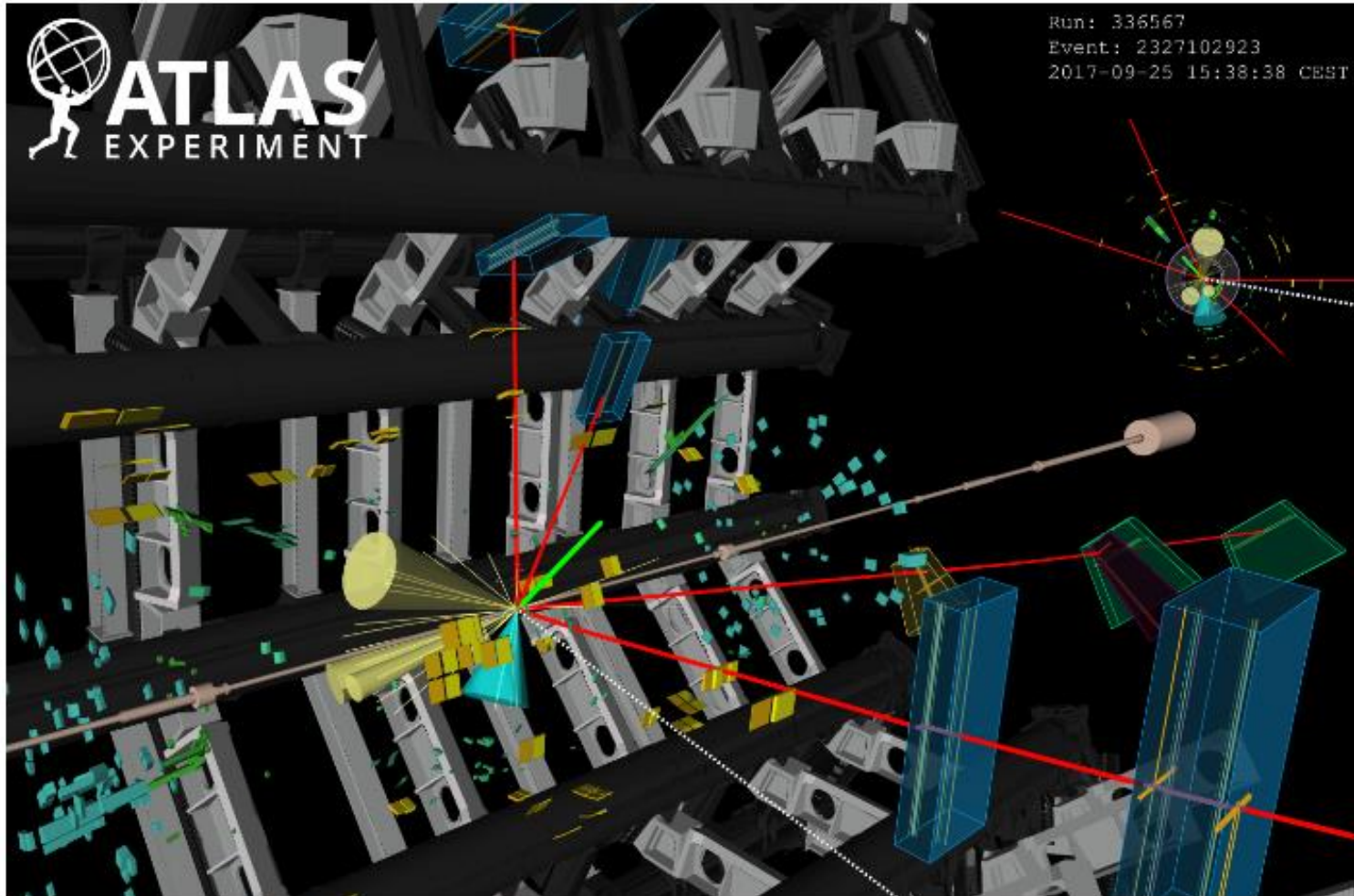


Distribution of the four-lepton events selected in the CMS analysis of  $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4l$ .

A clear accumulation of events is responsible for the excess  $6.7\sigma$  above the background-only expectation at 125.8 GeV

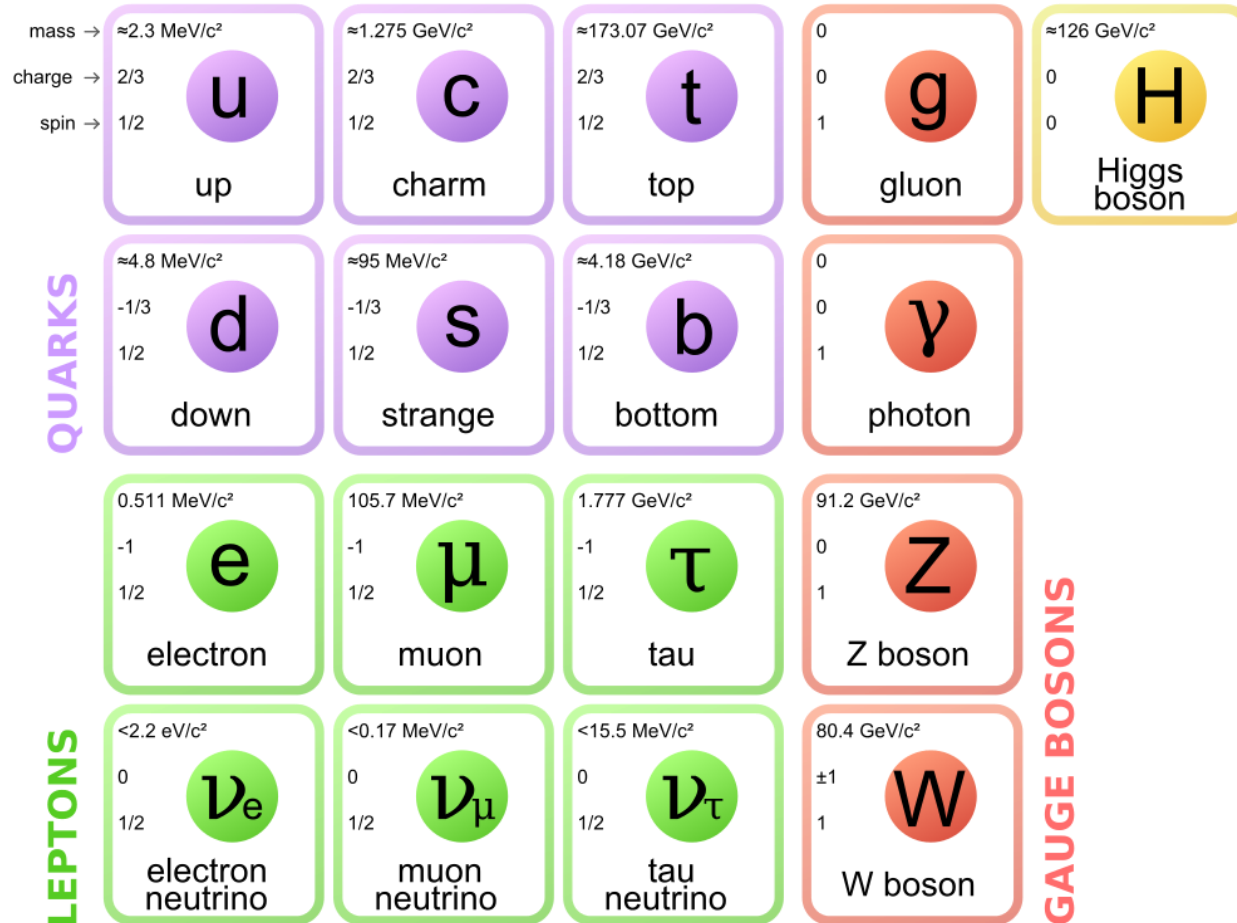


# Ein Event mit wahrscheinlichem Zerfall eines Higgs- Teilchens



An event recorded by ATLAS showing a candidate for a Higgs boson produced in association with two top quarks. The Higgs boson decays to four muons (red tracks). There is an additional electron (green track) and four particle jets (yellow cones) (Image: ATLAS/CERN)

# Erweitertes Teilchen-Schema im Standardmodell nach Entdeckung des Higgs- Teilchens



## Innere Struktur der Nukleonen (Proton, Neutron)

- Wie bilden sich Eigenschaften der Nukleonen aus denen der Quarks und Gluonen ?

Wie werden die Masse und der Spin des Protons aus ihren Bestandteilen gebildet ?

(Ruhmassen der Quarks  $< 2\%$  der Protonenmasse !

→ Rest steckt wahrscheinlich in kinetischer Energie der Quarks u. Bindungsenergie der Gluonen)

## Wie entsteht das Confinement ?

- Untersuchung des Phasenüberganges

**Quark-Gluon-Plasma** → gebundene Zustände als Nukleon

lt. Kosmologie ca.  $10^{-6}$  s nach dem Urknall

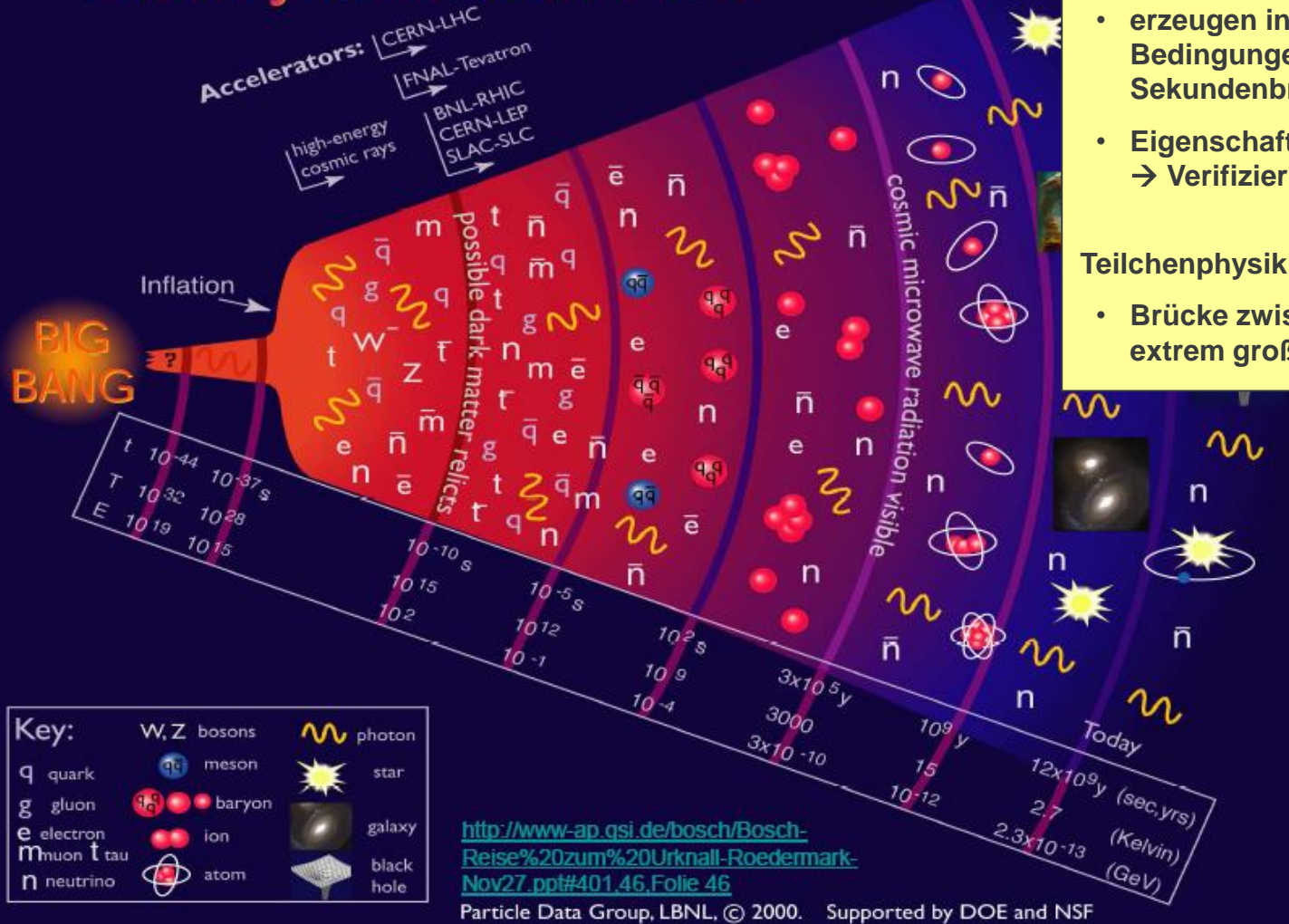
- Kollisionen mit **Schwerionenstrahlen** (Energie  $> 100$  GeV/Nukleon)

→ Energiedichten wie kurz nach dem Urknall

→ könnten ausreichen, um Quarks aus ihren gebundenen Zuständen herauszulösen und so beobachtbar zu machen

- **Mai 2011 : *erstes Quark-Gluon-Plasma* im LHC erzeugt**

## History of the Universe



### Teilchenbeschleuniger

- erzeugen in den Kollisionspunkten Bedingungen wie in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall
- Eigenschaften kleinster Teilchen → Verifizierung kosmologischer Theorien

### Teilchenphysik :

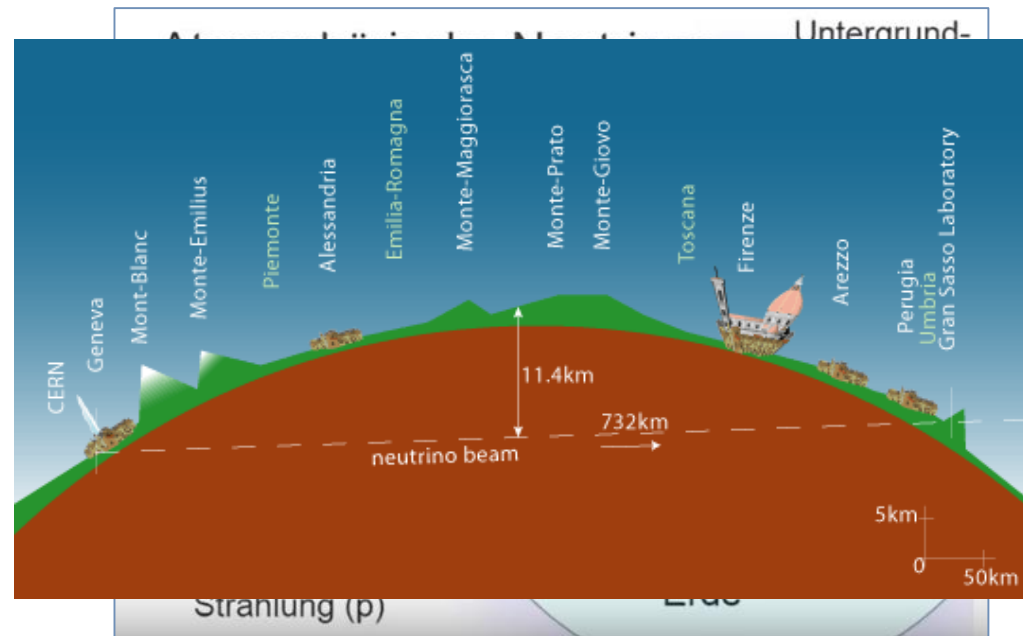
- Brücke zwischen extrem kleinen und extrem großen Dimensionen

# Ziele der LHC-Experimente (3) - Neutrinos

## CNGS Experiment (CERN Neutrinos to Grand Sasso)

- Strahl von Myon-Neutrinos im SPS-Ring von CERN erzeugt (Kollisionen von Protonen auf einem Graphit-Target)
- Über 730 km durch den Erdmantel zum unterirdischen LNGS-Labor am Gran Sasso (Italien) geschickt,
- Dort in OPERA-Detektor nachgewiesen

- **Ziel:**  
Nachweis, daß einige der Muon-Neutrinos sich durch Neutrino-Oszillationen in Tauon-Neutrinos umgewandelt haben (über die Reaktionsprodukte Tauonen)  
→ erlaubt Aussage, ob Neutrinos Masse haben oder nicht  
→ wichtig für kosmologische Modelle

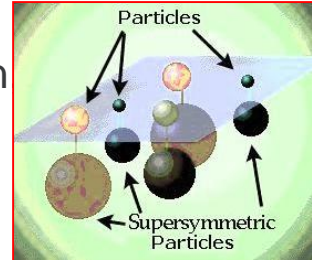


Thomas Lohse:  
Wie funktioniert die Welt –  
Vom Elementarteilchen zum Kosmos  
Vortrag Uni Stuttgart, Juni 2017

- **Mai 2010 : Nachweis der ersten *Umwandlung Myon- in Tauon-Neutrinos* am Gran Sasso**  
→ Neutrinos müssen eine (sehr geringe) **Masse** haben

## SUSY-Theorien

- Zu jedem Materieteilchen (Fermion, **Spin**  $\frac{1}{2}$ ) sollte ein Kraftteilchen (Boson, **Spin ganzzahlig**) aber ansonsten gleichen Quantenzahlen existieren und umgekehrt → „**Superpartner**“ (Unterscheidungsparameter : **Spin**)



→ Analogie zur Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie (Parameter : Ladung)

- Bei perfekter Symmetrie müssten auch die Massen der jeweiligen Superpartner gleich sein  
→ dann müssten die Partnerteilchen beobachtbar sein
- *Vermutung* : infolge **Brechung der Supersymmetry** könnten die supersymmetrischen Teilchen deutlich höhere Massen haben als ihre bereits bekannten Partner („Supergap“)  
→ evtl. mit bisherigen Beschleuniger nicht nachweisbar
- sind die leichtesten der SUSY-Teilchen **Bausteine der Dunklen Materie** ?
- LHC könnte mit seinen Energien eventuell in diese Bereiche vorstoßen und die leichtesten der Superpartner-Teilchen nachweisen
- Messung eines *Meson* → *Myon-Zerfalls* ( $B_s^0 \rightarrow \mu_+ \mu_-$ ) am LHCb-Detektor (Nov.2012):  
Ergebnisse konform mit Standardmodell, Widerspruch zu meisten Supersymmetrie-Modellen
- **bisher am LHC noch keinerlei Hinweise auf Existenz dieser komplementären „Superpartner“-Teilchen gefunden**

# Ziele der LHC-Experimente (5) - Unsymmetrie zwischen Materie und Antimaterie

## Warum finden wir im beobachtbaren Universum nur Materie und keine Antimaterie ?

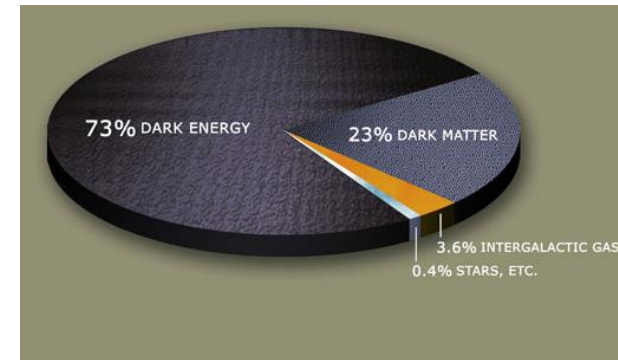
- Universum nach dem Urknall perfekt symmetrisch bezüglich der Ladung der Teilchen
  - Materie und Antimaterie müssten sich nach dem Urknall in gleichen Mengen gebildet haben
  - *Annihilation* : bei Aufeinandertreffen von Materie und Antimaterie wandelt sich diese komplett in Strahlung um
- Spontane Symmetriebrechung (Sacharow, 1964)
  - winziges Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie bildet sich nach dem Urknall (Unsymmetrie  $\approx 10^{-9}$ )
  - winzige Unsymmetrie experimentell bestätigt beim Zerfall von s- und b-Quarks
- Alle Antimaterie ist durch Annihilation mit der gleichen Materiemenge zerstrahlt (ca.  $10^{-6}$  s nach Urknall)
- Heutiges beobachtbares Universum : ausschließlich Materie
  - Rest aus winzigem Materieüberschuss
- April 2013: Zerfall eines  $B_s$ -Mesons am LHCb-Detektor : **Verletzung der CP-Symmetrie**
  - evtl. Erklärung, warum Materie und Antimaterie nach Urknall nicht komplett annihilirt sind



## Warum entspricht die Bewegung der Sterne und Galaxien nicht dem was man infolge der Gravitation auf der Basis ihrer beobachtbaren Massen erwarten müsste ?

→ **Dark Matter** (erstmals postuliert von F. Zwicky 1934)

- Müsste etwa 6 mal häufiger sein als beobachtbare Materie
- Ist extrem „reaktionsträge“, wechselwirkt praktisch nicht mit normaler Materie
- Erkennbar nur an der Gravitationswirkung auf sichtbare Materie
- Entstehung innerhalb der ersten Nanosekunde nach dem Urknall, danach kaum verändert
- Vermutete Partikel der Dunklen Materie
  - ❖ **WIMPs** (**w**eakly **i**nteracting **m**assive **p**articles)  
wechselwirken nur über Gravitation und schwache Kernkraft  
identisch mit leichtesten Superpartnerteilchen ??
  - ❖ **Super-WIMPs**  
entstanden in den ersten Nanosekunden nach Urknall durch Zerfall der WIMPs  
wechselwirken nur über Gravitation, nicht über schwache Kernkraft



## Warum dehnt sich Weltall trotz der Gravitation sogar beschleunigt aus und zieht sich nicht wegen dieser zusammen ?

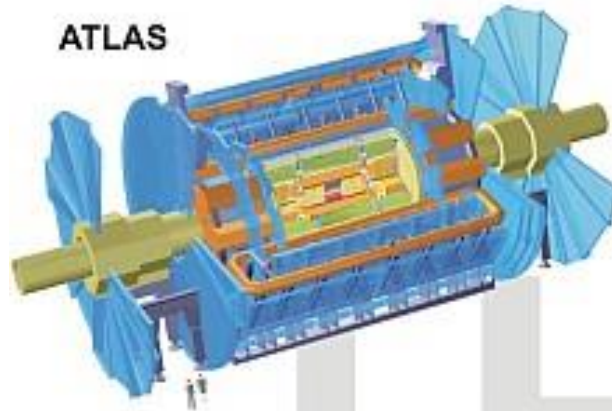
→ **Dark Energy**

- Erklärt beschleunigte Ausdehnung des Weltalls (nicht konstant wie nach Hubble)
- Natur noch nicht klar, muß aber den Raum homogen ausfüllen, nur über Gravitation wechselwirken und *repulsiv* wirken (negativer Druck)

**woraus bestehen die 95% des Universums, die wir nicht sehen können?**



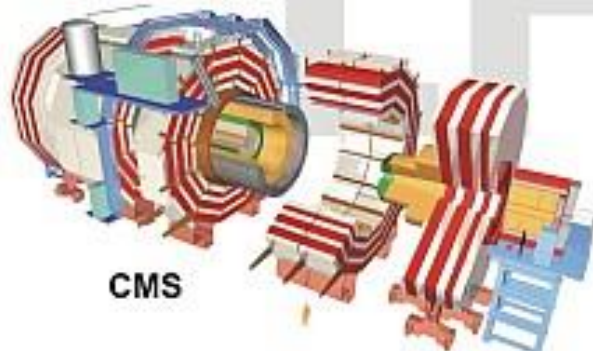
# Die wichtigsten LHC-Experimente



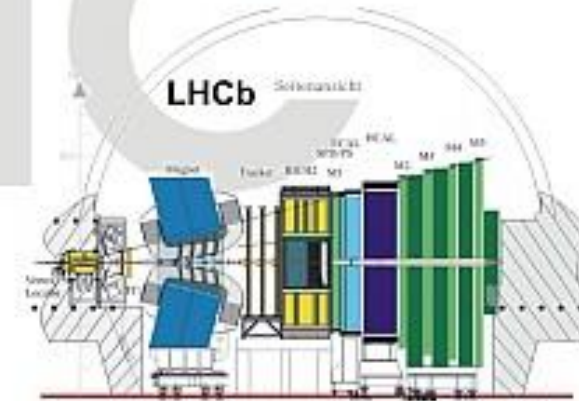
ATLAS



ALICE



CMS

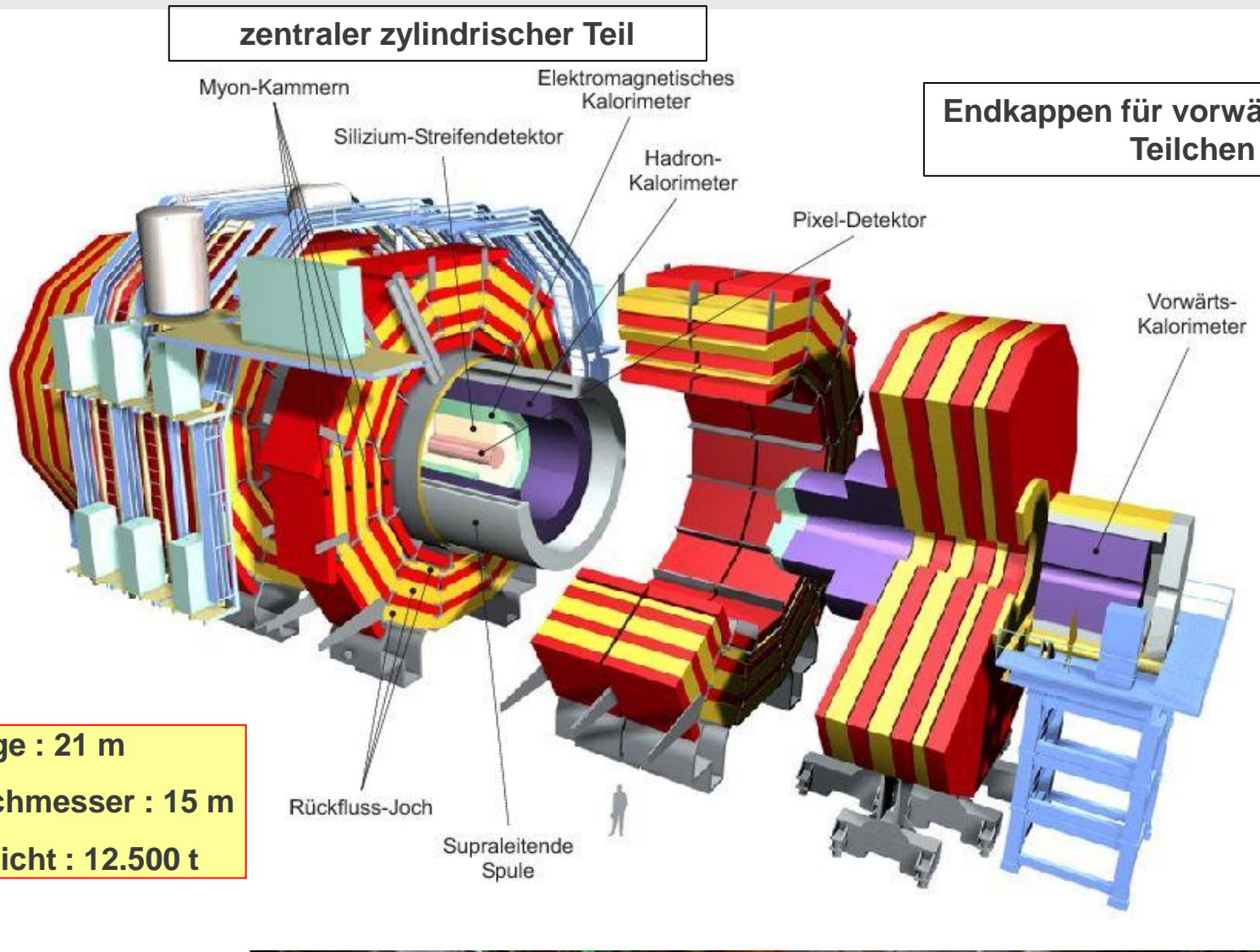


LHCb

LHC

CMS	to search for the Higgs boson, extra dimensions, and particles that could make up dark matter
ATLAS	to search for the Higgs boson, extra dimensions, and particles that could make up dark matter
LHCb	to understand why we live in a Universe composed almost entirely of matter, but no antimatter
ALICE	to study a state of matter known as quark-gluon plasma
TOTEM	to measure the size of the proton and also monitor the LHC's luminosity
LHCf	to simulate cosmic rays to interpret and calibrate large-scale cosmic-ray experiments

# CMS-Detektor (Compact Muon Solenoid)



**Länge : 21 m**  
**Durchmesser : 15 m**  
**Gewicht : 12.500 t**

# Aufbau der Detektoren (Beispiel CMS)

**innen : Spurdetektoren**  
 in starkem Magnetfeld werden  
 Bahnen geladener Teilchen  
 gekrümmt  
 Aufzeichnung mit Si-Elementen

**innen : Si-Pixeldetektoren für Teilchen,**  
 die kurz nach Entstehung wieder  
 zerfallen

**danach : Si-Streifendetektoren zur**  
 Verfolgung hochenergetischer  
 Leptonen

→ Informationen über Impuls u. Masse  
 der Teilchen  
 räumliche Auflösung im  $\mu\text{m}$ -Bereich  
 zeitliche Auflösung im ns-Bereich

~~mehreren sandwichartigen Schichten~~  
 von Szintillatoren

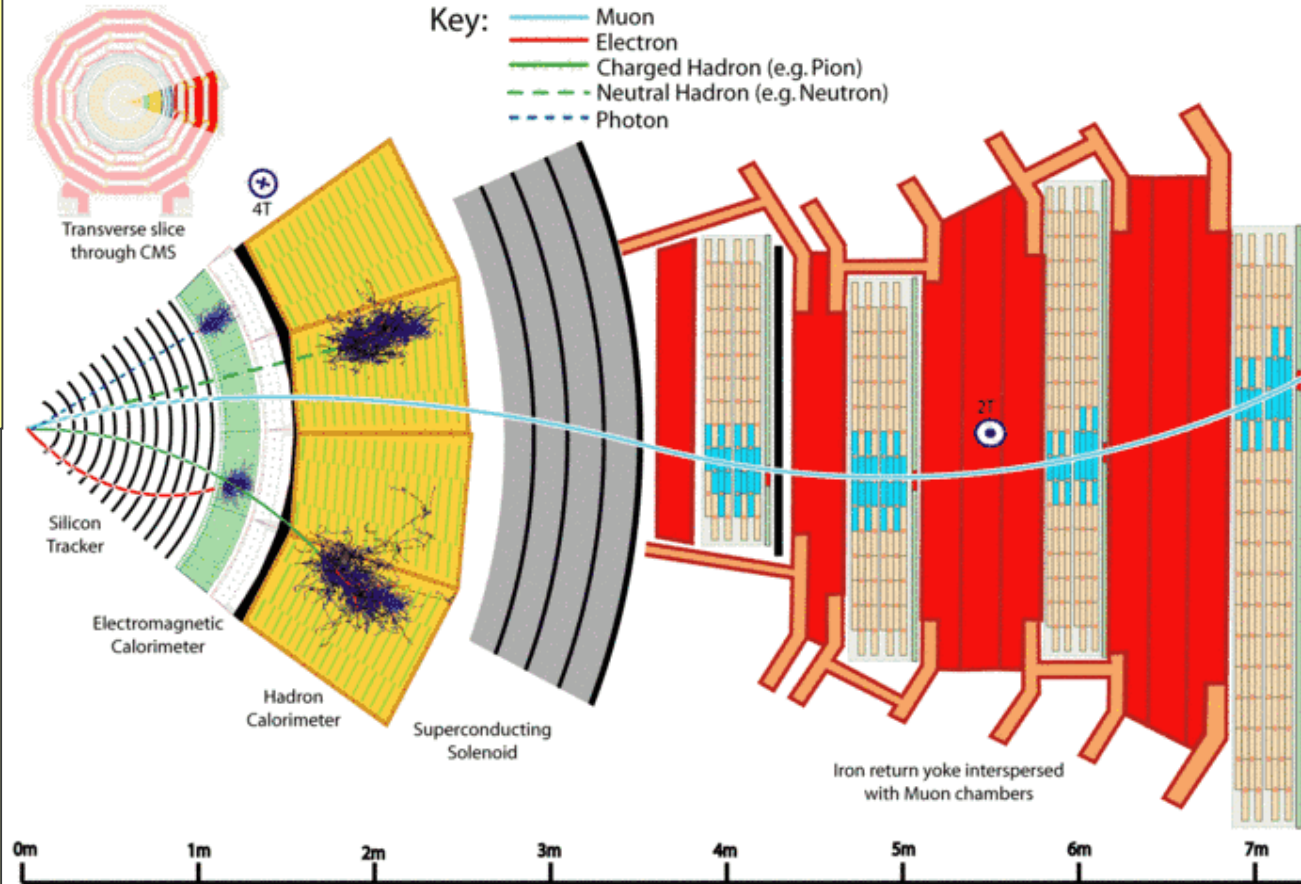
→ Schauer von Sekundärteilchen  
 aus deren Anzahl u. Energie  
 Informationen über Energie  
 des Primärteilchens

**innen : Elektromagnet. Kalorimeter**  
 absorbiert Photonen und Elektronen

**darum : Hadronisches Kalorimeter**  
 misst hadronische Zerfallsprodukte  
 (Protonen, Neutronen, über Energie-  
 u. Impulsbilanz auch Neutrinos)

## Schnitt durch eine Scheibe des CMS Detektors

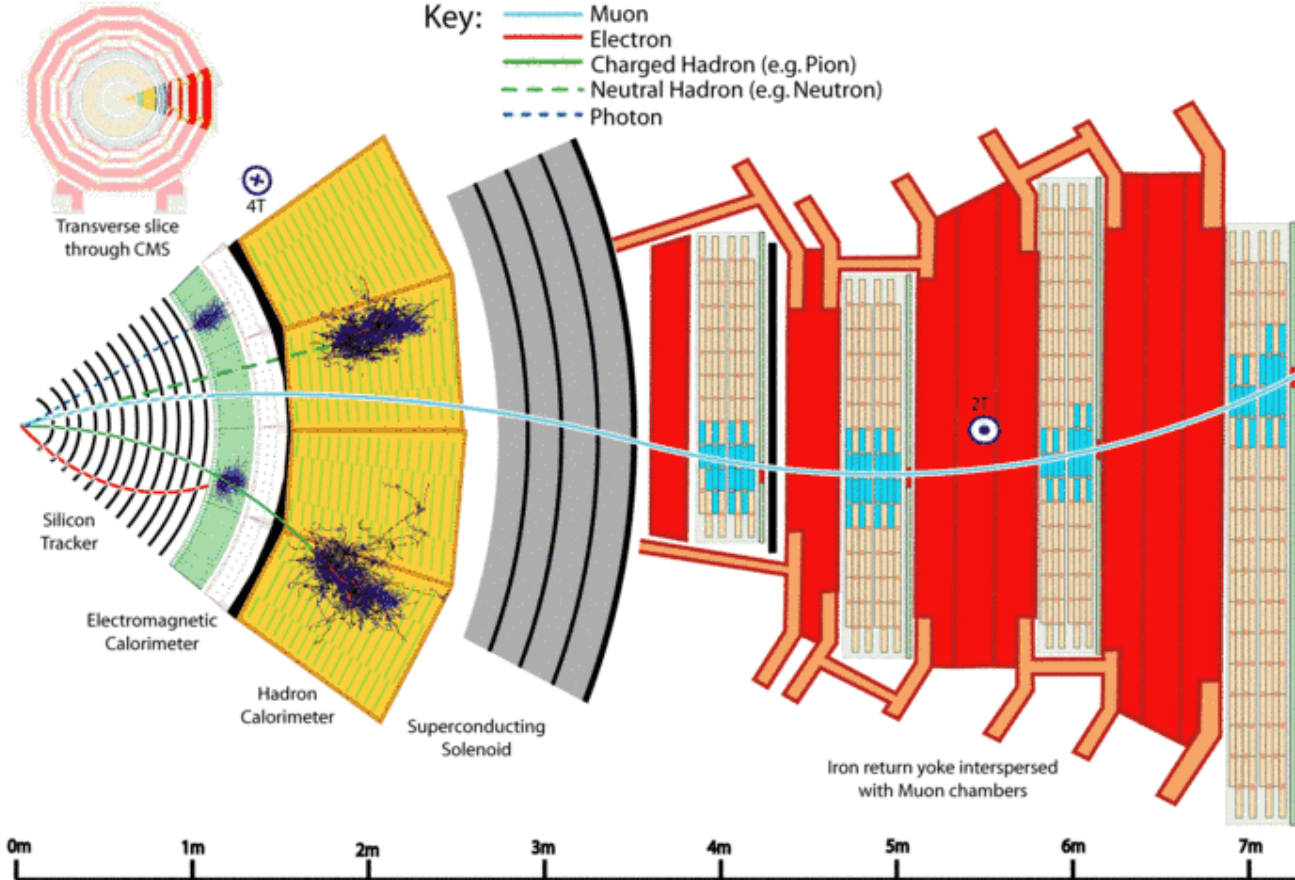
Die Wege der unterschiedlichen Teilchen in den  
 verschiedenen Detektorkomponenten sind eingezeichnet.



# Aufbau der Detektoren (Beispiel CMS)

## Schnitt durch eine Scheibe des CMS Detektors

Die Wege der unterschiedlichen Teilchen in den verschiedenen Detektorkomponenten sind eingezeichnet.



**um Si-Tracker und Kalorimeter :**  
supraleitende Magnetspule  
( $T = -270^\circ \text{C}$ )  
Länge 13m , Durchmesser 6m  
Feldstärke 4 T

**außen :** alternierende Lagen  
von Myonenkammern und  
Jochteilen zur Rückführung  
des Magnetflusses

Myonen passieren innere Schichten  
ohne WW  
in den gasgefüllten äußeren Drift-  
kammern ionisieren sie das Gas  
Detektion über Stromfluss zwischen  
den Elektroden in den Kammern

Bahnen der Myonen durch  
Magnetfeld (2 T) zwischen den  
Jochlagen gekrümmt

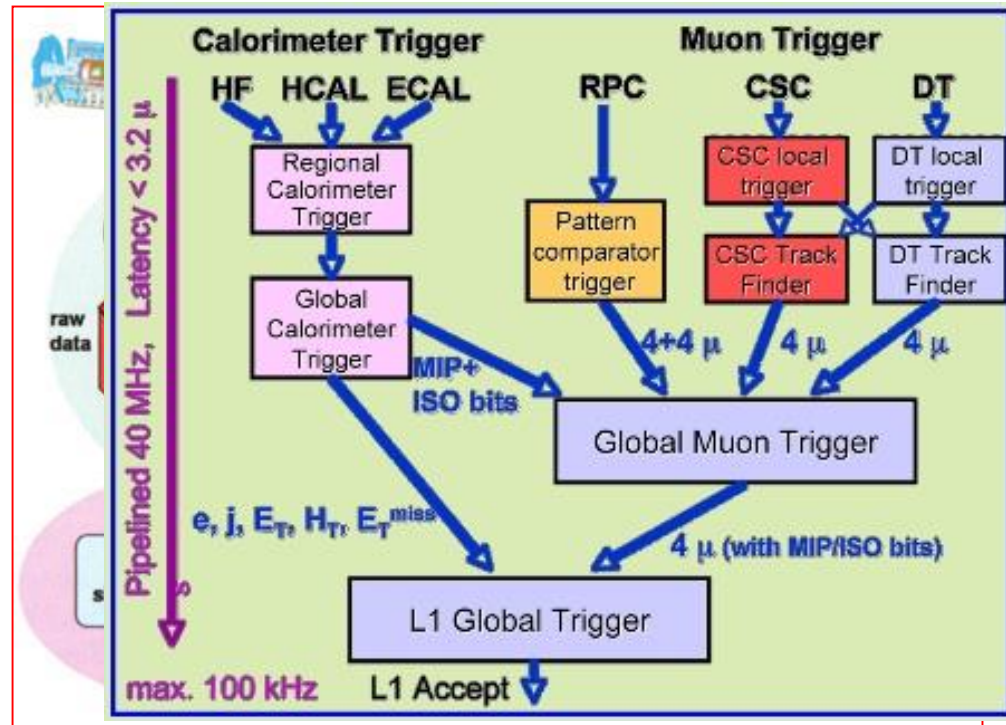
- LHC enthält in allen Detektoren ca. 150 Mio. Sensoren
- jeder liefert pro Sekunde 40 Mio. mal Daten
- Kollisionsrate : 600 Mio./s ; Rohdatenmenge pro Kollision ca. 1 MB  
 → bei kompletter Speicherung Volumen von 600.000 GB pro Sekunde nötig  
 → unrealistisch  
 → mehrstufige Trigger-Algorithmen → Vorfilterung & Selektion interessanter Events

- ca. 100 interessante Kollisionen pro Sekunde passieren den Trigger und werden gespeichert

- Tatsächlich gespeicherte Datenmenge:  
 $50 \cdot 10^{15}$  Bytes = 50 Petabytes  
 = **50 Mio. GB pro Jahr**

→ entspricht CD-Stapel von 60 km Höhe !

- Auswertung weltweit  
 → neues Computernetzwerk  
**WLCG = Worldwide LHC Computing Grid**



- **Verarbeitung der LHC-Daten im WLCG**
- **4 Vernetzungsebenen (Tiers)**
  - **Tier 0 : CERN-Datenzentrum**
  - **Tier 1 : 11 Computer-Zentren in Europa, USA & Asien**

These are large computer centres with sufficient storage capacity and with round-the-clock support for the Grid. They are responsible for the safe-keeping of a proportional share of raw and reconstructed data, for the reprocessing and safe-keeping of corresponding output, for the distribution of data to Tier 2s and safe-keeping of a share of simulated data.

These eleven Tier 1 sites are:

Canada	TRIUMF
Germany	KIT
Spain	Port d'Informació Científica
France	IN2P3
Italy	INFN
Nordic countries	Nordic Datagrid Facility
Netherlands	NIKHEF / SARA
Taipei	ASGC
United Kingdom	GridPP
USA	Fermilab-CMS
USA	BNL ATLAS

- **Tier 2 : 170 Zentren weltweit**

