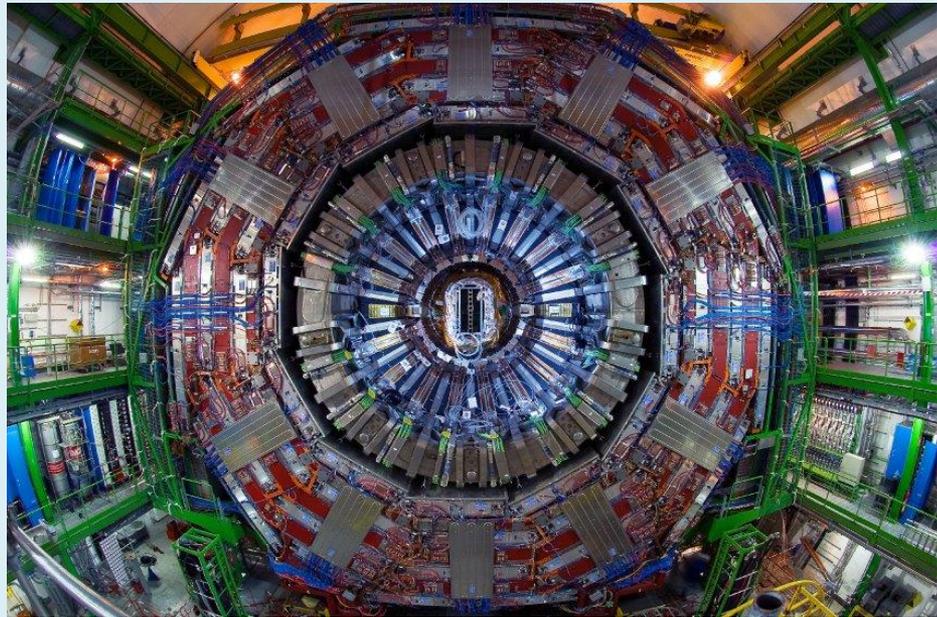


Cern – die grosse Suche nach den kleinsten Teilchen

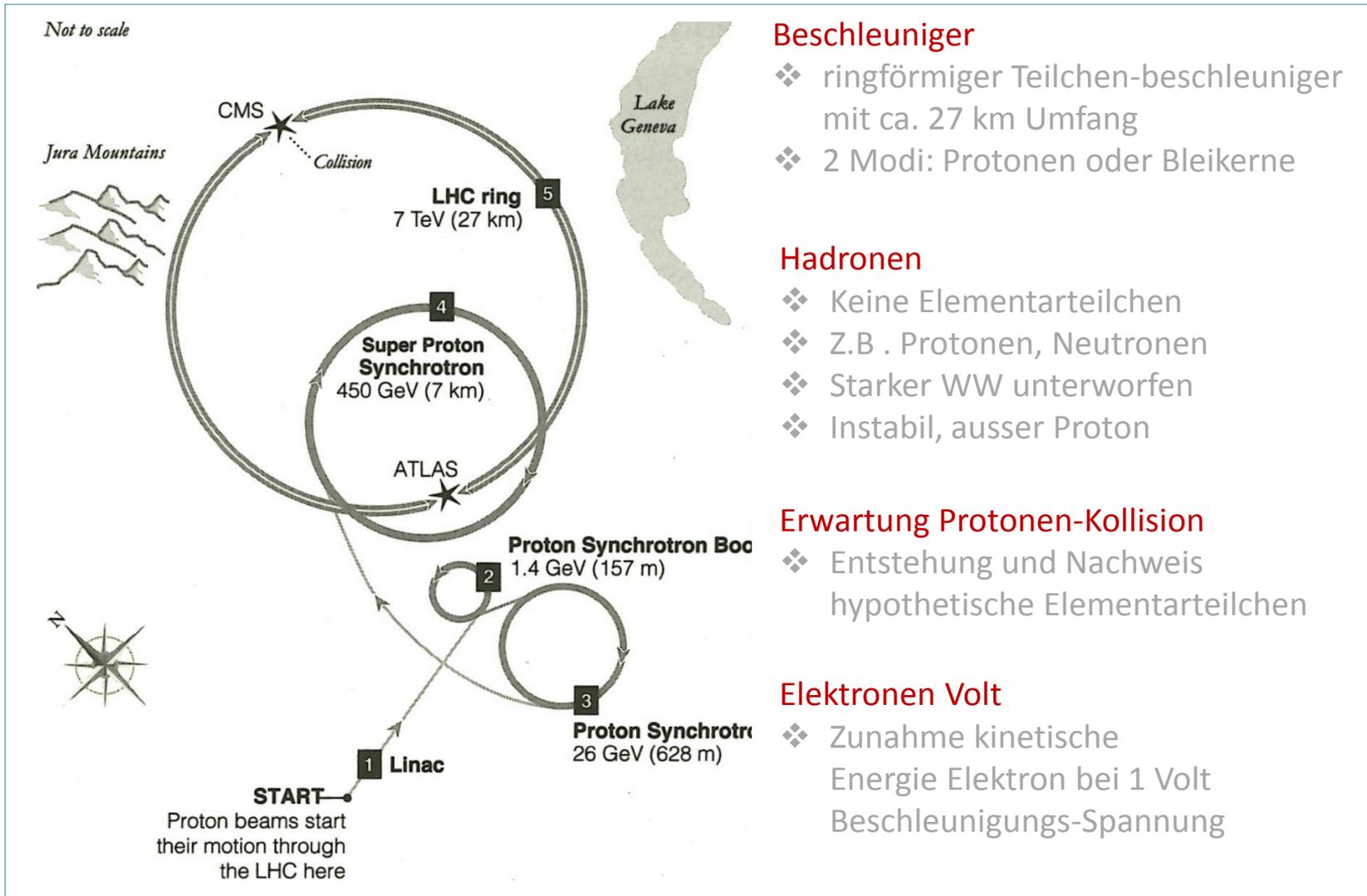


Dezember 2012
Moka Badertscher

Inhalt

1. LHC – Large Hadron Collider
2. Detektoren
3. Datenverarbeitung
4. The worlds next topmodel
5. Entdeckungen: Higgs, Kaluza-Klein
6. Was zu entdecken bleibt
7. Ausblick

LHC Large Hadron Collider: Beschleuniger



LHC Large Hadron Collider: Magnete

Injektion / Extraktion

Injection

Bedingungen

- ❖ Supraleitfähigkeit der Magnete : -271.3 °C
- ❖ Abkühlen eines Sektors: 1 Monat
- ❖ Vorkühlen: mit 6000 T flüssigem Stickstoff auf -193 °C
- ❖ Endkühlen: Mit 140 T flüssigem Helium -271.3 °C
- ❖ Dipolmagnete schrumpfen um einige Zentimeter
- ❖ Ausgeklügeltes Helium-Verteil-System von Erdoberfläche aus

LHC Large Hadron Collider: Dipolmagnete



Magnete für ringförmige Bewegung

- ❖ 1232 Dipolmagnete
- ❖ Länge Dipolmagnet: 14.3 m
- ❖ Gewicht Dipolmagnet: 30 Tonnen
- ❖ Preis Dipolmagnet: 700'000 €
- ❖ Magnetfeld: 8.3 Tesla

Maximale Stromstärke

12'000 Ampere

Gefahren und Sicherheiten

- ❖ Wenn etwas schief geht beim Kühlen: Supraleitung Magnete kaputt
- ❖ Energie in Dipolen muss unbedingt korrekt dissipieren
- ❖ Durch Detektion von Spannungs-Inkonsistenzen → Sicherheitssystem
- ❖ Im Ernstfall: sofortiges Freilassen dieser Energien < 1 s.

Crash in 2008

- ❖ Problem in supraleitendem Verbindungsteil zwischen 2 Dipolen

LHC Large Hadron Collider

Separierung

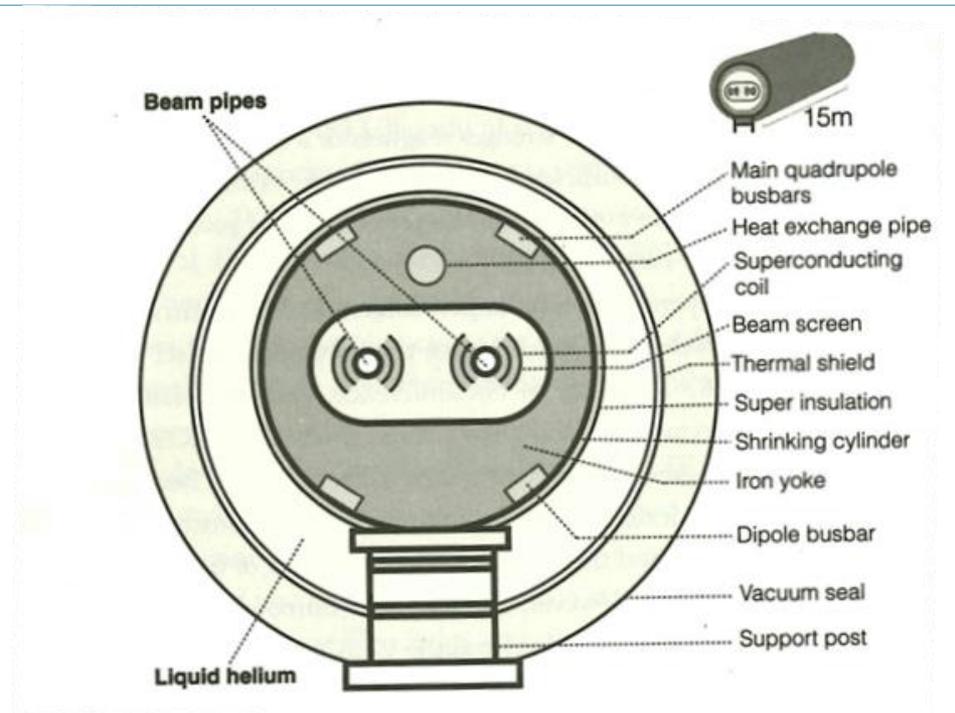
- ❖ Mit heissem Wasserstoff

„Kolonne“

- ❖ Durch Magnetfelder
- ❖ Strahlen unterteilt in Pakete

Protonenstrahl

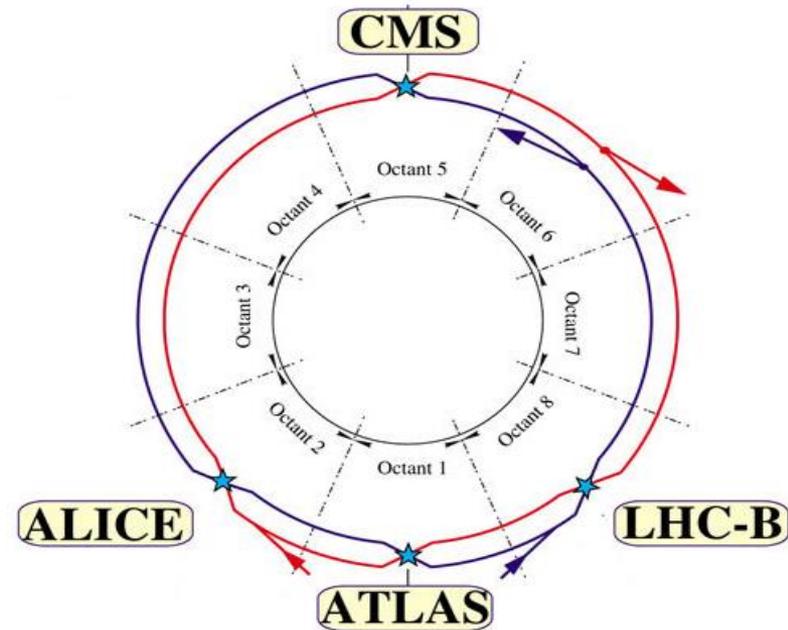
- ❖ 1374 Pakete pro Strahl
- ❖ Abstand Pakete:
- ❖ Praktisch Vakuum in Pipes
- ❖ Kollimatoren schützen Strahlrohre und Magneten vor abweichenden Teilchen
- ❖ Abweichende Teilchen können Supraleitung zerstören



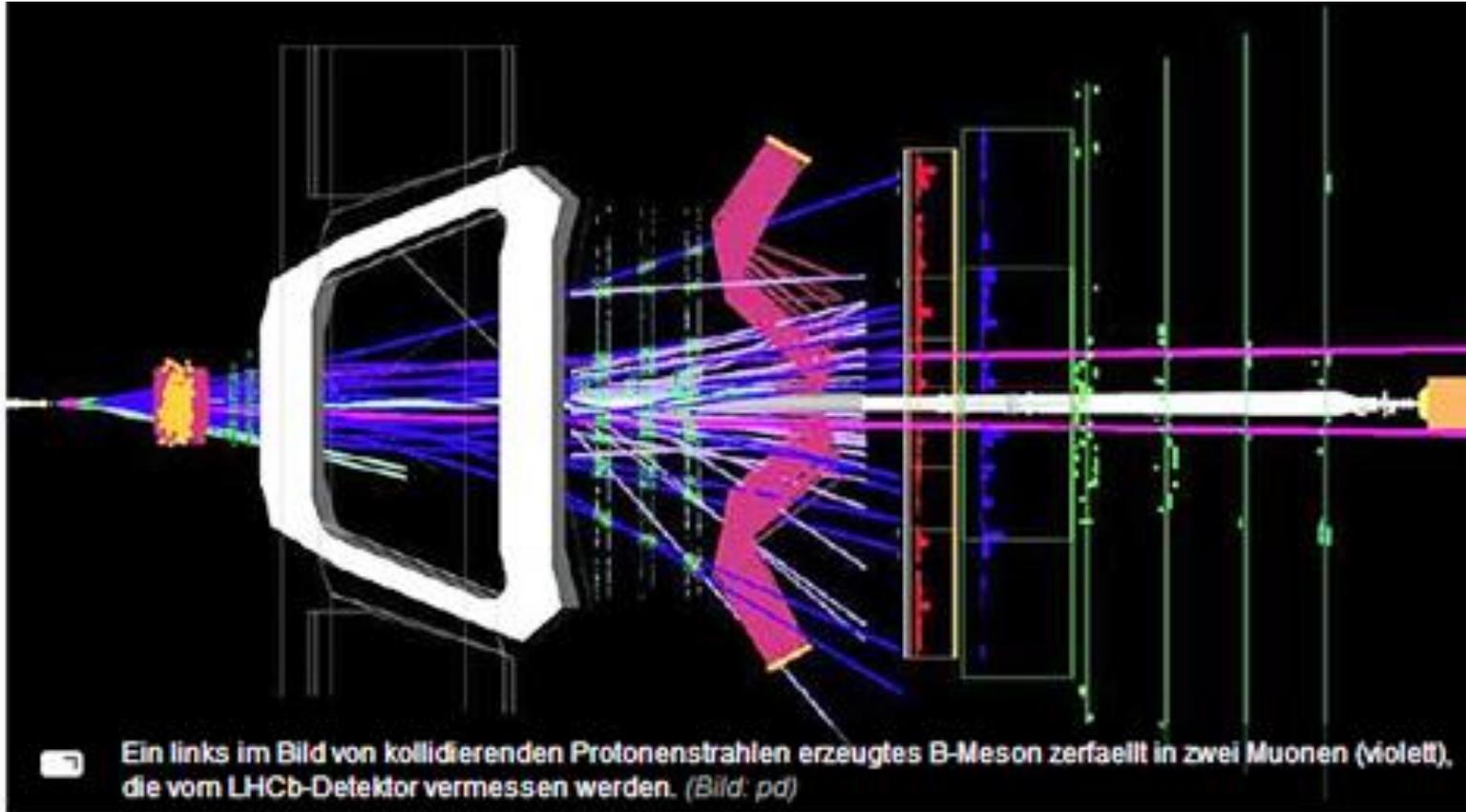
LHC Large Hadron Collider

Kollisionpunkte

- ❖ Fokussierungssystem durch 392 Quadropol - Magnete
- ❖ Kollision genau im Zentrum des Detektors
- ❖ Kreuzungswinkel Atlas: 0.016 Grad
- ❖ Nur Paket - Paket Kollision → sonst Daten konfus
- ❖ Beam zusammengedrückt auf 10^{-6} m
- ❖ Ca. 20 Protonen kollidieren head-on



LHC Large Hadron Collider



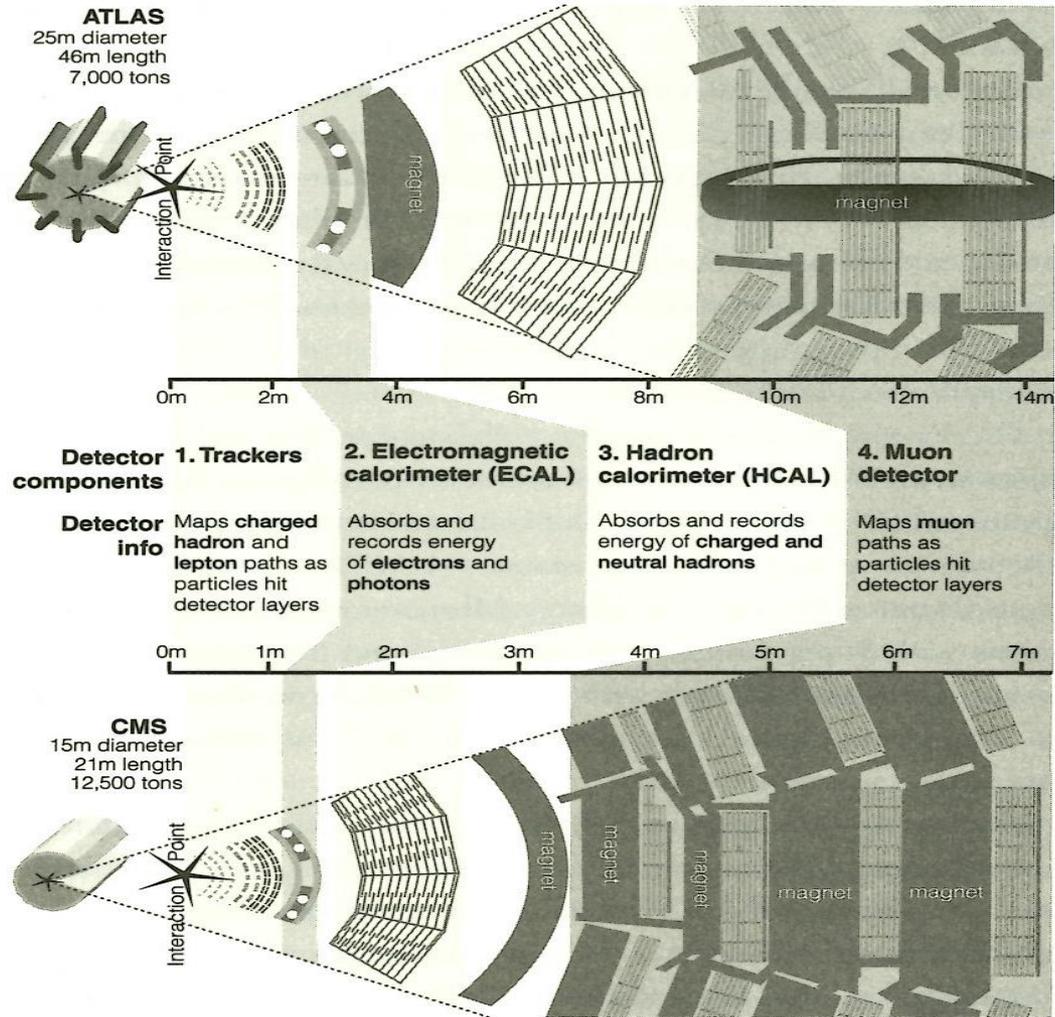
LHC Large Hadron Collider

Vergleich diverse Beschleuniger:

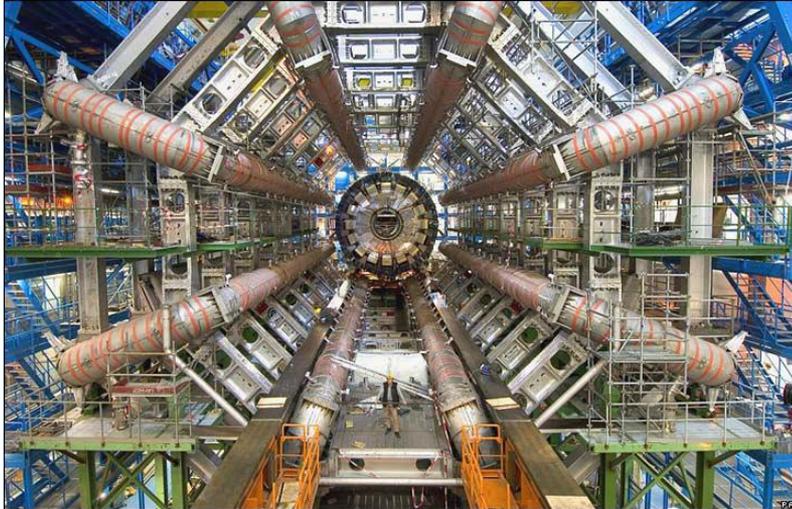
- einige wichtige Experimente

Name	Ort	Art	E_{cm} [GeV]	Zeitraumen	Glanzstück
LEP	CERN, Genf	e+e	209	1989-2000	Z-, W-Boson
HERA	DESY, Hamburg	e+p	318	1992-2007	Gluon
Tevatron	Fermilab, Chicago	p+p	2000	1983-2010(?)	Top-Quark
LHC	CERN, Genf	p+p	14000	2010 -	Higgs-Boson?, ...
ILC	?	e+e	500-1000	201? -	...

Detektoren



Detektoren: Datenmenge



ATLAS

CMS

- ❖ Wie Digitalkamera von 70 MP, pro Sekunde 40 Millionen Bilder
- ❖ bis zu 40 Millionen Protonenstrahlkreuzungen/s → **Spezifisches Triggersystem**



Datenverarbeitung: Atlas

Trigger – System

❖ Triggerstufen sind untereinander über Analysen- und Steuersoftware mit übrigen Detektorbestandteilen verbunden

❖ Trigger – System **Atlas**: Hauptstufen

Level 1: Hardware-Prozessoren: Vergleich mit grober Auflösung von Daten aus Proton-Proton Kollisionen → von 40 Mio./s nur 75'000 weiter geleitet

Level 2: Programmierbare Prozessoren: Mit verbesserter Auflösung Analyse → < 1000 Ereignisse/s weiter geleitet

Ereignisfilter: Grossen Farm von vernetzten Prozessorkernen : Ereignisse werden gründlich analysiert → Filter passieren nur ca 200/s → gespeichert und für WLCG bereitgestellt

Datenverarbeitung: CMS Trigger

Trigger: Was sind «interessante Ereignisse»?

- Physik Studien für CMS wurden mit Monte Carlo Event Generator simuliert
- auf folgende Objekte wird getriggert:
 - μ Myonen
 - μ_1 isolierte Myonen (ohne Jet)
 - e electron/photon
 - *jet* (Energie Konzentration in Kalorimetrie)
 - τ tau trigger
 - E_1^{miss} missing transverse energy
 - 2μ , $2e$, $e\mu$, 2 jets, 3 jets... multi-object triggers
- pp Kollisionen produzieren hauptsächlich Hadronen mit transversalen Impulsen $p_t \sim 1$ GeV
- interessante ("alte/neue") Physik beinhaltet Teilchen (Leptonen, Hadronen) mit hohen transversalen Impulsen:
 - $W(80 \text{ GeV}/c^2) \rightarrow e\nu: p_t(e) \sim 30\text{-}40 \text{ GeV}$
 - $H(\sim 115 \text{ GeV}/c^2) \rightarrow \gamma\gamma: p_t(\gamma) \sim 50\text{-}60 \text{ GeV}$

Institut für Hochenergiephysik, ÖAW

Monte Carlo Simulation: Verfahren aus der Stochastik / Basis: sehr häufig durchgeführte Zufallsexperimente

Datenverarbeitung: CMS Trigger

Trigger: Wie werden interessante Ereignisse gefunden?

Trigger Stufe 1:

- ❖ Boards, in VHDL programmiert
- ❖ Sehr schnell, übersetzt Physik in Maschinensprache
- ❖ Detektor-Subsysteme mit eigener Elektronik
- ❖ Zentrale Stelle: Global Trigger

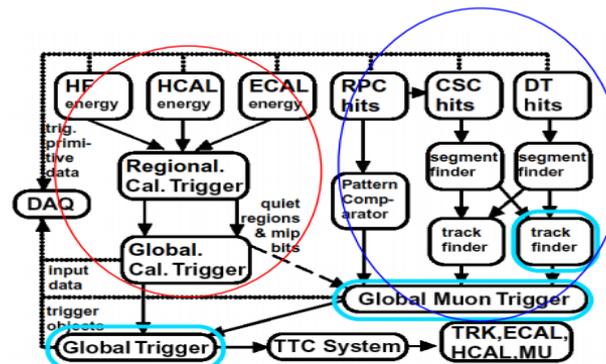
Myonen Systeme:

Spuren aus 3 Typen von Detektorlayern:

- DT (Drift Tubes) Barrel
- CSC (Cathode Strip Chambers) Endcaps
- RPC (Resistive Plate Chambers): Barrel + Endcaps

Kalorimeter:

- Elektronen, Jets, transversale Energie, fehlende Energie
- elektromagnetisches Kalorimeter
- Hadron-Kalorimeter



Datenverarbeitung



Sensoren

LHC insgesamt : 150 Millionen Sensoren in allen Experimenten →
Jährlich: 15 Petabytes (15 Mio. Gigabytes) generiert.

Rechenleistung

Bestehende Grids (zum Beispiel das Cern Openlab)

+ tausende Rechner

+ hunderte Cluster

Daraus WLCG (speichern, verwalten, verarbeiten)

- ❖ 170 Rechenzentren aus 34 Ländern
- ❖ > 100.000 Prozessoren
- ❖ 400 bis 600 Megabyte pro Sekunde mittlere Übertragung im Grid

Datenverarbeitung: Aufbau WLCG

TIER 0

- ❖ Rohdaten in CERN Rechenzentren auf Band gespeichert.
- ❖ 5.5 PB Festplattenspeicher, 17 PB Magnetbandspeicher, 6000 vernetzte CPU's
- ❖ Kopien Daten → verteilt an Tier 1

TIER 1

- ❖ 10 TIER-1 Zentren (Länder Europa, Taiwan, USA)
- ❖ Neue Kalibrierungen, aus Daten weitere ev. interessante Ereignisse auswählen
- ❖ Archivierung der TIER-2 Zentren
- ❖ Backup gesamte Rohdaten Tier 0

TIER 2

- ❖ ca. 150 Universitäten und Forschungseinrichtungen in 38 Ländern
- ❖ eigentliche Berechnungen und Analysen
- ❖ spezialisierte Computing-Grid Aufgaben, wie Datenverteilung, endgültige Selektion
- ❖ Untereinander Wissenschaftsnetzwerke oder Internet verbunden

TIER 3/4

- ❖ Arbeitsplatz für Wissenschaftler bzw. als Zugriff zum GRID
- ❖ Abruf Grid-Daten und Rechenanfragen

Datenverarbeitung: WLCG

Vorteile Computer Cluster

- ❖ wesentlich besser skalierbar als Supercomputer
- ❖ Praktisch jede Art Computer kann vernetzt werden
- ❖ Bessere Ausfallsicherheit durch viele kleinere Rechenzentren
- ❖ Grid beruht wie WWW auf offenen Standards: flexible Erweiterung

WNTM: Standardmodell

Wechselwirkungen

- ❖ Starke Wechselwirkung
- ❖ Schwache Wechselwirkung
- ❖ Elektromagnetische Wechselwirkung

= Quantenfeldtheorie

- ❖ Kombination klassischer Feldtheorien mit Quantenmechanik
- ❖ Statt Wellenfunktion, interpretieren als Quantenfeld
- ❖ Felder beschreiben Teilchen; Teilchen vermitteln Wechselwirkung
- ❖ Antiteilchen: Entitäten mit positiver Energie interpretiert, die sich rückwärts in der Zeit bewegen

Drei Generationen der Materie (Fermionen)

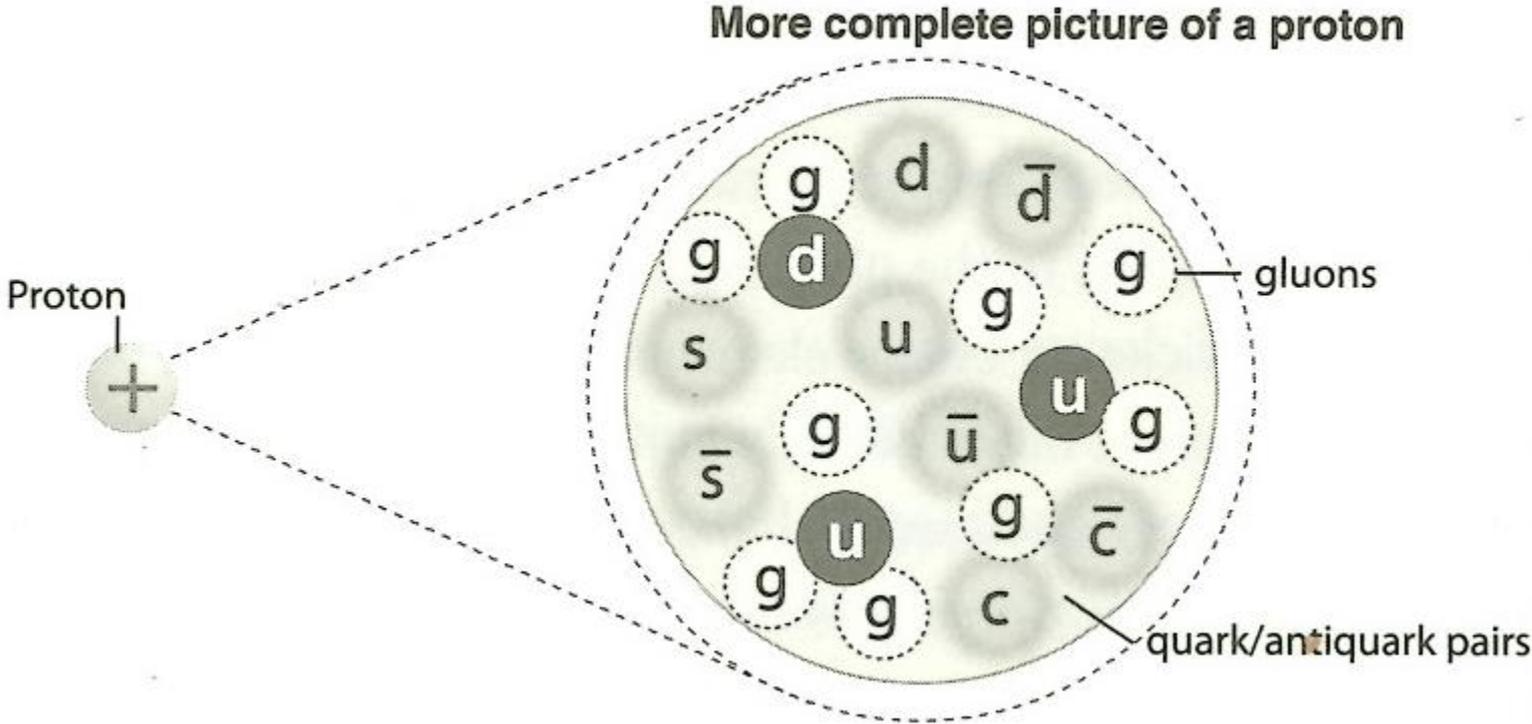
	I	II	III	
Masse	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name	u up	c charm	t top	γ Photon
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g Gluon
	<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
	ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Myon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	Z⁰ schwache Kraft
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e Elektron	μ Myon	τ Tau	W[±] schwache Kraft

Quarks

Leptonen

Eichbosonen

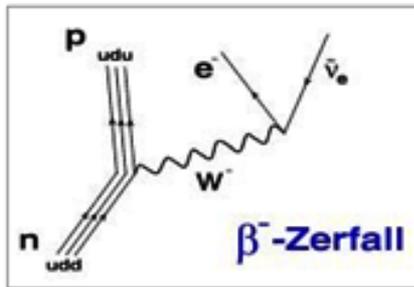
WNTM: Standardmodell



WNTM: Standardmodell - Quantenfeldtheorie

Quantenelektrodynamik: Beschreibt Phänomene von geladenen Teilchen (e und p) und Photonen ($U(1)$)

Schwache WW: Beim Beta-Zerfall.



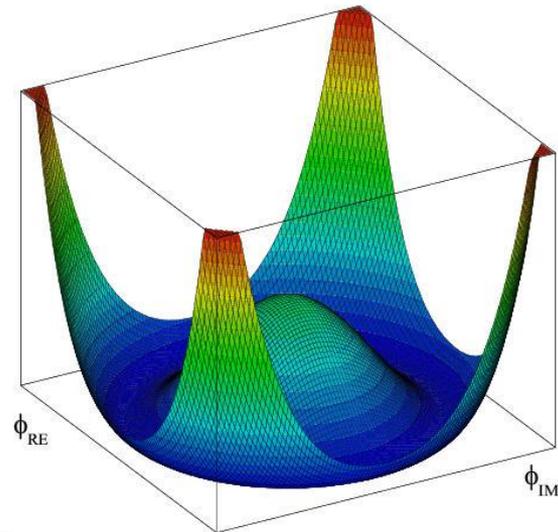
- ❖ **Quantenchromodynamik:** oder Starke WW: Gluonen, welche die Wechselwirkung vermitteln, selbst miteinander wechselwirken ($SU(3)$)

Quarks treten als Teilchen/Antiteilchen oder in 3-er Gruppen auf

- ❖ **Innere Symmetrie:** Mechanismus, der sicherstellt, dass nur zugehörige Welle nur in „erlaubte“ Richtungen polarisieren. Jede Wechselwirkung hat eigene Symmetrie.

WNTM: Standardmodell - Higgs

- ❖ Woher haben W und Z – Bosonen ihre Masse?
- ❖ Durch Austausch mit überall existentem Higgs-Feld. Dieses ist nicht messbar, aber Higgs-Boson. (Masse zwischen 115 und 150 GeV geschätzt, experimentell nachgewiesen bei 124 GeV)
- ❖ Für W und Z – Bosonen: erhalten durch den **von Null verschiedenen Vakuumerwartungswert** des Higgs-Feldes ihre Masse (Photon nicht)
- ❖ ein „entarteter Grundzustand“
- ❖ **Higgs-Boson**: nicht eigentliches Vermittler-Teilchen, eher Störung im Higgs-Feld (überzählige longitudinale Komponenten)



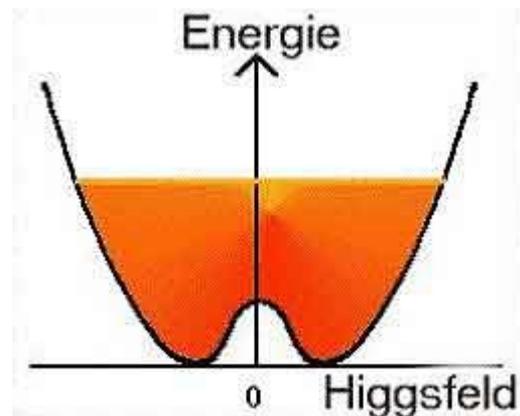
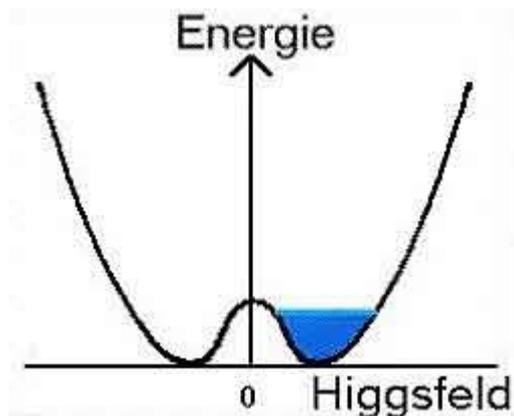
WNTM: Standardmodell Higgs-Feld Symmetrie

❖ Higgs-Feld ist mysteriös.

WW mit sich selber, so, dass es weniger Energie erfordert, das ganze Universum mit diesem Feld auszufüllen, als kein Feld zu haben.

❖ Wie etwas nachweisen, das überall ist?

„seinen überall konstanten Wert in Schwingung versetzt und diese Schwingung, die quantenphysikalisch nichts anders ist als das Higgs-Teilchen, nachweisen.“



WNTM: Standardmodell

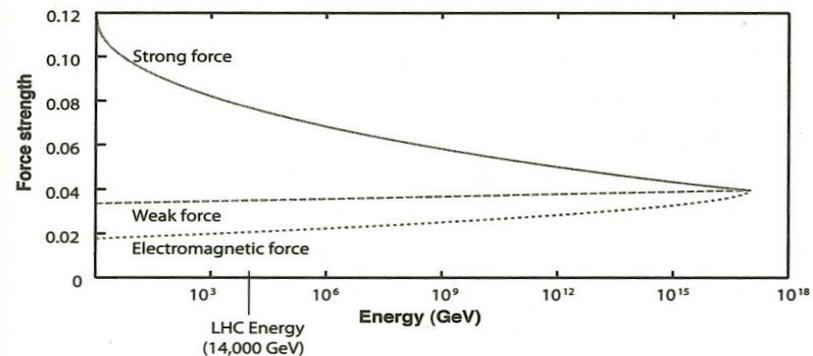
Warum Higgs - Boson

- ❖ Higgs-Boson : um bei niedrigen Energien elektroschwache $SU(2) \times U(1)$ -Symmetrie zu brechen und so Z- als auch W-Bosonen Masse zu verleihen

Grenzen Standardmodell

- ❖ Beschreibt Gravitation nicht . Versuche, QFT und Allgemeine RT zu vereinen, nicht gelungen.
- ❖ Hierarchieproblem?
- ❖ Vereinigung der Grundkräfte?
- ❖ Erklärung für Dunkle Materie?

Strength of Standard Model Forces as a Function of Energy



WNTM: Hierarchieproblem

Hierarchieproblem

- ❖ Masse des Higgs-Teilchens und der Eichbosonen 16 Größenordnungen kleiner als in Hochenergie-Physik theoretisch berechnet
- ❖ Gravitation sehr schwach im Vergleich zu anderen WW-Kräften
- ❖ Gefundenes Higgs-Teilchen: unterliegt schwacher WW
- ❖ Aufgrund der heute bekannten Protonen-Lebensspanne lässt sich errechnen, dass das Higgs-Partner-Teilchen, das starker WW unterliegt, theoretisch **10 Billionen mal schwerer** ist als das leichte
- ❖ Um GUT mit 4 Dimensionen: ein Parameter muss fine-tuned werden auf 13 Stellen, sonst bricht Theorie zusammen

WNTM: Alternative GUT

Idee

- ❖ 3 Grundkräfte des SM: bei sehr hohen Energie hätten sie gleiche Stärke und könnten sich als verschiedene Aspekte einer einzigen Kraft erweisen
- ❖ alle Materieteilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ wie Elektronen und Quarks wären im Wesentlichen gleich

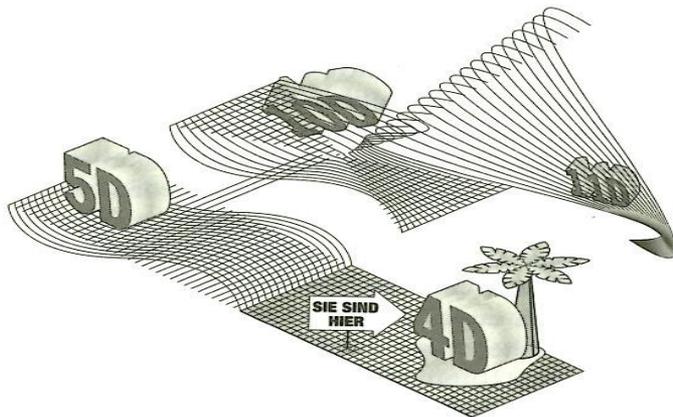
Hypothese

- ❖ Protonenzerfall existiert
- ❖ Proton nicht stabil, sondern lediglich eine sehr große Halbwertszeit
- ❖ Eine vorausgesagte Art des Zerfalls: durch ein hypothetisches X-Boson vermittelter Zerfall in ein Positron e^+ und ein neutrales Pion π^0

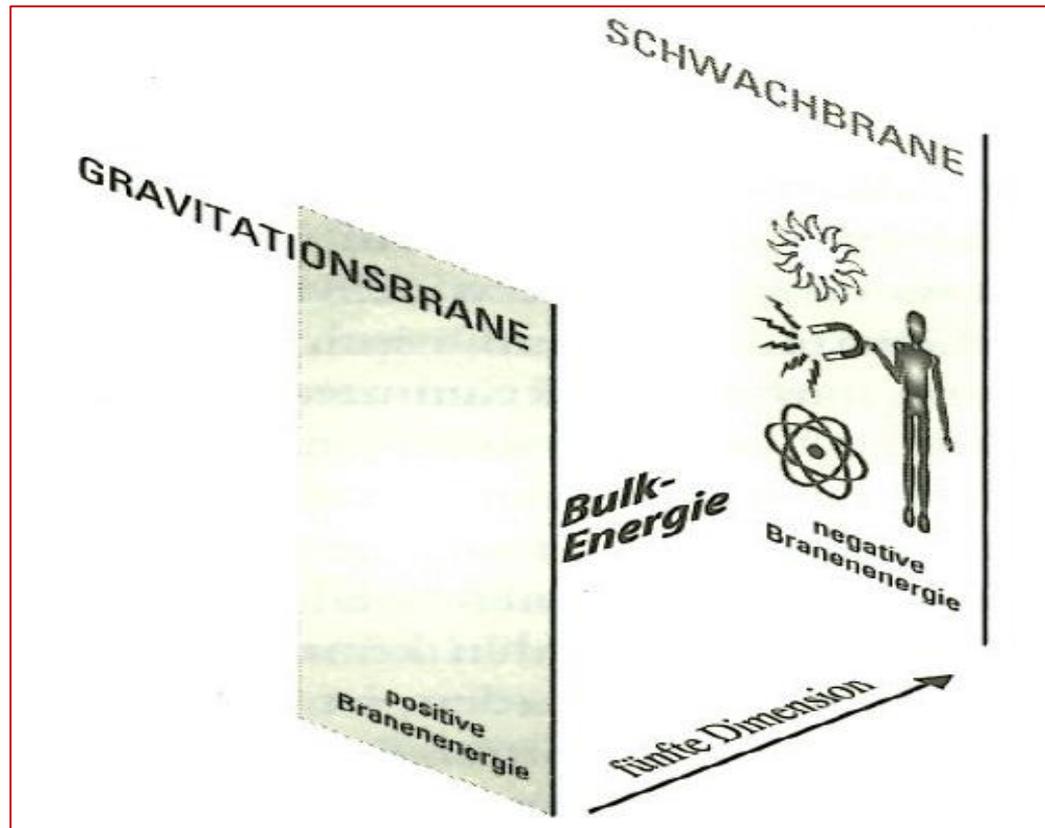
WNTM: Randall-Sundrum-Modell

❖ Randall-Sundrum-Modell

- ❖ Unser Universum: Insel inmitten eines höher dimensionierten Raumes
- ❖ Unterschied zu String-Theorien: versucht das **Hierarchieproblem** durch die Einführung einer einzigen weiteren Dimension zu lösen
- ❖ Schwerkraft könnte die fünfte Dimension durchdringen
- ❖ Modell für Erklärung der Schwäche der Schwerkraft



WNTM: Randall-Sundrum-Modell



Verzerrte Passage: Eine Lösung des Hierarchieproblems

WNTM: String Theorien

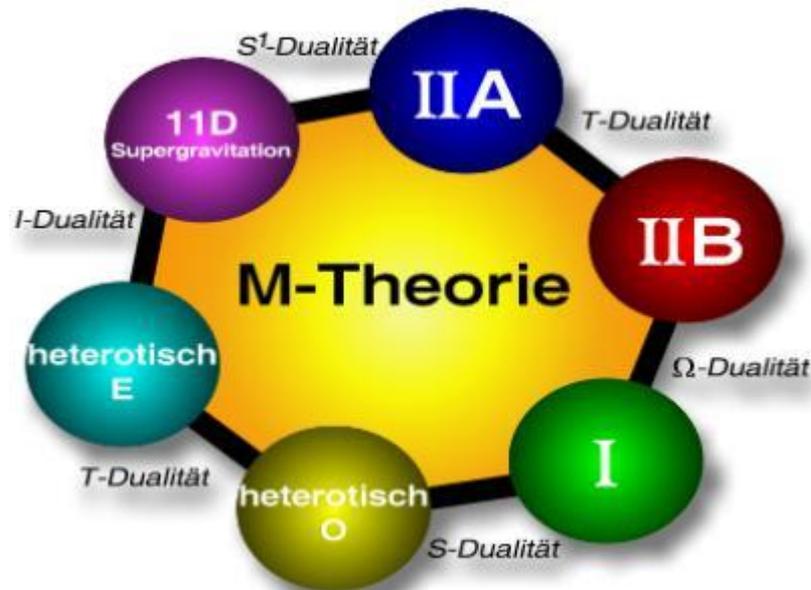
- ❖ Strings als fundamentale Objekte: vibrierende eindimensionale Schleifen oder Segmente aus Energie
- ❖ Stringtheorie als Antwort, weil die Quantenfeldtheorie nicht auf die Gravitation angewendet werden kann
- ❖ Probleme der Stringtheorie:
 - ❖ Tachyonen (Teilchen mit Überlichtgeschwindigkeit)
 - Die Rettung: Der Superstring
 - ❖ Das „böse“ Spin-2-Teilchen
 - Die Rettung: Es könnte das Graviton sein
 - ❖ Anomalien: Symmetrie-Verletzungen
 - Die Rettung: Superstringtheorie mit insgesamt 10 Dimensionen. Hier heben sich in der Bilanz alle Anomalien auf.
 - Aufgerollte Dimensionen
 - Calabi-Yau-Kompaktifizierung

WNTM: String Theorien: Branen

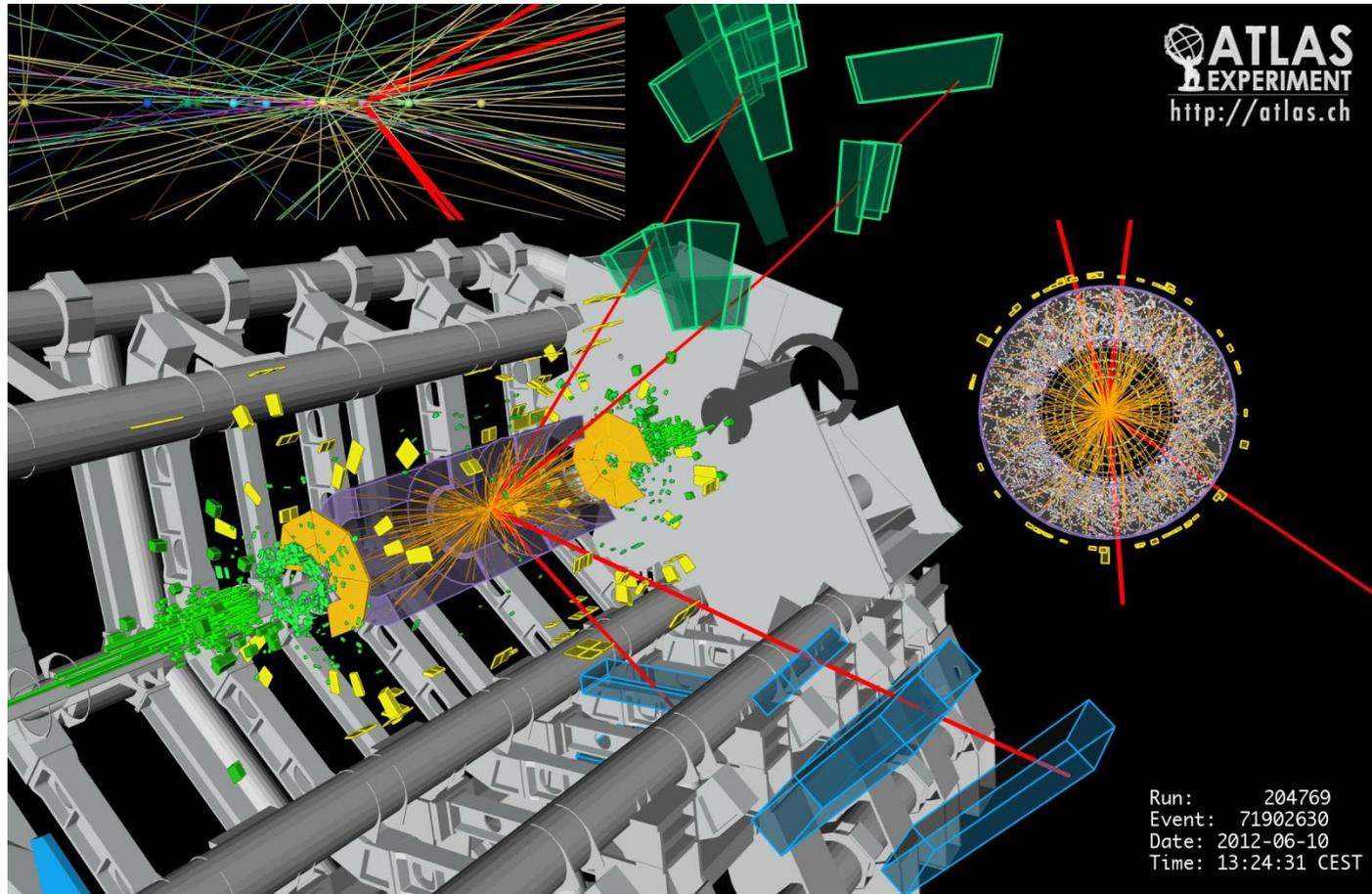
- ❖ Branen sind 2 oder höherdimensionale Membranen
- ❖ Teilchen sind auf Brane beschränkt
- ❖ Branen können wechselwirken

WNTM: M Theorie von Edward Witten

- ❖ Die fünf bekannten Superstringtheorien (10 dimensional)
- ❖ 11-dimensionale Supergravitation
- ❖ Ohne Strings, aber mit Branen



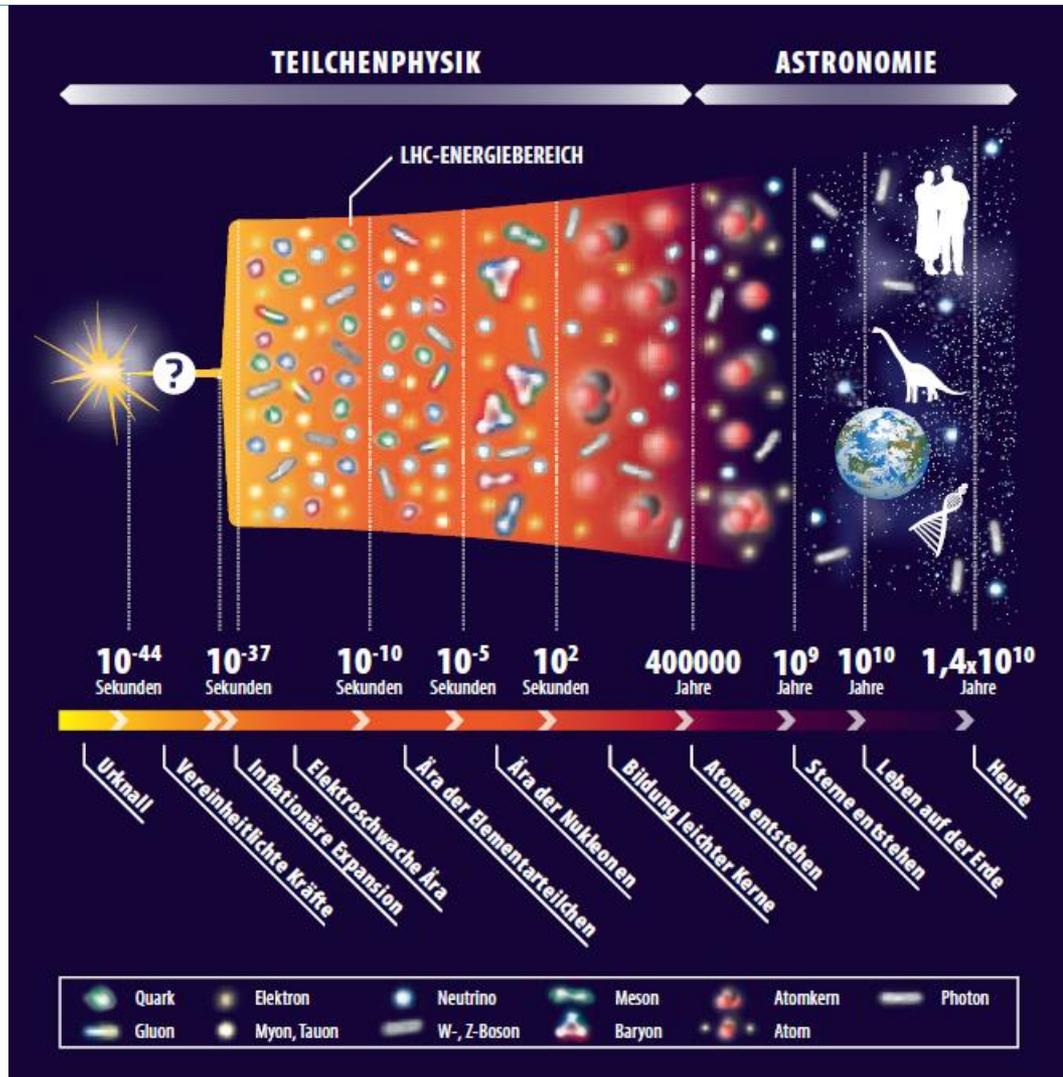
Entdeckungen: Higgs - Teilchen



Entdeckungen: Kaluza-Klein Mode



LHC – Die Zeit nach dem Urknall simulieren



Cern News

❖ 1.12.2012: Wissenschaftler erzeugen am CERN neue Materie

Im größten **eilchenbeschleuniger** ...

...geheimnisvolle Teilchenpaare

...etwas sehr Grundlegendes handelt, für das es bis jetzt aber noch keine exakte wissenschaftliche Erklärung gibt

❖ 19.11. Das Ende der Supersymmetrie?

Zerfall von B_s -Mesonen

geringe Zerfallsquote ein heftiger Schlag für alle Anhänger der Theorie der Supersymmetrie

[NEWS](#): Aktuell

Was zu entdecken bleibt

❖ Woraus besteht dunkle Materie?

(Ca 85 Prozent der Masse des Universums, konnte bislang nicht direkt beobachtet werden und verrät sich allein durch ihre Gravitationskraft, die die normale Materie im Kosmos beeinflusst)

❖ Was ist die Lösung des Hierarchieproblems?

❖ Könnte Supersymmetrie die Antwort auf diese 2 Fragen sein?

Könnte Antwort für dunkle Materie liefern

Siehe News

❖ Anthropisches Prinzip oder nicht?

❖ Quantenfeldtheorie oder Stringtheorie?

❖ Kann die Vereinheitlichung der Kräfte simuliert werden?

Ausblick Beschleuniger

- ❖ „SuperKEKB“ in Japan 2014 vorgesehen
- ❖ Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie, winziger Überschuss an Materie
- ❖ Anhand von speziellen Quark-/Antiquark-Paaren die durch Kollision von Elektronen und Positronen entstehen
- ❖ In jeder Sekunde entsteht Datenvolumen von mehr als 30 Gigabyte
- ❖ Herzstück von Detektor Belle II ist eine Art digitale Hochleistungskamera, die unmittelbar am Kollisionsort Teilchenspuren ausliest und analysiert (Entwicklung Max Planck Institut)

Quellen

Lisa Randell: Eine der führenden theoretische Physikerin und Expertin für Teilchenphysik, Stringtheorie und Kosmologie

- ❖ Warped Passages: Lisa Randell, 2005
(Verborgene Universen)
- ❖ Knocking On Heaven's Door: Lisa Randell, 2011

Dieter Lüst: Einer der führenden Stringtheoretiker

- ❖ Quantenfische - Die Stringtheorie und die Suche nach der Weltformel, Dieter Lüst, 2011