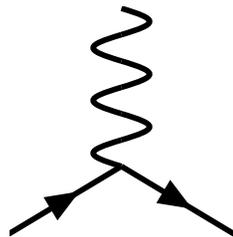
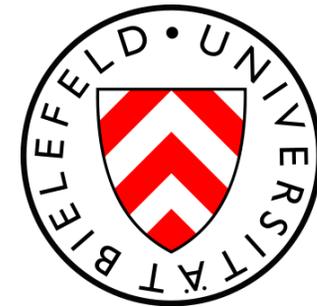


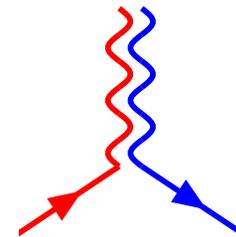
Heisenberg und Einstein im Duett



Prof. Dr.
York Schröder



Quantenfelder und
Elementarteilchen



VHS Gütersloh, 14 Apr 2011

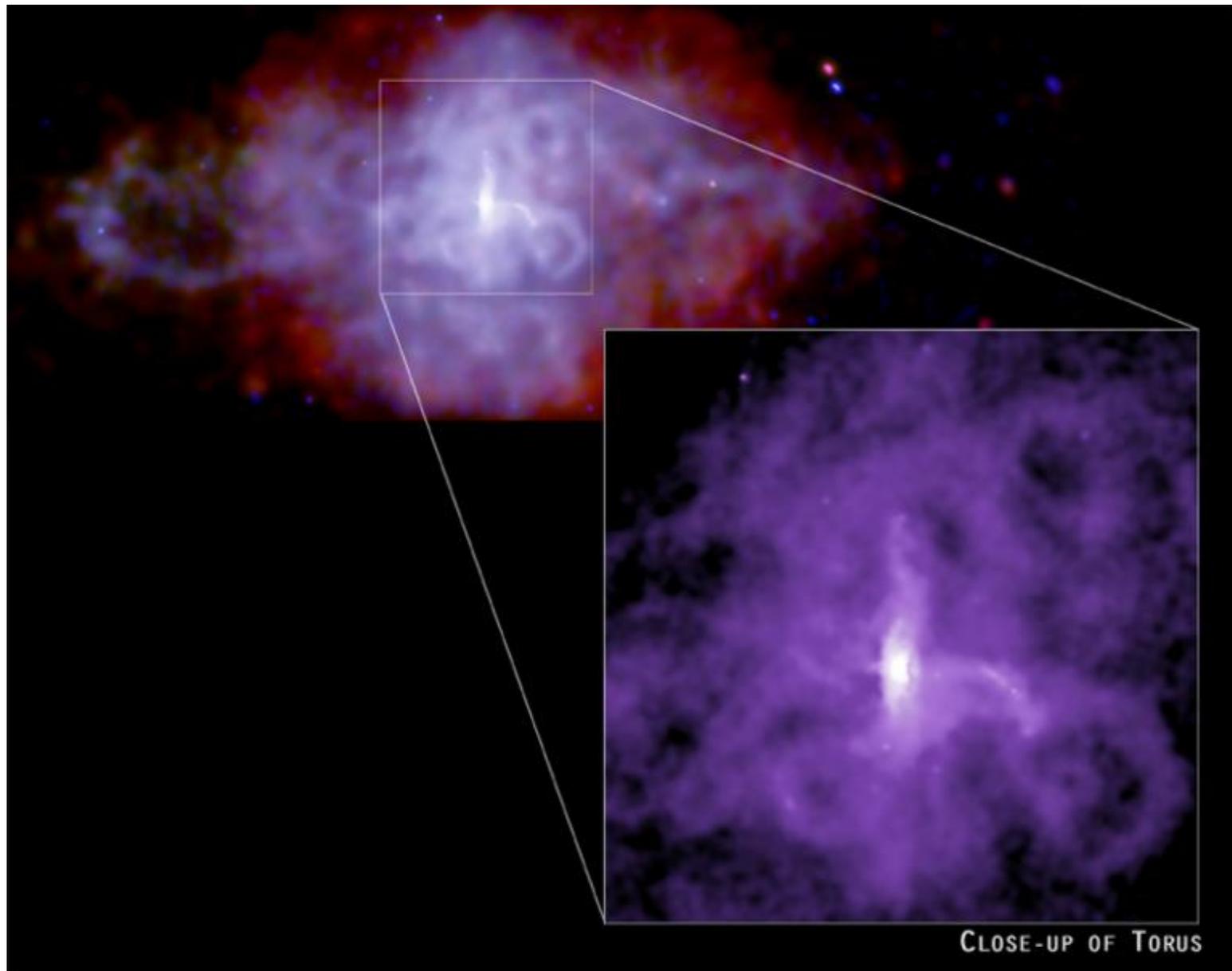
Motivation

Warum tun wir (Physiker) das, was wir tun?

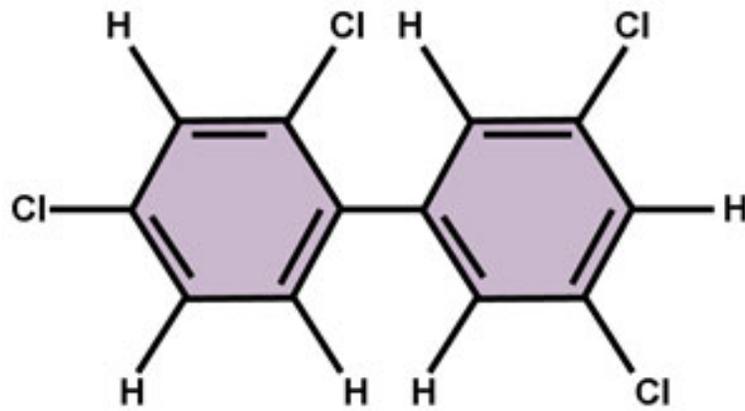
- um dem Leben einen Sinn zu geben!
- um quälende Fragen zu beantworten: warum sind wir hier?
- oder: warum passieren all diese seltsamen Dinge um uns herum?



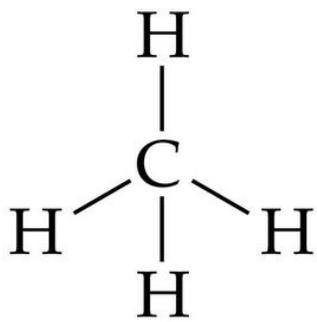
Weisser Zwerg, H1505+65. Temperatur: 200000 Grad



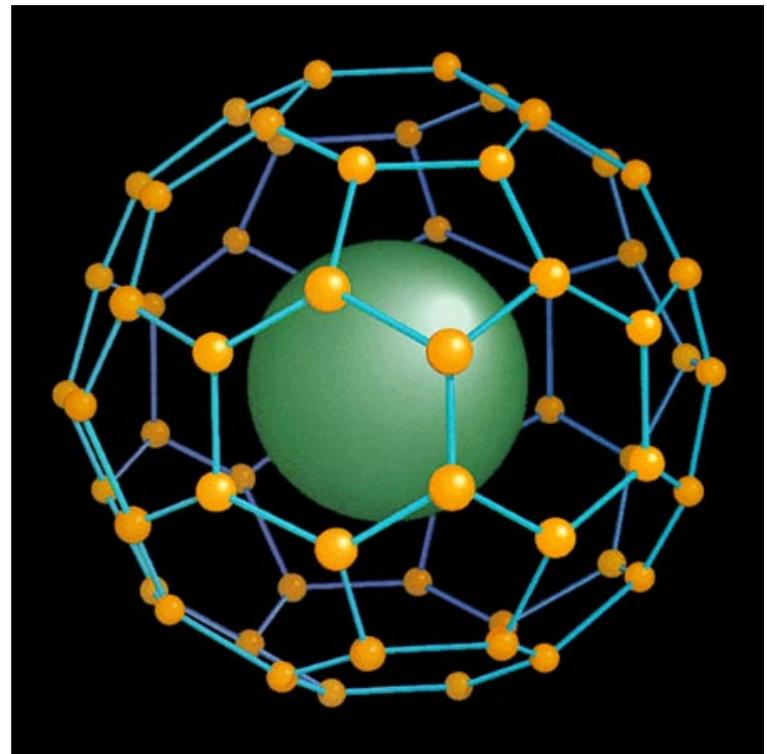
Neutronenstern 3C58 (Rest der chin. Supernova 1181)
10000 Lichtjahre. 1000000 Grad. Gewicht: 1 TL = 1 Milliarde Tonnen



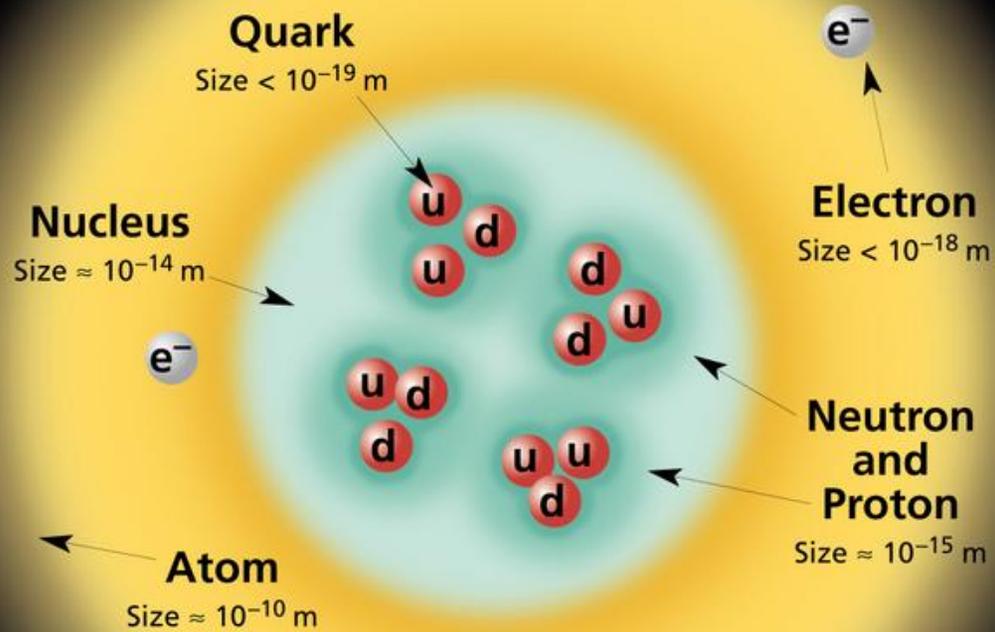
Tetrachlorinated Biphenyl
(a Polychlorinated Biphenyl subcategory, or homolog)



Tetrahedral
geometry



Structure within the Atom



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Motivation

Warum tun wir (Physiker) das, was wir tun?

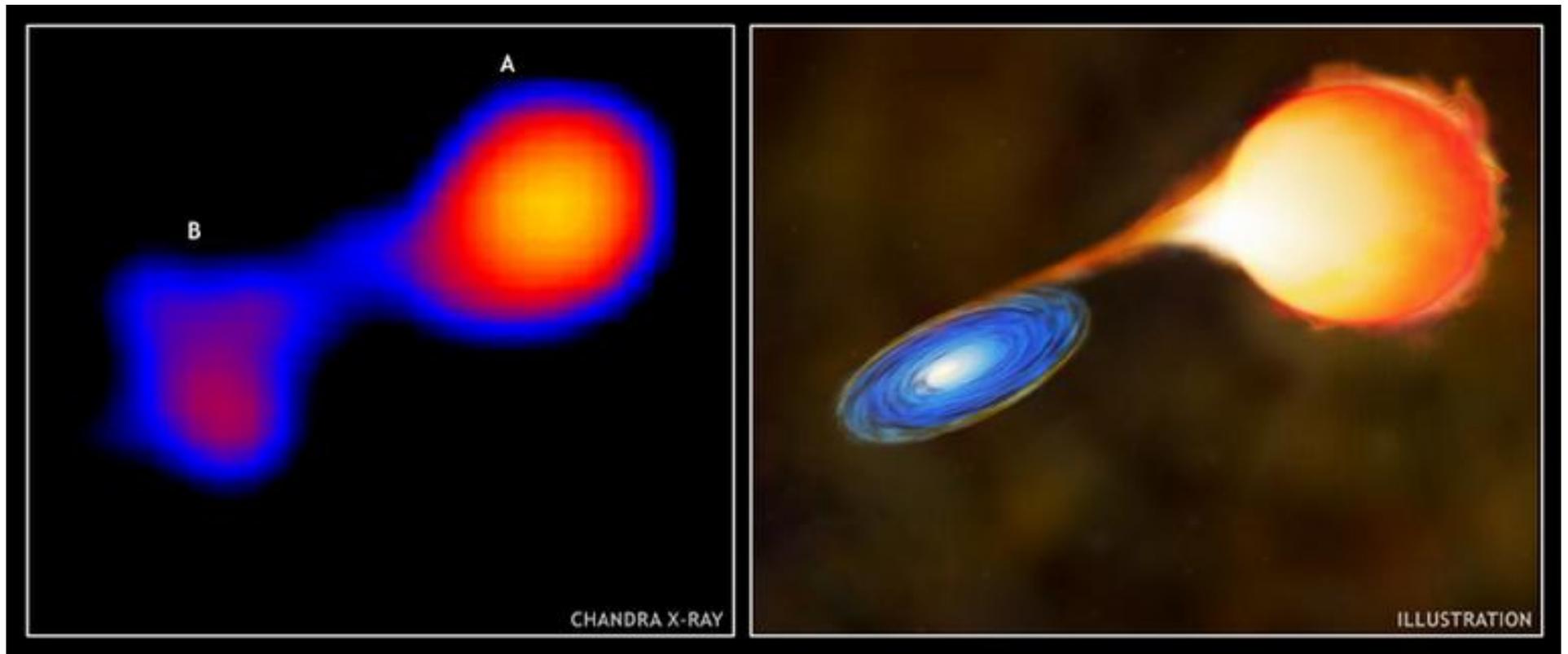
- um dem Leben einen Sinn zu geben!
- um quälende Fragen zu beantworten: warum sind wir hier?
- oder: warum passieren all diese seltsamen Dinge um uns herum?
 - ▷ Sterne, Astrophysik, Kosmologie, Universum
 - ▷ Chemie, Biologie, Elektromagnetismus
 - ▷ Atom, Atomkern, Protonen, Quarks

wir erkennen faszinierende Vielfalt

aber auch Eleganz und Schönheit

haben ein System des Naturverständnisses aufgebaut

- basierend auf drei Säulen
 - ▷ Eich - System
 - ▷ Gravitations - System
 - ▷ Higgs - System



links: **Weisser Zwerg**, Mira B. rechts: **Roter Riese**, Mira A.

relativ nah: 420 Lichtjahre

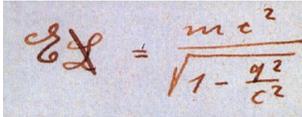
Physik = Modelle der Natur formulieren

Sprache = Mathematik

- ▶ ermöglicht eine einfachere Beschreibung des Universums
- ▶ je tiefer man geht, desto klarer verbleibt Mathematik als einzige Sprache

Spezielle Rel (SRT): Einstein 1905

- neues Verständnis von 'Raum-Zeit'
- fundamentaler Fortschritt seit Newton's klassischer Physik (1687)

- Konsequenz  $E = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

Kernidee: physikalische Gesetze sind für alle gleichförmig bewegten Beobachter identisch (kein 'Äther').

- einfache Beschreibung des Effekts von Relativbewegung auf die grundlegendsten physikalischen Messinstrumente, Skala und (perfekte) Uhr
- Lichtgeschwindigkeit c als obere Grenze
- einfache mathematische Formulierung: Lorentz-Transformation

z.B. $x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

Quantenmechanik (QM): Heisenberg (und andere)

- Heisenberg's Unschärferelation, 1927
 - ▷ je präziser die Positionsbestimmung, desto unpräziser die Impulsbestimmung
 - ▷ und umgekehrt
 - ▷ mathematisch: $\delta x \cdot \delta p \geq h/(4\pi)$ [Plancks Wirkungsquantum $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$]
 - ▷ z.B. 1kg-Objekt, $\delta x \sim 1 \text{ Atom}$, $\delta v \sim 10^{-24} \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 - ▷ ditto für Zeit und Energie: $\delta t \cdot \delta E \geq h/(4\pi)$
- Unschärfe ist eine zentrale Idee der QM (Entwicklung ca. 1900-1930)
 - ▷ Gewissheiten \rightarrow Wahrscheinlichkeiten
 - ▷ 2 identische radioaktive Atome. #1 zerfällt nach 1min. #2 nach 2min.
 - ▷ präzise mathematische Formulierung
- QM ist elegant, beschreibt alle Phänomene
 - ▷ aber macht überhaupt keinen „Sinn“...
 - ▷ niemand „versteht“ QM
 - ▷ komplett neues Konzept
 - ▷ können QM benutzen, um genaueste Vorhersagen zu machen
- kein Kollaps der Wellenfunktion etc.
 - ▷ Quantenkohärenz geht in der Ww kleiner und großer Systeme schnell verloren

Quantenfeldtheorie (QFT)

es ist extrem schwierig, SRT + QM zu kombinieren!

der einzige bekannte Weg: QFT (Entwicklung ca. 1930 - heute)

- fundamentale Objekte: raumfüllende Felder
- wir nehmen deren quantisierte Anregungen wahr (als Teilchen: Leptonen, Quarks)
- Träger der Kräfte: Eichbosonen
 - ▷ schwache / **starke** Kernkräfte: W,Z Bosonen / **Gluonen**
 - ▷ physikalische Verkörperung von (Eich-) Symmetrien
 - ▷ als solche: masselos!
 - ▷ ABER $m_{W,Z} \neq 0$ (expt.)
- Symmetrien (vermutlich) in einer speziellen Weise ruiniert
 - ▷ von einer Form von „kosmischer Supraleitung“
 - ▷ neue Felder ($\sim e^-$ in gewöhnlichen Supraleitern)
 - ▷ Anregungen \Rightarrow Higgs - Teilchen (**noch nicht beobachtet!**)

„Standardmodell“ $\hat{=}$ 3 grundlegende Strukturen

- Eichsymmetrie / Gravitation / Higgs (elementare Konzepte vs. ad-hoc)
- jede Struktur beschreibt Wechselwirkungen der entsprechenden Teilchen

Eich - System

- basiert auf weitreichenden Symmetrien zwischen „Farb“-Freiheitsgraden (Farbe: Verallg. der elektr. Ladung)
 - ▷ stark/schwach/elektromagn.: 3/2/1 Farbladungen
 - ▷ $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
- Eichsymmetrie + QM + SRT
 - ⇒ mächtig!
 - ⇒ Existenz von Eichbosonen
- Beschreibung durch nur 3 Parameter
 - ▷ einer pro Eich - Sektor
 - ▷ keine „Schummel“-Faktoren!
 - ▷ ⇒ präzise Vorhersagen
 - ▷ Übereinstimmung mit Expt'n

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	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	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	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 electron	μ muon	τ tau	W^\pm weak force

Quarks

Leptons

Bosons (Forces)

Gravitations - System

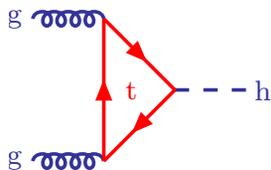
- ist im Wesentlichen Einstein's ART
 - ▷ Einstein-Hilbert Wirkung + minimale Materiekopplung
- bricht zusammen für unbeobachtbar hohe Energien
 - ▷ macht keine Vorhersagen für ultra-hochenergetische Teilchen
 - ▷ quantisierte ART nicht „renormierbar“
- Symmetrie-Prinzip: Einstein's allgemeine Kovarianz
⇒ Existenz von Gravitonen
- 2 Parameter
 - ▷ G_N : Newton's Gravitationskonstante; $\sqrt{\frac{G_N h}{c^3}} = \text{Länge!}$
 - ▷ Λ : kosmologische Konstante, E-Dichte des leeren Raumes
- viele Tests, z.B.:
 - ▷ Urknall-Kosmologie
 - ▷ Physik schwarzer Löcher
 - ▷ Merkur-Periheldrehung
 - ▷ Variation von Pulsar-Rotationsfrequenzen

Higgs - System

- kein tiefes Prinzip!
- viele Parameter
 - ▷ Bestimmung aus Quark + Lepton - Mischungen
- vorläufiges Konzept?
 - ▷ z.B. CKM-Matrix (Mischung von Quarkzuständen) fast diagonal

- Suche an Beschleunigern

- ▷ z.B. LEP:
 $m_h > 114\text{GeV}$
- ▷ jetzt: LHC
Gluon - Fusion



- Entdeckung? Überraschung?



Standardmodell (SM)

Elementarteilchen \equiv ultimative Bausteine

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass \rightarrow	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge \rightarrow	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin \rightarrow	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name \rightarrow	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
Quarks	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 electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force
	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
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force
				Bosons (Forces)

- bekannt:

- vorhergesagt / erhofft:

- ▷ Higgs - Boson(en)
- ▷ SUSY - Teilchen, Dunkle Materie [5× normale baryonische Materie!]
- ▷ Axionen, ...

Quantenfeldtheorie (QFT)

Quantenfeldtheorie \equiv Art der Wechselwirkungen

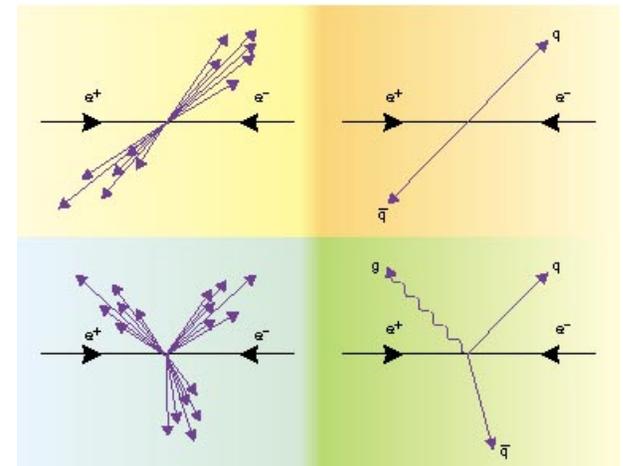
- bekannt: $\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{QCD} + \mathcal{L}_{EW}$
- vorhergesagt / erhofft:
 - ▷ gesunde lokale Eichtheorie
 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ (g-WZ- γ)
 - ▷ Extra Dimensionen?
 - ▷ Strings? Monopole?
 - ▷ Große Vereinheitlichung (GUT)?
 - ▷ ...

- 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? -	...

SM-Test (mit Teilchenbeschleunigern)

- z.B. LEP, $e^+e^- \rightarrow X$ (irgendetwas): finden zwei Klassen von Ereignissen (QM!)
- (1) $X = e^+e^-$ or $\tau^+\tau^-$ or ... l^+l^-
 - ▷ Leptonen: keine Farbladung \rightarrow hauptsächlich QED-Wechselwirkungen
 - ▷ einfacher Endzustand: kleine Kopplung ($\alpha = e^2/(4\pi) \approx 1/137$) meistens (99%) passiert nichts
 - ▷ $e^+e^- \gamma \sim 1\%$ \rightarrow prüfe Details der QED
 - ▷ $e^+e^- \gamma\gamma \sim 0.01\%$ \rightarrow ...
- (2) $X > 10$ Teilchen: $\pi, \rho, p, \bar{p}, \dots$
 - ▷ „griechisch-lateinische Suppe“ zusammengesetzt aus Quarks + Gluonen
 - ▷ Muster: E+Impuls-Fluss in „Jets“
 - ▷ 2 Jets $\sim 90\%$; 3 Jets $\sim 9\%$; 4 Jets $\sim 0.9\%$
 - ▷ direkte Bestätigung der asympt. Freiheit!
 - ▷ harte Strahlung selten \rightarrow # der Jets
 - ▷ weiche Strahlung häufig \rightarrow verbreitert Jet
- inzwischen: „SM testen“ \rightarrow „Hintergründe ausrechnen“ auf der Suche nach neuen Phänomenen
Abweichungen \rightarrow „neue“ Physik



Teilchenbeschleuniger: LHC Datenblatt

- 2×2800 Pakete à 15 Milliarden Protonen; Kollisionen alle 30 ns
- Energie im Schwerpunkts-(=Labor)-system von p+p: $\sqrt{s} = 14$ TeV



- ca 3 Milliarden Euro
- 27 km Tunnel
- 1200 Dipol-Magnete
- B-Feld bis 8.6 Tesla
- 1.9 Kelvin; 90t flüss. He
- diese Parameter
 - $E_{max} = 7$ TeV
 - $v = 0.999999991 c$

- zentrale Größe: **Luminosität**; geplant sind $L = (10^{33} \dots 10^{34}) \frac{1}{cm^2 s}$ [or $\frac{1 \dots 10}{nb \cdot s}$]
- für einen spezifischen Prozess: Ereignisrate = **Luminosität** · Wirkungsquerschnitt

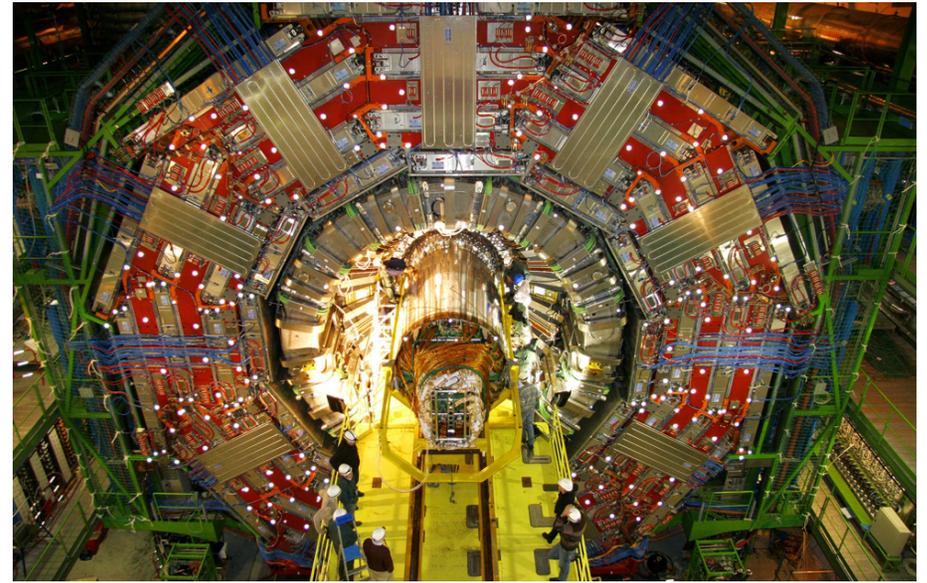
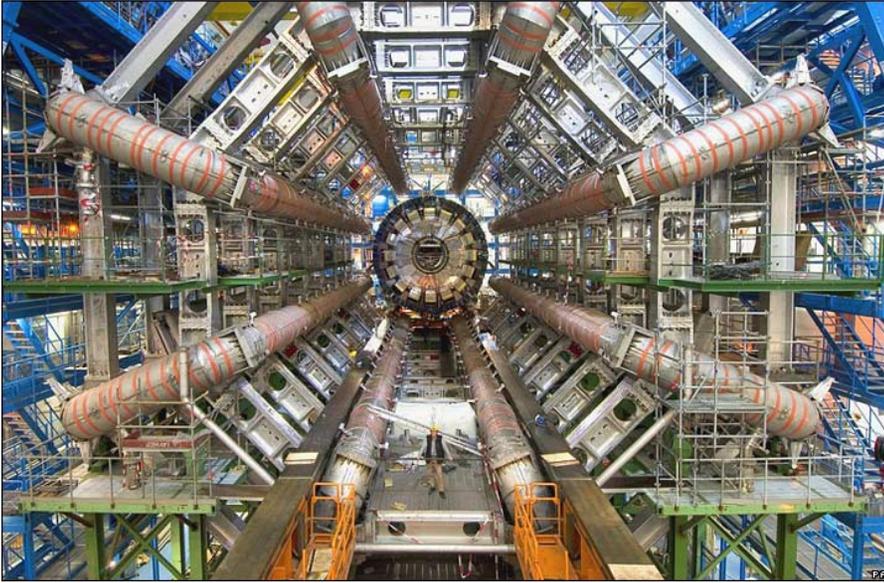
Herausforderungen beim LHC - Betrieb

- haben den LHC gebaut - müssen jetzt **lernen, diese mächtige Maschine zu betreiben**
- in Magnet(Strahl) gespeicherte E: 10(0.7) GJ \approx 2.4(0.2) Tonnen TNT
 - ▷ beam dump!
 - ▷ zum Vergleich: 1 Füllung $\approx 10^{-9}$ Gramm Wasserstoff
 - ▷ Verlust von 10^{-7} Anteil des Strahls \rightarrow Quench der supraleitenden Magnete



- 2008 - Run
 - ▷ 10 Sep: Protons kreisen
 - ▷ 19 Sep: Quench in Dipol-Magneten!!
 - ▷ Verlust von 6t He; 1 Jahr Reparatur
- 2009 - Run
 - ▷ 23 Nov: **Kollisionen** bei 450 GeV (1 Bunch)
 - ▷ 30 Nov: 1.18 TeV pro Strahl (>0.98)
- 2010/2011/2012 - Run
 - ▷ Mrz 2010: Energie-Anstieg bis 3.5 TeV
 - ▷ seit 30 Mrz 2010: 3.5 TeV + 3.5 TeV **Kollisionen**
 - ▷ Zeitplan: kontinuierliche Operation bis ca. Ende 2012
 - ▷ mehrmonatiger Umbau + Wartung; danach 7 TeV + 7 TeV

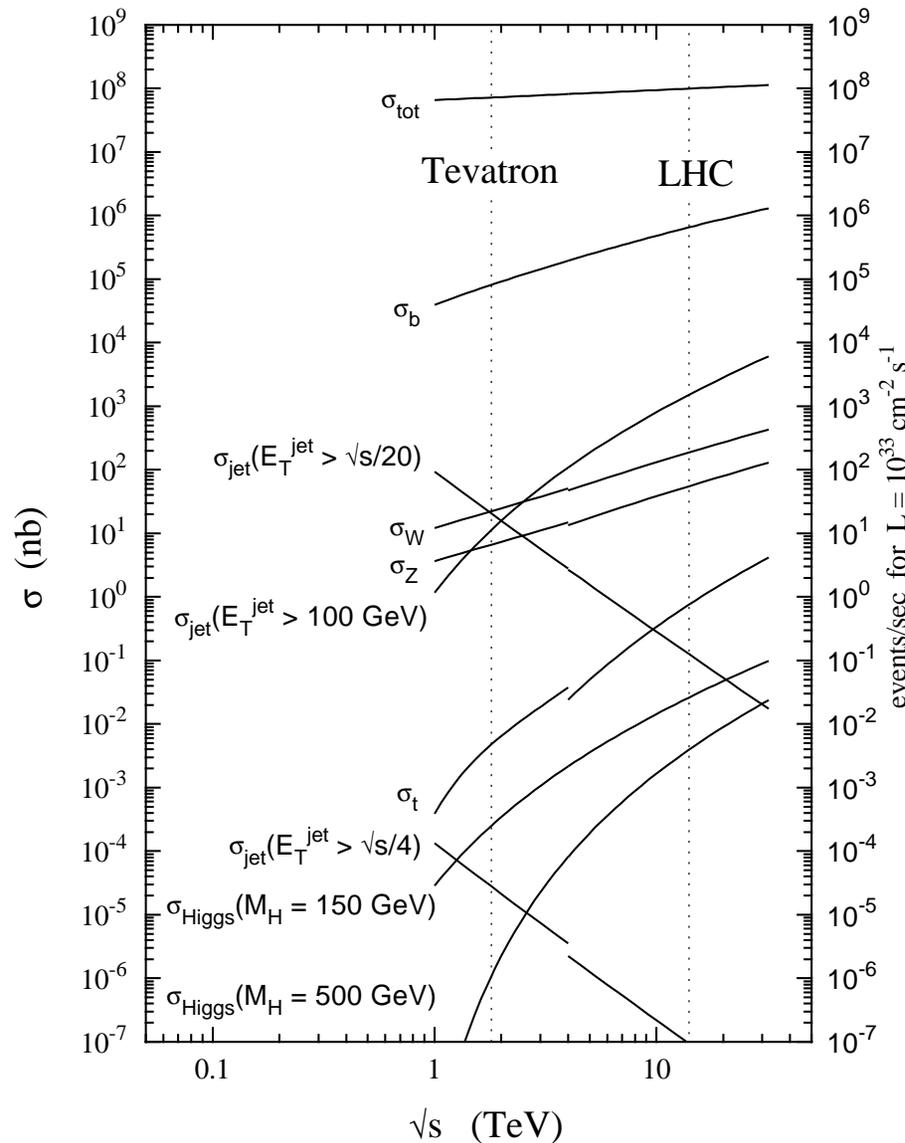
LHC - Detektoren



- ATLAS - A Toroidal LHC Apparatus
- 45×22×22 m, 7000 Tonnen
- 1870 Physiker ∈ 150 Institute
- Datenrate 100000 CD's/sec → 27 CD's/min speichern
- pro „Ereignis“ im Mittel 22 simultane pp-Kollisionen
- oft Signal/Hintergrund < 10^{-10} !!
- CMS - Compact Muon Solenoid
- 21×16×16 m, 12500 Tonnen
- 2300 Physiker ∈ 159 Institute

LHC - typische Ereignisraten

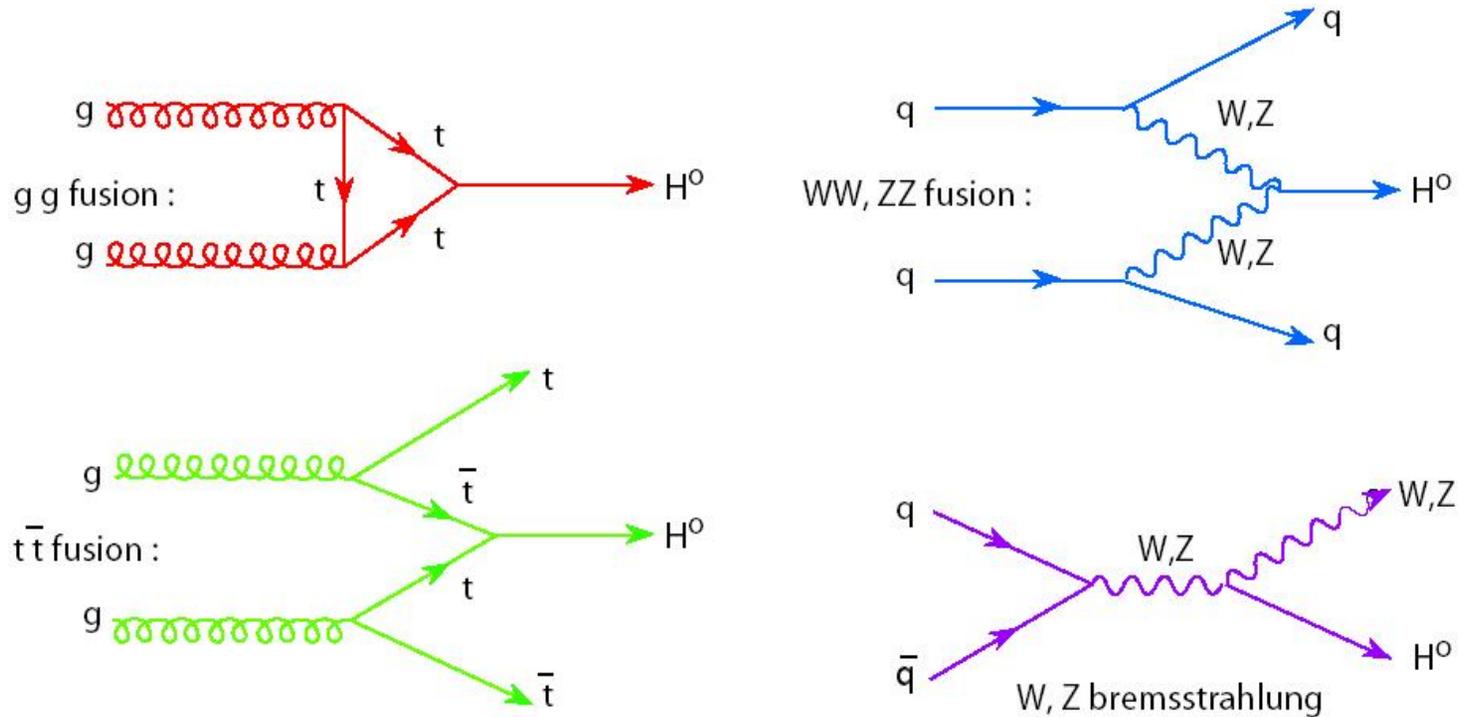
proton - (anti)proton cross sections



- niedrige LHC Luminosität
- 10^8 pp-Stöße pro Sekunde
- Signal vs Hintergrund!
- pro Sekunde wird produziert:
 - ▷ 200 W-Bosonen
 - ▷ 50 Z-Bosonen
 - ▷ 1 $t\bar{t}$ -Paar
- pro Minute wird produziert:
 - ▷ 1 leichtes Higgs

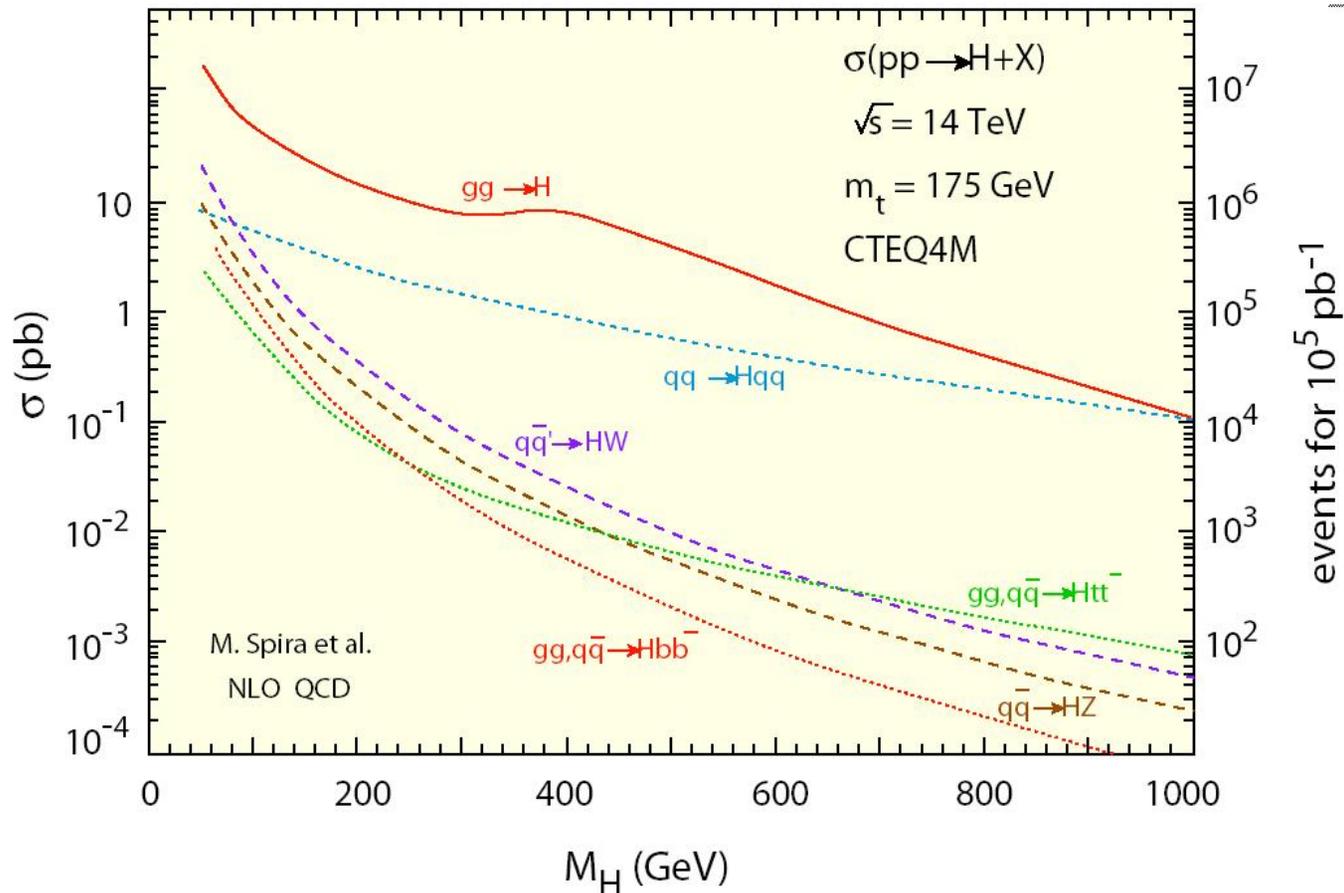
Wie werden Higgs-Bosonen produziert?

- Protonen bestehen aus Quarks+Gluonen (LHC als Gluon-Collider)



- graphische Darstellung: Feynman-Diagramme
- manchmal sind „Schleifen“ (loops) dominant! (vgl. nächste Seite)

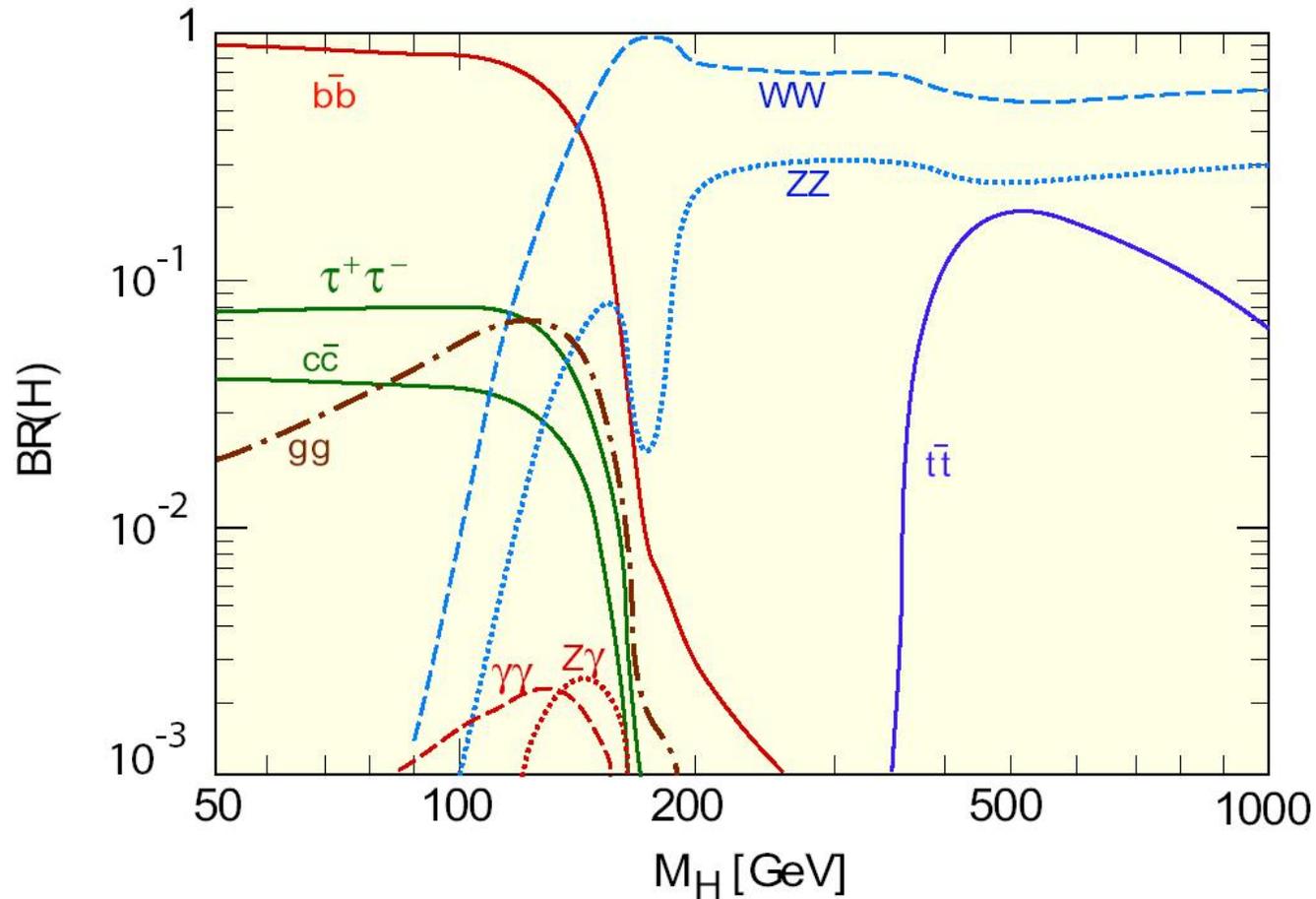
Wieviele Higgs-Bosonen werden produziert?



- CTEQ4M sind „Strukturfunktionen“: Verteilung Quarks+Gluonen im Proton
- Ereignisse pro Jahr (eff. 10^7 sec) am LHC bei hoher Luminosität ($1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$)
- **wichtigster Erzeugungs-Prozess: Gluon-Fusion**

Higgs-Zerfallsraten

- Verzweigungsverhältnisse hängen stark von der Higgs-Masse ab



- **wichtigster Zerfalls-Kanal: $b\bar{b}$ / WW**
- Anzahl beobachteter Ereignisse ist nun $N_{x,obs} = L \cdot \sigma_x \cdot BR \cdot \Delta t \cdot \varepsilon$

Kern-Ideen der Teilchen-Phänomenologie

- Exploration eines neuen Energiebereichs

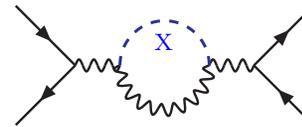
- ▷ Suche nach „erwarteten“ Signalen neuer Physik (z.B.: Higgs)
- ▷ offen sein für unerwartete neue Physik

[known unknowns]

[unknown unknowns]

- Durchführung präziser SM-Tests

- ▷ hohe Sensitivität auf BSM-Physik bei Präzisionsmessungen:
Quantenkorrekturen!
- ▷ benutze SM-Messungen zum „Eichen“ der Detektoren
- ▷ verstehe SM bei $\sqrt{s} = 14$ GeV; check Monte-Carlo Generatoren etc.

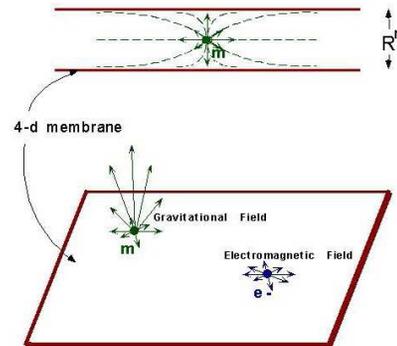


- experimentelle Limits \leftrightarrow theoretische Präzision

- ▷ z.B. SUSY-Suche
 \tilde{q}, \tilde{g} erzeugt durch starke WW; Kaskaden-Zerfall \rightarrow LSP
- ▷ fehlende Energie? z.B. Jets + E_T^{miss}
- ▷ SUSY-Massenskala etablieren
- ▷ Modellparameter festlegen (schwer! ILC..)

Was erträumt man sich noch zu finden?

z.B. zusätzliche (kompakte) Dimensionen



- Kernidee: Schwäche der Gravitation durch Verdünnung erklären
 - ▷ Gravitationsfelder dürfen mehr als 4 Dimensionen füllen
 - ▷ gewöhnliche Materie + Kräfte auf (3+1) dim „Membran“ gefangen
 - ▷ \leftrightarrow Motivation aus Stringtheorie, 3+1+6 Dims
 - ▷ z.B. ADD-Modell: n kompakte Extra-Dims, $M_F \sim \text{TeV}$: $M_P^2 \sim R^n M_F^{n+2}$
 - ▷ $\text{fm} \leq R \leq \text{mm}$ (Gravitationstests) $\Rightarrow 6 \geq n \geq 2$
- Wichtigste Kollider-Signatur: fehlende Energie!
 - ▷ z.B. $q \bar{q} \rightarrow j G_{KK}(\cancel{E})$, $e^+ e^- \rightarrow \gamma G_{KK}(\cancel{E})$
 - ▷ Gravitonen tragen Energie in die Extra-Dims
 - ▷ Produktion schwarzer Löcher für $\sqrt{s} \gg M_F$
- viele Modellvarianten: große, universelle, verzerrte, ... Extra-Dims

Ausblick

- haben eine **funktionierende** Beschreibung der Natur: Standardmodell (SM)
 - ▷ Think BIG! Grundlegendste Naturgesetze? Raum-Zeit-Struktur?
 - ▷ Universalität! \emptyset Universum - Teilchen - Plancklänge
 10^{28} cm - 10^{-17} cm - 10^{-33} cm
- Teilchenphysik höchst spannend:
 - ▷ „überlebt“ das SM die nächste Dekade?
 - ▷ viele theoretische Ideen zur SM-Erweiterung
 - ▷ welche sind in der Natur realisiert?
- riesige experimentelle Anstrengungen
 - ▷ **LHC 2010+** → völlig neue Energiebereiche
- Signale „neuer“ Physik sind extrem klein
 - ▷ **höchste Präzision** bei Hintergrund-Subtraktion erforderlich
 - ▷ viele Möglichkeiten für Beiträge in der Theorie mit moderatem Budget
 - ▷ Bielefelder Beiträge: **QCD-Präzisionsrechnungen**
- wir stehen am Anfang des LHC - Zeitalters
 - ▷ Entdeckungen könnten sehr schnell kommen
 - ▷ **fasten your seatbelts!**

