The background of the slide is a composite image of two galaxies. On the left is a blue and purple galaxy, and on the right is an orange and yellow galaxy. A semi-transparent dark grey rectangular box is overlaid in the center, containing the title and contact information.

# Brennpunkte extragalaktischer Forschung

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

E-mail: [sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de](mailto:sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de)

Web: [www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/](http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/)

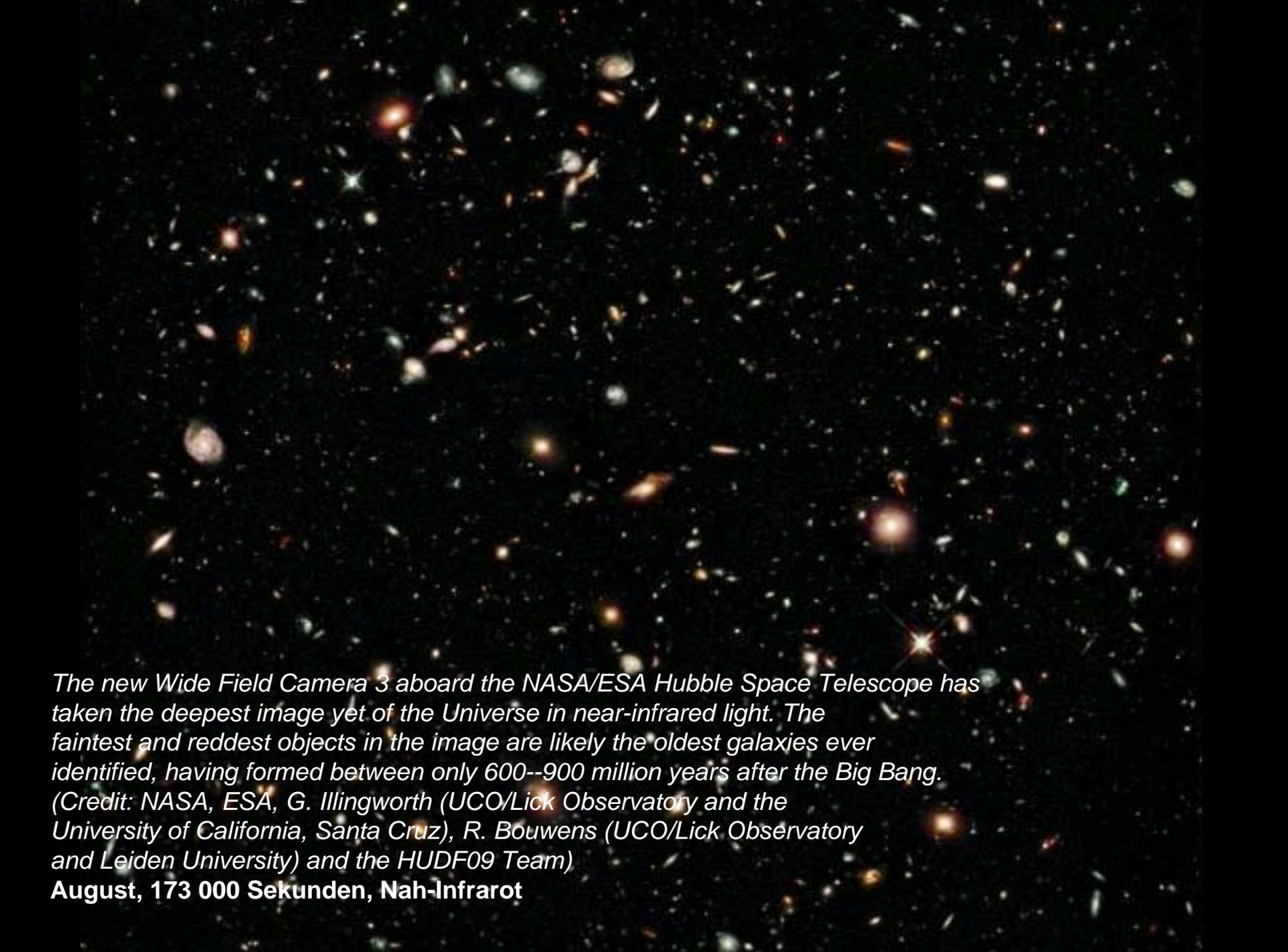
# Heute: das Programm



- 30.10. Gamma-Ray Bursts
- 13.11. GUT & TOE (Stringtheorie, etc.)
- 27.11. LHC & Higgs
- **11.12. Higgs & die Physik jenseits des Standardmodells**

Winterferien: 23.12.-06.01.10

- 08.01.10 Higgs & die Inflation
- 22.01.10 Urknall & die Zeit
- 05.02.10



*The new Wide Field Camera 3 aboard the NASA/ESA Hubble Space Telescope has taken the deepest image yet of the Universe in near-infrared light. The faintest and reddest objects in the image are likely the oldest galaxies ever identified, having formed between only 600--900 million years after the Big Bang.*

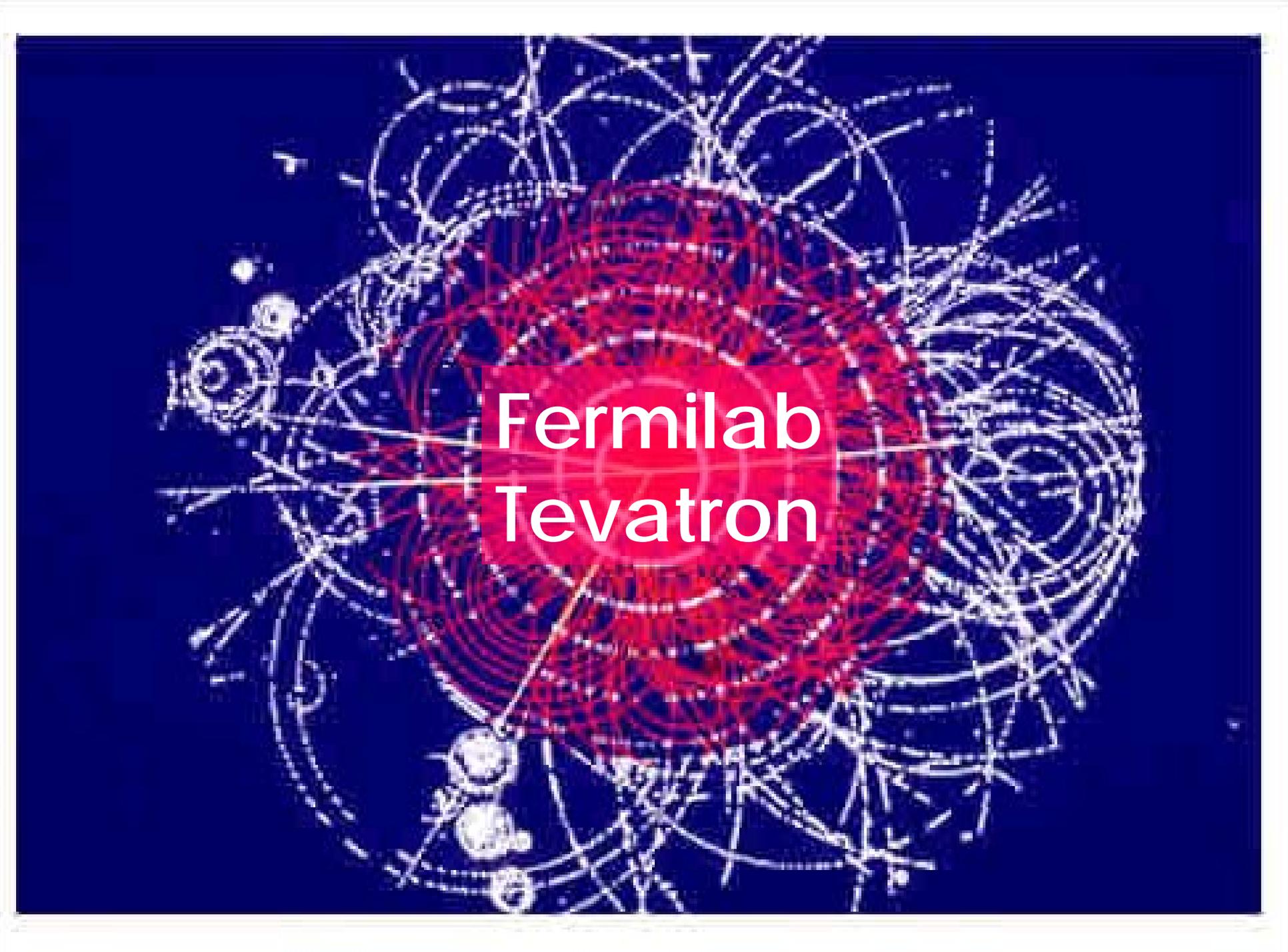
*(Credit: NASA, ESA, G. Illingworth (UCO/Lick Observatory and the University of California, Santa Cruz), R. Bouwens (UCO/Lick Observatory and Leiden University) and the HUDF09 Team)*

**August, 173 000 Sekunden, Nah-Infrarot**

# Heute im Detail

- **11.12. Higgs & die Physik jenseits des Standardmodells**
  - Der tiefste Blick ins All
  - Nachtrag: Fermilab / Tevatron
  - Bisherige Messungen der möglichen Masse des Higgs-Teilchens am Tevatron
  - Ganz kurze Zusammenfassung der letzten Vorlesung
  - Das Higgs – jenseits des Standardmodells
    - Übersicht: Alternativen zum Standardmodell
    - Supersymmetrie
    - Extradimensionen
  - Der International Linear Collider ... die nächste Generation



A complex visualization of particle tracks from a detector, likely the Tevatron at Fermilab. The image features a dense network of white and red lines on a dark blue background. A central red square contains the text "Fermilab Tevatron". The tracks are organized into concentric, circular patterns, suggesting a detector structure like a bubble chamber or a silicon detector. The overall appearance is that of a high-energy physics experiment's data visualization.

# Fermilab Tevatron

# Fermilab



Fermilab ist ein Teilchenphysik-Zentrum 50 Kilometer im Westen von Chicago. Das Zentrum wurde 1967 gegründet und beschäftigt rund 2.200 Mitarbeiter. Zudem wird das Labor jährlich von etwa 2.300 Gastwissenschaftlern besucht.

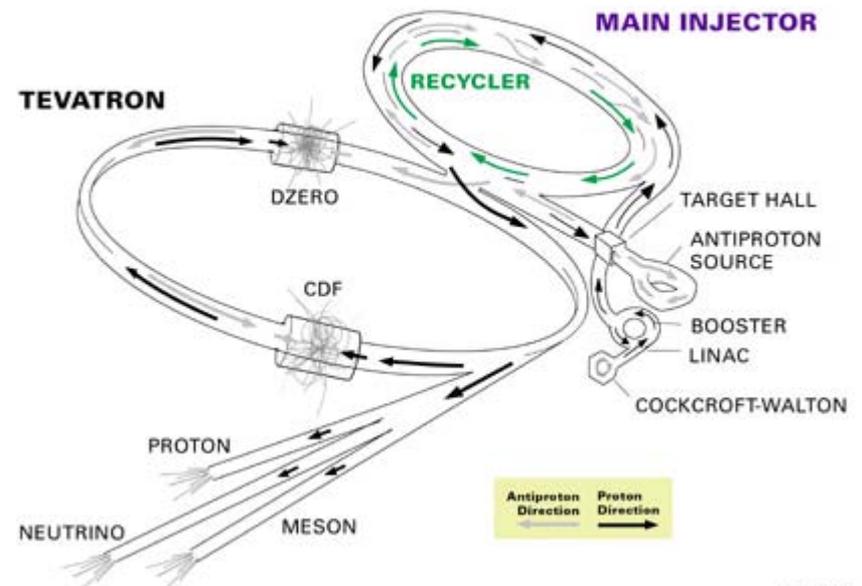
Entdeckungen Am Fermilab wurden das [Bottom-Quark](#) (1977), das [Top-Quark](#) (1995) und das [Tau-Neutrino](#) (2000) entdeckt. Name 1974 wurde das Zentrum, das zuerst noch „National Accelerator Laboratory“ hieß, offiziell in „Fermi National Accelerator Laboratory“ umbenannt – nach dem italienischen Physiker Enrico [Fermi](#) (1901–1954).

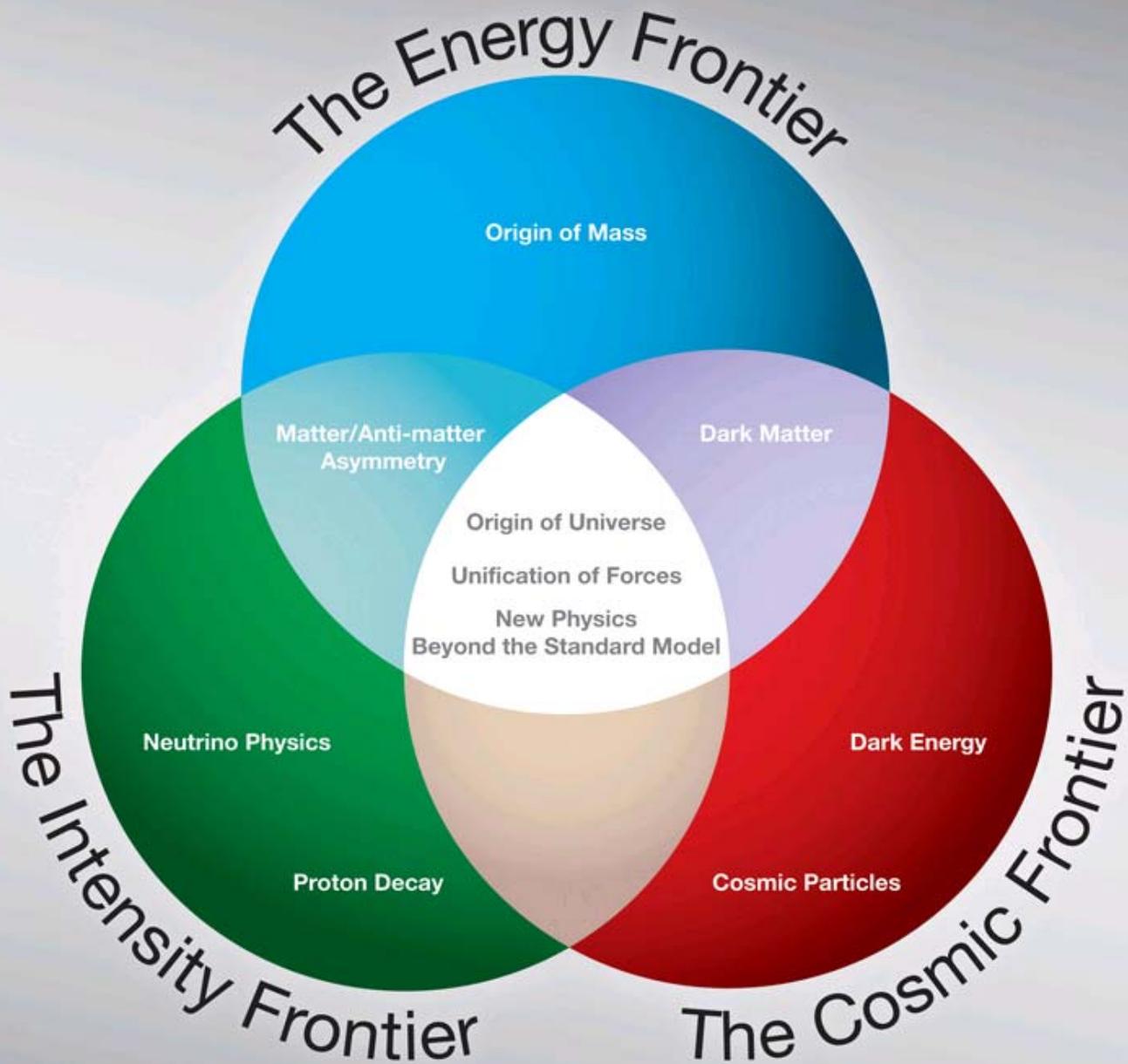
# Tevatron am Fermilab



- 2. Beschleunigerring (Tevatron) seit 1983, Umfang: 6.5 km
- Teilchen werden bis auf 980 GeV beschleunigt
- Kollisionen an 2 WWpunkten
- **Tevatron wurde am 30.11.09 vom LHC als energiereichster Teilchenbeschleuniger der Welt abgelöst**
- (Jährliche Stromkosten: 12-18 Millionen US-Dollar)

FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN





# Search for the Higgs Particle

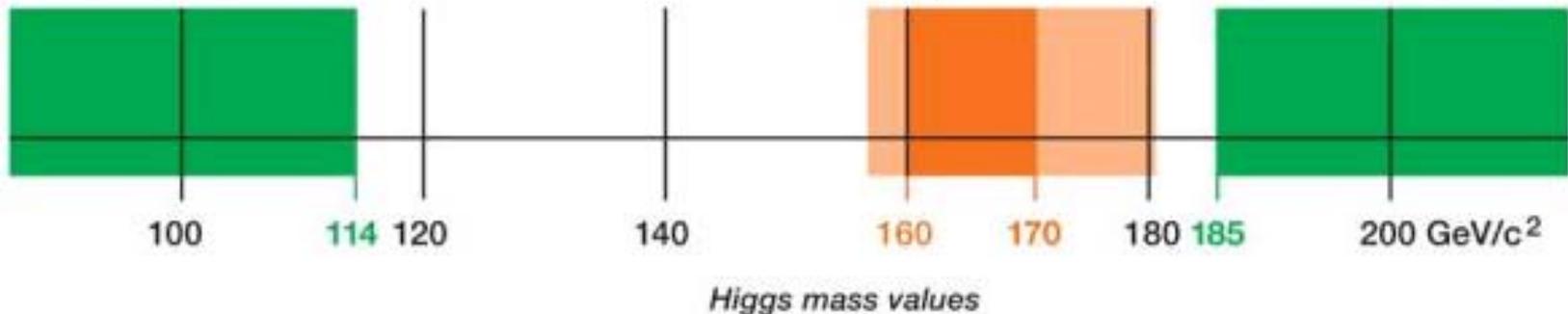
Status as of March 2009

90% confidence level  
95% confidence level

Excluded by  
LEP Experiments  
95% confidence level

Excluded by  
Tevatron  
Experiments

Excluded by  
Indirect Measurements  
95% confidence level



Scientists from the CDF and DZero collaborations at DOE's Fermilab have combined Tevatron data from their two experiments to increase the sensitivity for their search for the Higgs boson. **While no Higgs boson has been found yet, the results announced today exclude a mass for the Higgs between 160 and 170 GeV/c<sup>2</sup> with 95 percent probability.**

A larger area is excluded at the 90 percent probability level.

Earlier experiments at the Large Electron-Positron Collider at CERN excluded a Higgs boson with a mass of less than 114 GeV/c<sup>2</sup> at 95 percent probability.

Calculations of quantum effects involving the Higgs boson require its mass to be less than 185 GeV/c<sup>2</sup>. The results show that CDF and DZero are sensitive to potential Higgs signals. The Fermilab experimenters will test more and more of the available mass range for the Higgs as their experiments record more collision data and as they continue to

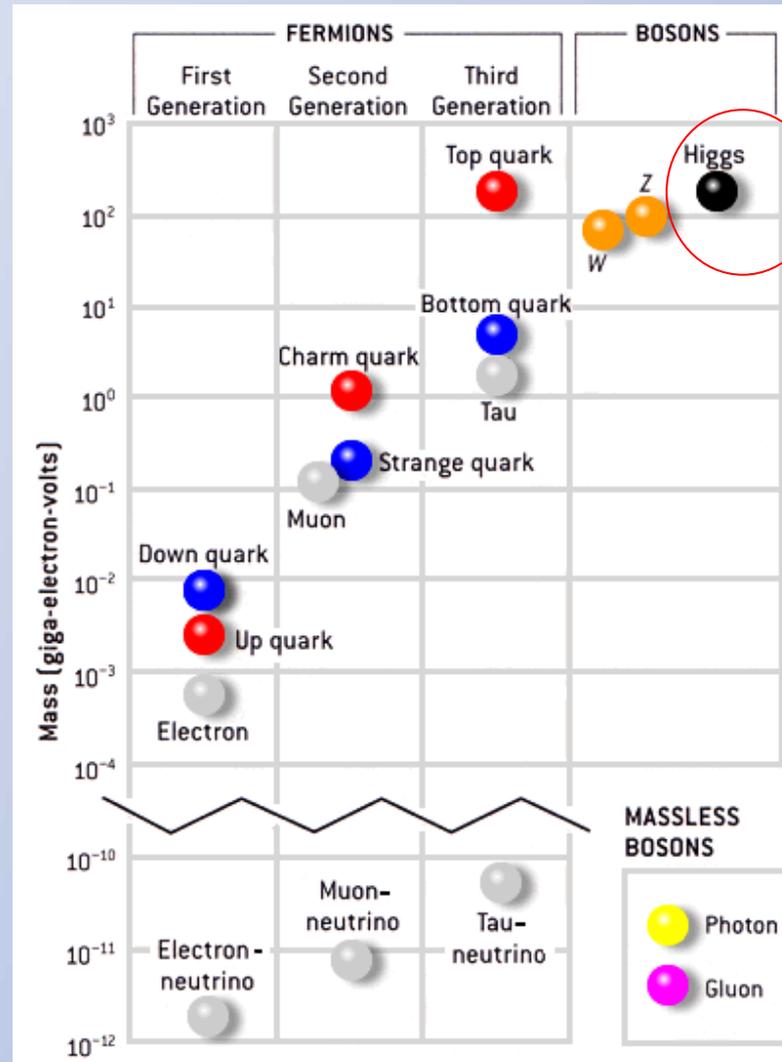
refine their experimental analyses. (Credit: Image courtesy of DOE/Fermi National Accelerator Laboratory)



**Kurze Zusammenfassung  
der letzten Vorlesung**

# Standardmodell

## Masse



Noch nicht gefunden!

# Das Standardmodell der Teilchenphysik

## Leptons

Electric Charge

Tau		-1	0		Tau Neutrino
Muon		-1	0		Muon Neutrino
Electron		-1	0		Electron Neutrino

## Strong

**Gluons (8)**



**Quarks**



**Mesons**



**Baryons**

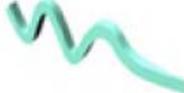


**Nuclei**

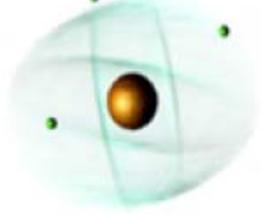


## Electromagnetic

**Photon**



**Atoms**



Light  
Chemistry  
Electronics

## Quarks

Electric Charge

Bottom		-1/3	2/3		Top
Strange		-1/3	2/3		Charm
Down		-1/3	2/3		Up

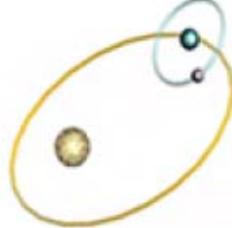
each quark: R, B, G 3 colours

## Gravitational

**Graviton ?**



**Solar system**



Galaxies  
Black holes

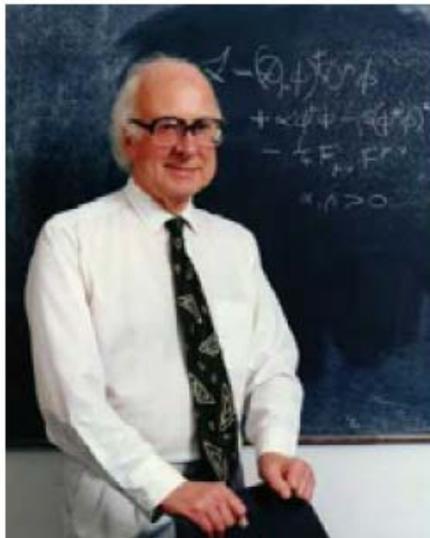
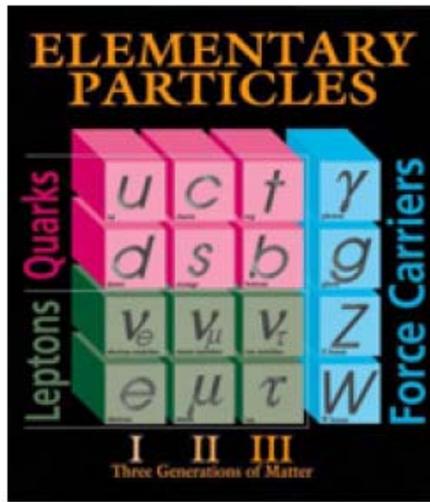
## Weak

**Bosons (W,Z)**



Neutron decay  
Beta radioactivity  
Neutrino interactions  
Burning of the sun

The particle drawings are a simple artistic representation



Peter Ware Higgs (\* 29. Mai 1929)

## IM STANDARDMODELL SIND ALLE TEILCHEN MASSELOS

- Offensichtlicher Widerspruch zum Experiment
  - $m_t \simeq 170\text{GeV}$
  - $m_W \simeq 80\text{GeV}$
  - $m_Z \simeq 90\text{GeV}$

## HIGGS MECHANISMUS

- Leeres Vakuum
  - Alle Teilchen sind masselos
  - Bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit
- Higgs-Hintergrundfeld
  - Teilchen werden durch Wechselwirkung mit Hintergrundfeld verlangsamt
  - Teilchen erhalten effektiv eine Masse
  - Wert hängt von Stärke der Wechselwirkung mit Hintergrundfeld ab
- Higgs Teilchen
  - Quantenmechanische Anregung des Hintergrundfeldes
  - Notwendige Konsequenz des Konzepts

# ATLAS Kollaboration

(Status April 2008)

37 Länder  
167 Institute (14 aus Deutschland)  
2200 Wissenschaftliche Autoren insgesamt  
(1750 mit PhD)



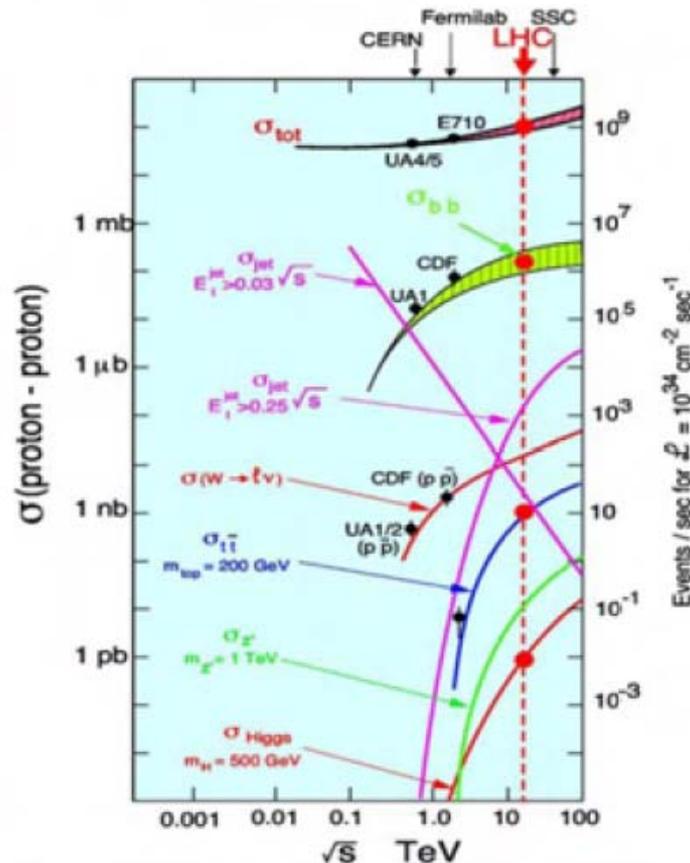
Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, **HU Berlin**, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, **Bonn**, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, **DESY**, **Dortmund**, **TU Dresden**, JINR Dubna, Duke, Frascati, **Freiburg**, Geneva, Genoa, **Giessen**, Glasgow, **Göttingen**, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, **Heidelberg**, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, **Mainz**, Manchester, **Mannheim**, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MEPhI Moscow, MSU Moscow, **Munich LMU**, **MPI Munich**, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Regina, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, **Siegen**, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Washington, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, **Wuppertal**, Yale, Yerevan

# Der ATLAS Detektor

ANGELA MERKEL BESICHTIGT DAS ATLAS EXPERIMENT (29. April 2008)



# Wirkungsquerschnitte von Physikprozessen am LHC



## ERWARTETE EREIGNISRATEN:

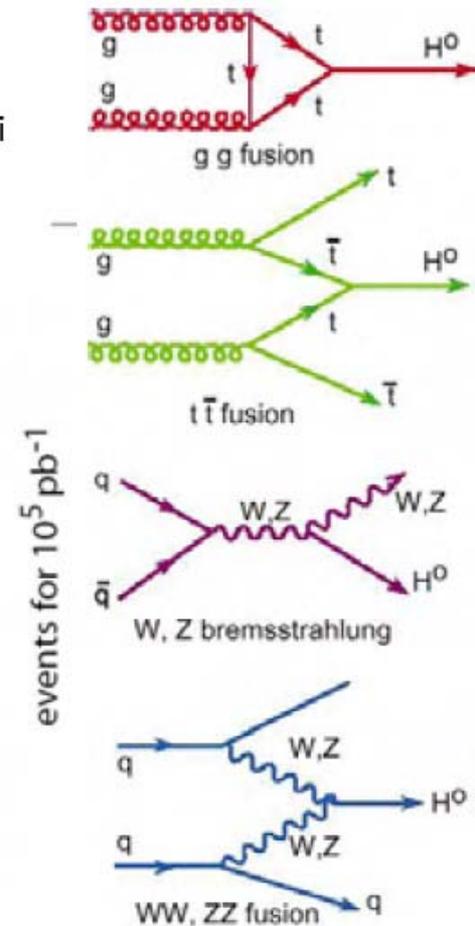
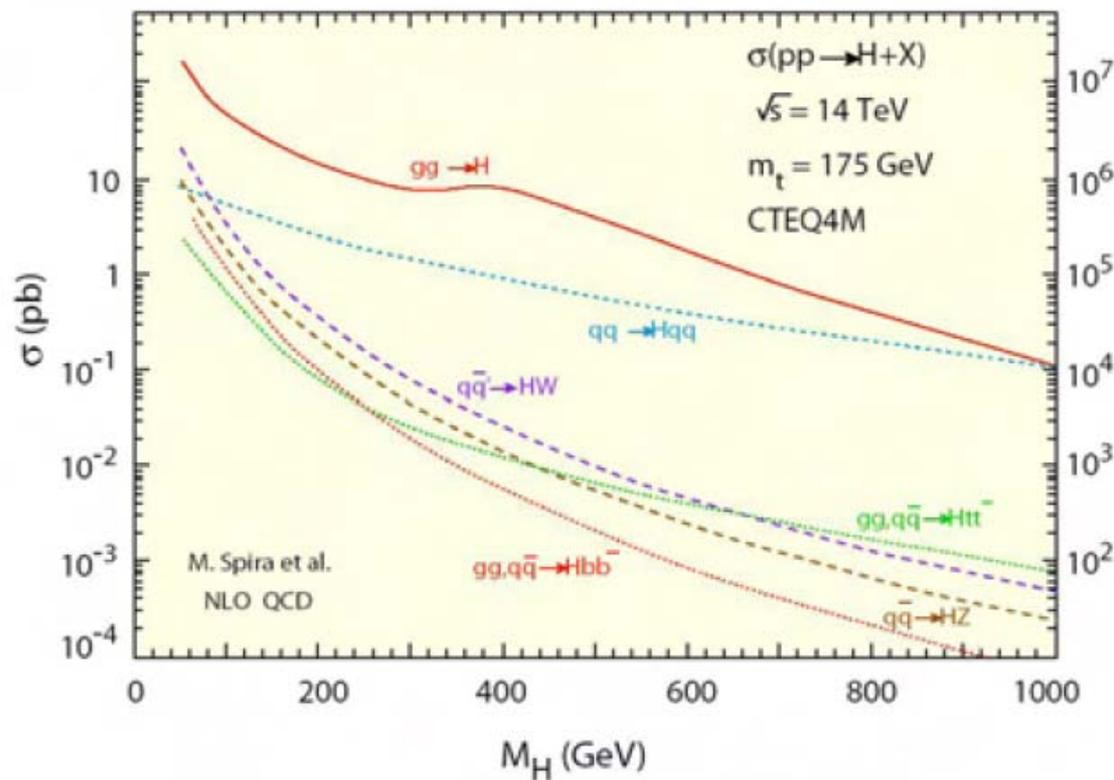
	Ereignisse/s	Ereignisse/Jahr
$b\bar{b}$	$10^6$	$10^{13}$
QCD-Jets	100	$10^9$
$W \rightarrow e\nu$	40	$4 \cdot 10^8$
$Z \rightarrow ee$	4	$4 \cdot 10^7$
$t\bar{t}$	1.6	$1.6 \cdot 10^7$
H ( $m = 120\text{GeV}$ )	0.08	$8 \cdot 10^5$
H ( $m = 800\text{GeV}$ )	0.001	$10^4$

- Hohe Ereignisraten für Untergrundprozesse
- Gefahr interessante Ereignisse zu verwerfen
- Höchste Anforderungen an
  - Detektorverständnis
  - Algorithmen zu Teilchenidentifikation

# SM Higgs Suche bei ATLAS

## HIGGS BOSON PRODUKTION

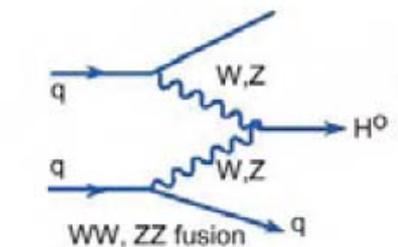
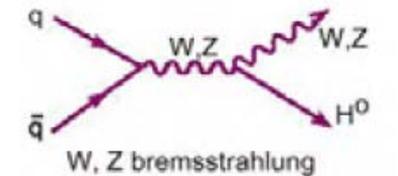
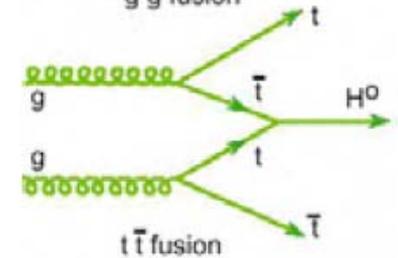
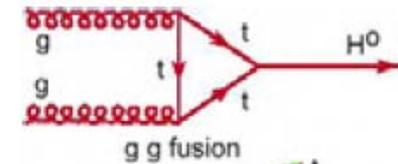
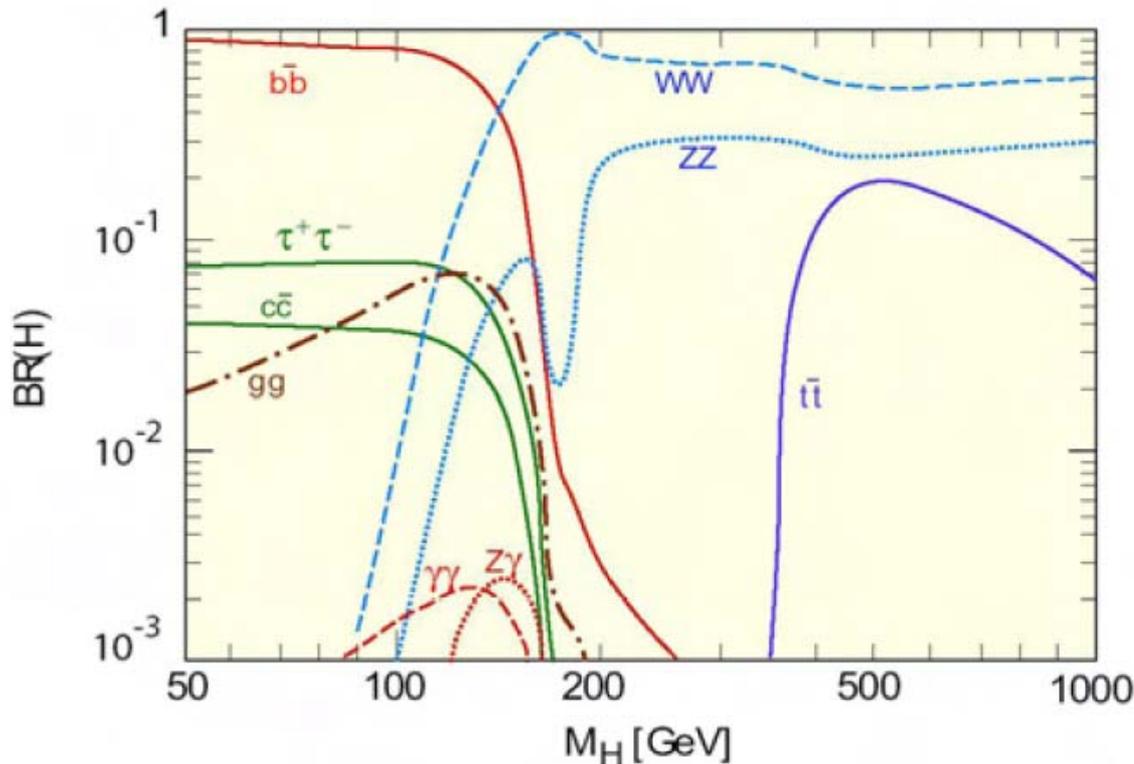
- Higgs Boson Masse unbekannt
- Viele verschiedene Produktionsmechanismen
- Nach 1-3 Jahren gut verstandener Daten kann Higgs Boson bei allen Massen entdeckt werden



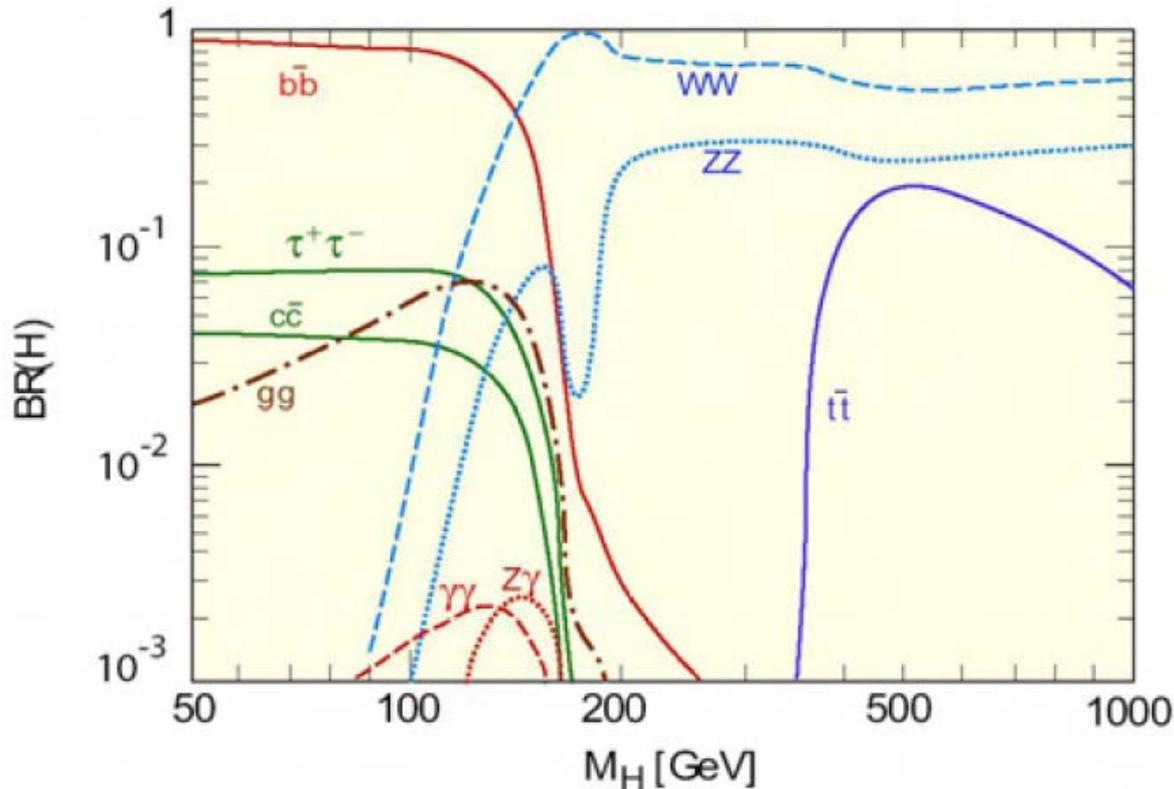
# SM Higgs Suche bei ATLAS

## HIGGS BOSON PRODUKTION

- Higgs Boson Masse unbekannt
- Viele verschiedene Produktionsmechanismen
- Nach 1-3 Jahren gut verstandener Daten kann Higgs Boson bei allen Massen entdeckt werden



# Die Higgs Boson Suche am LHC

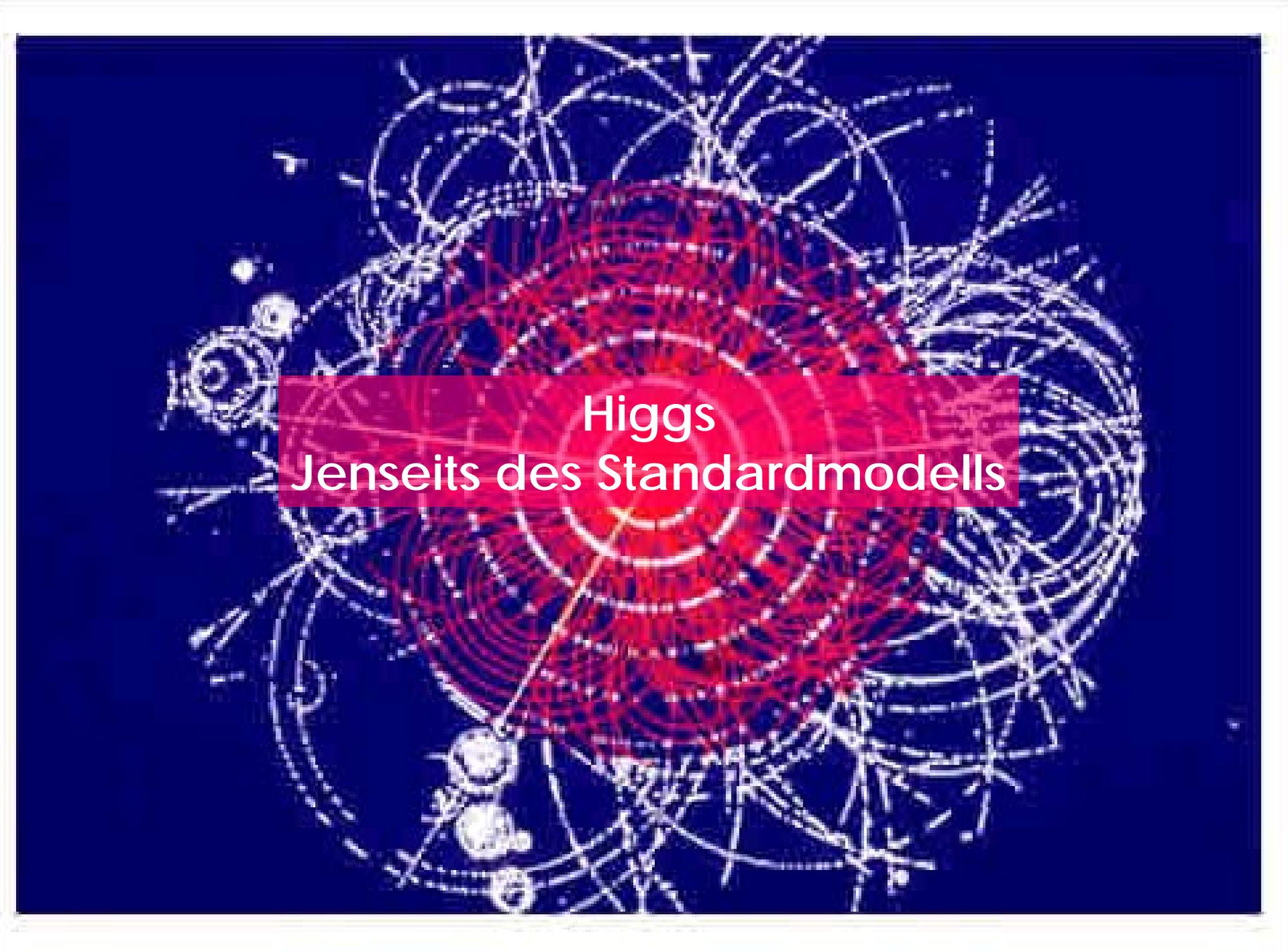


## SUCHKANÄLE AM LHC

- Niedrige Massen
  - $H \rightarrow \gamma\gamma$
  - $H \rightarrow \tau\tau$  ( $qqH$ )
  - $H \rightarrow b\bar{b}$  ( $ttH$ )
- Mittlerer Massenbereich
  - $H \rightarrow ZZ$
  - $H \rightarrow WW$  ( $qqH$ )
- Hohe Massen
  - $H \rightarrow WW$
  - $H \rightarrow ZZ$

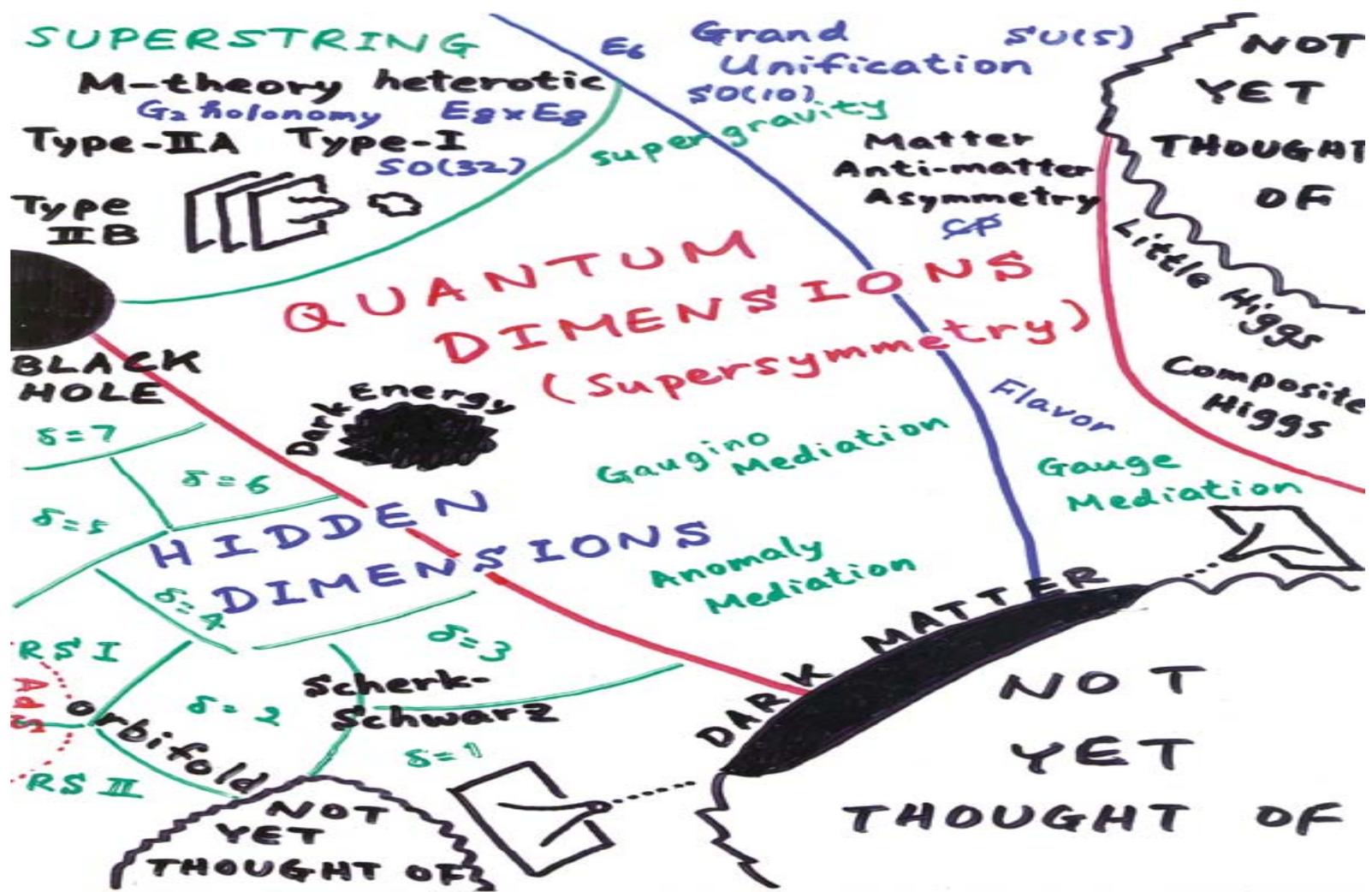
## EFFIZIENTE IDENTIFIKATION DER HIGGS-ZERFALLSPRODUKTE ESSENTIELL

- Identifikation von Photonen
- Nachweis von Leptonen (Elektronen/Muonen)
- Identifikation von  $\tau$  Lepton Zerfällen
- Nachweis von  $b$  Quark Jets

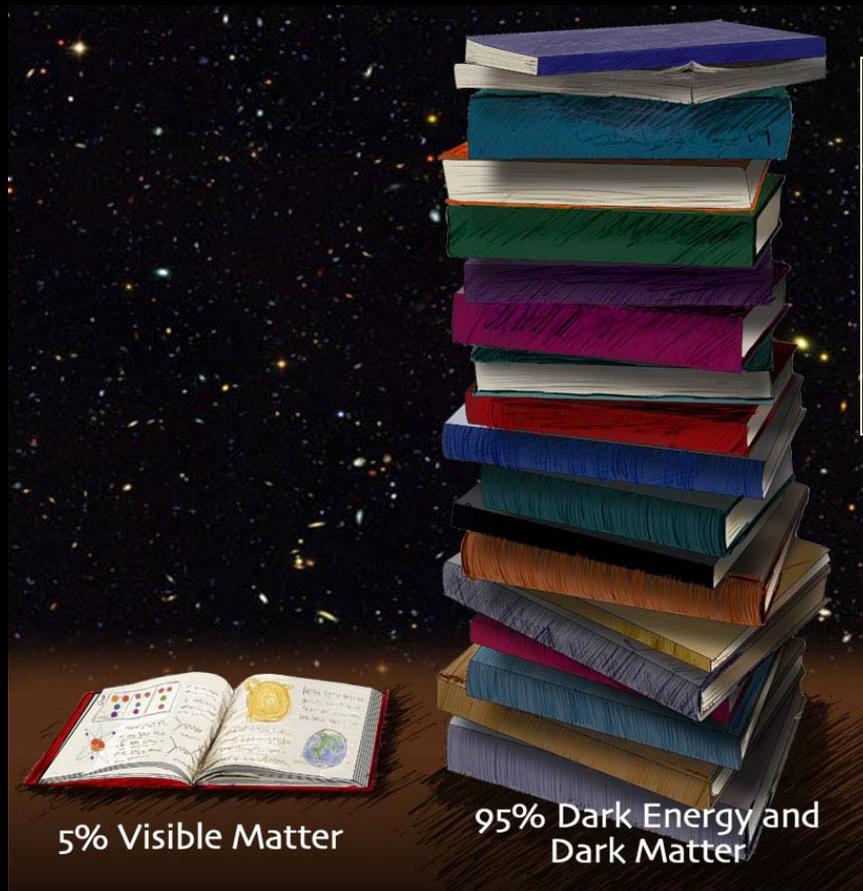
A complex visualization of particle detector data, likely from the ATLAS or CMS experiments at the LHC. The image shows a dense network of white and red lines representing particle tracks and energy deposits. A prominent red circular region is centered in the image, overlaid with a semi-transparent red rectangle containing the title text. The background is a dark blue/black color.

# Higgs Jenseits des Standardmodells





# Is Dark Matter a Particle?



The lightest supersymmetric particle has the right properties to be dark matter

Can we produce dark matter in a collider and study all its properties?

## Weitere Modelle:

### SuperGravity (SUGRA):

- Erweiterung von SUSY; Gravitation (Graviton und Gravitino):
  - alle skalaren Massen sind gleich ( $m_0$ ) an der GUT Skala
  - alle Gaugino Massen sind gleich ( $m_{1/2}$ ) an der GUT Skala
  - alle Higgs-sfermion-sfermion Kopplungen sind gleich an der GUT Skala

### Compositness

### Starke Boson-Boson Wechselwirkungen

### Technicolor

### Extra Dimensions (modifizierte Gravitation)

...

- MSSM: Minimales Supersymmetrisches Standardmodell
- MSSM
- Das MSSM ist die (im Sinne der Teilchenzahl) kleinste Möglichkeit, ein realistisches supersymmetrisches Teilchenphysikmodell aufzubauen. Das MSSM erweitert das SM um ein zusätzliches Higgs-Dublett und SUSY-Partnerteilchen für alle Teilchen des Modells, wobei kein expliziter Mechanismus angegeben wird, der begründet, warum die neuen Teilchen andere Massen besitzen als ihre Standardmodellpartner. Statt dessen werden alle supersymmetriebrechenden Terme, die renormierbar, eichinvariant und R-paritätserhaltend sind, explizit mit zunächst unbekanntem Kopplungskonstanten in das Modell aufgenommen.
- Große Vereinheitlichte Theorie
- Die Existenz der neuen Teilchen ab einer Masse von 100 GeV bis 1 TeV beeinflusst das Running, d. h. die Energieabhängigkeit der Parameter („Kopplungskonstanten“), die die Stärke der drei im Standardmodell vorkommenden Wechselwirkungen charakterisieren, so dass sie sich bei extrem hohen Energien von  $10^{16}$  GeV einem gemeinsamen Wert nähern. Im üblichen Standardmodell treffen sie aber nur fast an einem Punkt zusammen, während supersymmetrische Theorien einen sehr viel genaueren „Vereinigungspunkt“ liefern. Dies wird manchmal als ein Hinweis auf vereinheitlichte Theorien interpretiert, also auf Theorien, in denen die drei Wechselwirkungen des Standardmodells analog der elektrischen und magnetischen Wechselwirkung nur verschiedene Effekte einer einzigen übergeordneten Wechselwirkung sind.

- Supergravitation
- Die um die SUSY-Generatoren erweiterten Raumzeitsymmetrien sind zunächst (wie auch im Standardmodell) globale Symmetrien. Deklariert man SUSY zu einer *lokalen* Symmetrie, so erzwingt dies zwei neue Teilchen: Das Spin-3/2 **Gravitino** und das Spin-2 Graviton, von dem erwartet wird, das Wechselwirkungsteilchen der Gravitation zu sein. Daher werden **lokale SUSY-Theorien auch Supergravitation (SUGRA) genannt**. Supergravitation besitzt gegenüber lokaler Raumzeitsymmetrie im Standardmodell (die nicht renormierbar ist) zwei potentielle Vorteile, die insbesondere in der Anfangsphase supersymmetrischer Ansätze die Hoffnung nährten, dass SUSY einen möglichen Mechanismus für eine Theorie der Quantengravitation liefert:
- Nach der Relativitätstheorie ist die totale Energiedichte des Raumes ein Quellterm für Gravitation. Im Standardmodell der Teilchenphysik ist der Erwartungswert der Energiedichte jedoch bereits im Vakuum unendlich. In supersymmetrischen Theorien ist die Vakuumenergiedichte endlich (im Fall der ungebrochenen Supersymmetrie sogar exakt Null).
- Bis heute ist es – mit potentieller Ausnahme von Superstringansätzen, die jedoch über einfache Supersymmetrie hinausgehen – nicht gelungen, eine widerspruchsfreie Theorie der Supergravitation aufzustellen. SUGRA könnte allerdings eine effektive Theorie unterhalb der Planck-Skala sein: SUGRA ist ein möglicher Mechanismus für spontane Supersymmetriebrechung. In manchen Modellen ist der Nachweis des Gravitinos an zukünftigen Beschleunigerexperimenten wie dem LHC denkbar.

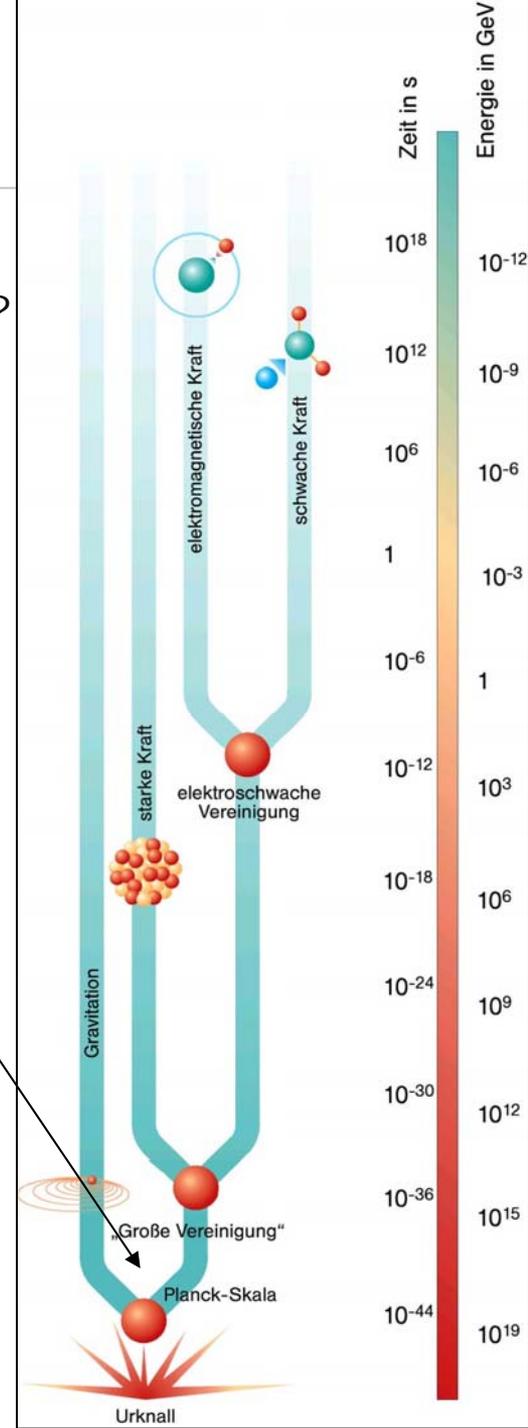
A complex Feynman diagram on a dark blue background. The diagram features a central region filled with a dense network of red lines, surrounded by a more sparse network of white lines. The lines represent particle interactions and paths. In the center, there is a red rectangular box containing white text. The overall appearance is that of a high-energy physics diagram, possibly related to supersymmetry.

Jenseits des Standardmodells  
Supersymmetrie

# Einführung

## Offene Fragen

- Warum ist die Gravitation so schwach?
- Haben die Kräfte eine gemeinsame „Ursache“?
- Waren die Kräfte im Urknall gleich?
  - Ist das Universum beim Abkühlen unsymmetrisch geworden?
- Ziel: Große Vereinigung inklusive Gravitation



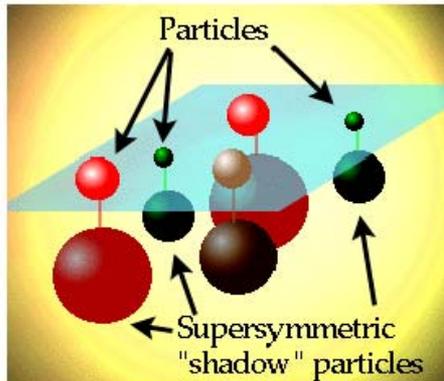
# Supersymmetrie

- Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik besteht unsere Welt aus Materie- und Kraftteilchen, die sich sehr unterschiedlich verhalten.
- Warum diese Unterschiede?
- Der Supersymmetrie zufolge gibt es zu allen Materieteilchen Partner, die sich wie Kraftteilchen verhalten und umgekehrt!
- Die starre Unterscheidung zwischen Materie und physikalischen Kräften wäre damit beseitigt, die Beschreibung der Natur wäre dann deutlich einfacher geworden!!

# 5.3 Supersymmetrie (SUSY)

## Symmetrie zwischen

**Fermionen** ↔ **Bosonen**  
 (Materie)                      (Kraftteilchen)



Spin	Standardparticle	Superpartner	Spin
1/2	Leptons (e, ν <sub>e</sub> , ...) Quarks (u, d, ...)	Sleptons ( $\tilde{e}, \tilde{\nu}_e, \dots$ ) Squarks ( $\tilde{u}, \tilde{d}, \dots$ )	0
1	Gluons W <sup>±</sup> Z <sup>0</sup> Photon (γ)	Gluinos Wino <b>Zino</b> <b>Photino (γ̃)</b>	1/2
0	Higgs	<b>Higgsino</b>	1/2
2	Graviton	Gravitino	3/2



Optimist:  
 Die eine Hälfte wurde  
 bereits beobachtet ...



Pessimist:  
 ... die andere Hälfte  
 fehlt noch.

Teilchenmassen 100 - 2000 GeV !

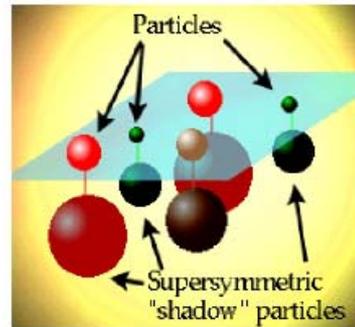
# 5.3 Supersymmetrie (SUSY)

Supersymmetrie ist eine Boson-Fermion Symmetrie, die eine Vereinheitlichung aller Kräfte erlaubt (inkl. Gravitation)

SUSY kann nur existieren, wenn es gleich viele Bosonen und Fermionen gibt  $\Rightarrow$  Verdoppelung des Teilchenspektrums (Waw, Eldorado für Teilchenphysiker)



One half is observed!



One half is NOT observed!

SUSY Operator  $Q | boson \rangle = | fermion \rangle \quad Q | fermion \rangle = | boson \rangle$

$spin\ 2 \rightarrow spin\ 3/2 \rightarrow spin\ 1 \rightarrow spin\ 1/2 \rightarrow spin\ 0$

$$\{Q_{\alpha}^i, \bar{Q}_{\beta}^j\} = 2\delta^{ij}(\sigma^{\mu})_{\alpha\beta}P_{\mu} \Rightarrow \{\delta_c, \bar{\delta}_c\} = 2(\varepsilon\sigma^{\mu}\bar{\varepsilon})P_{\mu}$$

$\varepsilon = \varepsilon(x)$  local coordinate transformation.

Local translation =  
general relativity !

# Particle spectrum in SUPERSYMMETRY

## Symmetry between

### Fermions $\leftrightarrow$ Bosons

(Matter particles) (exchange particles)

Spin	Standardparticle	Superpartner	Spin
1/2	Leptons (e, $\nu_e$ , ...) Quarks (u, d, ...)	Sleptons ( $\tilde{e}, \tilde{\nu}_e, \dots$ ) Squarks ( $\tilde{u}, \tilde{d}, \dots$ )	0
1	Gluons $W^\pm$ $Z^0$ Photon ( $\gamma$ )	Gluinos Wino <b>Zino</b> <b>Photino (<math>\tilde{\gamma}</math>) = WIMP</b>	1/2
0	Higgs	<b>Higgsino</b>	1/2
2	Graviton	Gravitino	3/2

SUSY masses: 100 - 2000 GeV !

Lightest Supersymmetric Particle (LSP) is stable, heavy and weakly interacting  
 $\Rightarrow$  excellent Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)  $\Rightarrow$  DM candidate!  
 R-Parity conservation: TWO SUSY particles at each vertex!  
 LSP mostly photinolike in MSSM  $\Rightarrow$  DM = supersymmetric partner of CMB

# Motivation für die Einführung von Supersymmetrie

- **Vereinigung mit der Gravitation (Superstringtheorie)**
- **Vereinigung der Eichkopplungen**
- **Lösung des Hierarchieproblems**
- **Vorhersagung Higgsmechanismus und Higgsmasse (leichteste Higgsteilchen)**
- **Kandidat für dunkle Materie im Universum**

# Laufende Kopplungskonstanten

Die Energieabhängigkeit der Kopplungskonstanten wird durch eine Differentialgleichung bestimmt, die sogenannte Renormierungsgruppengleichung (renormalization group equation = RGE).

Die in der RGE auftretenden Koeffizienten hängen von den Eigenschaften und der Anzahl der in Schleifendiagrammen umlaufenden Teilchen ab.

Supersymmetrie liefert mehr Teilchen (oder Teilchenzustände), daher ändern sich die Koeffizienten der RGE.

Durch Einführung von supersymmetrischen Teilchen mit Massen im TeV-Bereich, ändert sich die Steigung der Energieabhängigkeit der Kopplungskonstanten derart, dass sie bei  $E = 2 \cdot 10^{16}$  GEV den gleichen Wert annehmen.

# mSUGRA: need to solve 28 coupled differential RGEs (From W. de Boer, Review, hep-ph/9402266)

$$\begin{aligned} \frac{dY_i}{dt} = & Y_i \left( \frac{16}{3} \tilde{a}_3 + 3\tilde{a}_2 + \frac{13}{15} \tilde{a}_1 - 6Y_i \right. \\ & - \left( \frac{16}{3} b_3 + \frac{128}{9} \right) \tilde{a}_3^2 - (3b_2 + \frac{9}{2}) \tilde{a}_2^2 - \left( \frac{13}{15} b_1 + \frac{169}{450} \right) \tilde{a}_1^2 - 8\tilde{a}_3 \tilde{a}_2 - \frac{136}{45} \tilde{a}_3 \tilde{a}_1 - \tilde{a}_2 \tilde{a}_1 \\ & \left. - 16\tilde{a}_3 Y_i - 6\tilde{a}_2 Y_i - \frac{6}{5} \tilde{a}_1 Y_i + 22Y_i^2 \right) \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

$$\begin{aligned} \frac{dY_b}{dt} = & Y_b \left( \frac{16}{3} \tilde{a}_3 + 3\tilde{a}_2 + \frac{7}{15} \tilde{a}_1 - Y_i \right. \\ & - \left( \frac{16}{3} b_3 + \frac{128}{9} \right) \tilde{a}_3^2 - (3b_2 + \frac{9}{2}) \tilde{a}_2^2 - \left( \frac{7}{15} b_1 + \frac{49}{450} \right) \tilde{a}_1^2 - 8\tilde{a}_3 \tilde{a}_2 - \frac{8}{9} \tilde{a}_3 \tilde{a}_1 - \tilde{a}_2 \tilde{a}_1 \\ & \left. - \frac{4}{5} \tilde{a}_1 Y_i + 5Y_i^2 \right) \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

$$\begin{aligned} \frac{dY_\tau}{dt} = & Y_\tau \left( +3\tilde{a}_2 + \frac{9}{5} \tilde{a}_1 \right. \\ & \left. - (3b_2 + \frac{9}{2}) \tilde{a}_2^2 - \left( \frac{9}{5} b_1 + \frac{81}{50} \right) \tilde{a}_1^2 - \frac{9}{5} \tilde{a}_2 \tilde{a}_1 \right) \end{aligned} \quad (\text{A.25})$$

98

$$\frac{d\mu^2}{dt} = 3(\tilde{a}_2 + \frac{1}{5} \tilde{a}_1 - Y_i) \mu^2 \quad (\text{A.55})$$

$$\frac{d\tilde{m}_1^2}{dt} = 3(\tilde{a}_2 M_2^2 + \frac{1}{5} \tilde{a}_1 M_1^2) + 3(\tilde{a}_2 + \frac{1}{5} \tilde{a}_1 - Y_i) \mu^2 \quad (\text{A.56})$$

$$\frac{d\tilde{m}_2^2}{dt} = 3(\tilde{a}_2 M_2^2 + \frac{1}{5} \tilde{a}_1 M_1^2) + 3(\tilde{a}_2 + \frac{1}{5} \tilde{a}_1) \mu^2 - 3Y_i(\tilde{m}_Q^2 + \tilde{m}_U^2 + m_2^2 + A_t^2 m_0^2) \quad (\text{A.57})$$

$$\frac{d\tilde{m}_3^2}{dt} = \frac{3}{2} (\tilde{a}_2 + \frac{1}{5} \tilde{a}_1 - Y_i) m_3^2 + 3\mu m_0 Y_i A_t - 3\mu (\tilde{a}_2 M_2 + \frac{1}{5} \tilde{a}_1 M_1) \quad (\text{A.58})$$

$$\frac{dA_t}{dt} = \left( \frac{16}{3} \tilde{a}_3 \frac{M_3}{m_0} + 3\tilde{a}_2 \frac{M_2}{m_0} + \frac{13}{15} \tilde{a}_1 \frac{M_1}{m_0} \right) - 6Y_i A_t \quad (\text{A.85})$$

$$\frac{dB}{dt} = 3 \left( \tilde{a}_2 \frac{M_2}{m_0} + \frac{1}{5} \tilde{a}_1 \frac{M_1}{m_0} \right) - 3Y_i A_t \quad (\text{A.86})$$

$$\frac{d\tilde{m}_L^2}{dt} = \left( 3\tilde{a}_2 M_2^2 + \frac{3}{5} \tilde{a}_1 M_1^2 \right) \quad (\text{A.35})$$

$$\frac{d\tilde{m}_E^2}{dt} = \left( \frac{12}{5} \tilde{a}_1 M_1^2 \right) \quad (\text{A.36})$$

$$\frac{d\tilde{m}_Q^2}{dt} = \left( \frac{16}{3} \tilde{a}_3 M_3^2 + 3\tilde{a}_2 M_2^2 + \frac{1}{15} \tilde{a}_1 M_1^2 \right) - \delta_{33} Y_i (\tilde{m}_Q^2 + \tilde{m}_U^2 + m_2^2 + A_t^2 m_0^2 - \mu^2) \quad (\text{A.37})$$

$$\frac{d\tilde{m}_U^2}{dt} = \left( \frac{16}{3} \tilde{a}_3 M_3^2 + \frac{16}{15} \tilde{a}_1 M_1^2 \right) - \delta_{33} 2Y_i (\tilde{m}_Q^2 + \tilde{m}_U^2 + m_2^2 + A_t^2 m_0^2 - \mu^2) \quad (\text{A.38})$$

$$\frac{d\tilde{m}_D^2}{dt} = \left( \frac{16}{3} \tilde{a}_3 M_3^2 + \frac{4}{15} \tilde{a}_1 M_1^2 \right) \quad (\text{A.39})$$

$$\frac{d\tilde{a}_i}{dt} = -b_i \tilde{a}_i^2 - \tilde{a}_i^2 \left( \sum_j b_{ij} \tilde{a}_j - a_i Y_i \right), \quad (\text{A.15})$$

where  $a_1 = \frac{26}{5}, a_2 = 6, a_3 = 4$  for SUSY and  $a_1 = \frac{17}{10}, a_2 = \frac{3}{2}, a_3 = 2$  for the SM.

The first order coefficients for the SM are [117]:

$$b_i = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -22/3 \\ -11 \end{pmatrix} + N_{Fam} \begin{pmatrix} 4/3 \\ 4/3 \\ 4/3 \end{pmatrix} + N_{Higgs} \begin{pmatrix} 1/10 \\ 1/6 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.16})$$

while for the supersymmetric extension of the SM (to be called MSSM in the following) [117]:

$$b_i = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -6 \\ -9 \end{pmatrix} + N_{Fam} \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix} + N_{Higgs} \begin{pmatrix} 3/10 \\ 1/2 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.17})$$

Here  $N_{Fam}$  is the number of families of matter supermultiplets and  $N_{Higgs}$  is the number of Higgs doublets. We use  $N_{Fam} = 3$  and  $N_{Higgs} = 1$  or  $2$ , which corresponds to the minimal SM or minimal SUSY model, respectively.

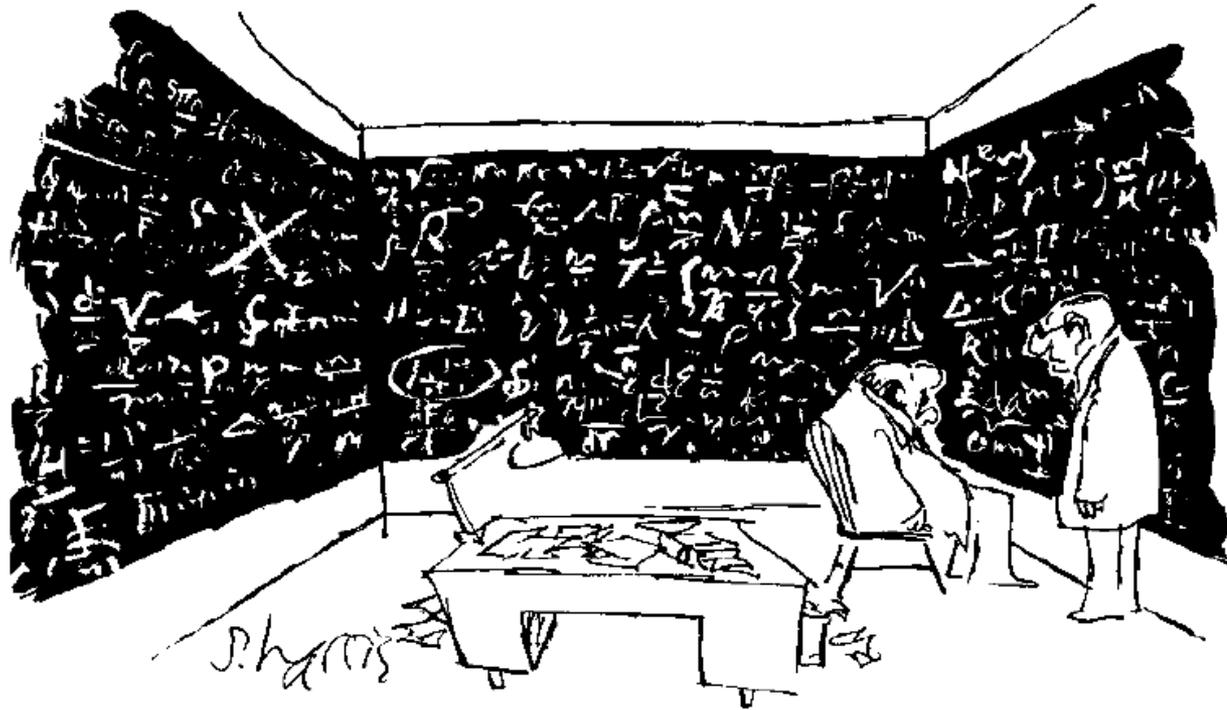
The second order coefficients are:

$$b_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{130}{3} & 0 \\ 0 & 0 & -102 \end{pmatrix} + N_{Fam} \begin{pmatrix} \frac{10}{15} & \frac{3}{5} & \frac{41}{15} \\ \frac{1}{5} & \frac{49}{3} & 4 \\ \frac{11}{30} & \frac{2}{3} & \frac{76}{3} \end{pmatrix} + N_{Higgs} \begin{pmatrix} \frac{9}{50} & \frac{9}{10} & 0 \\ \frac{8}{10} & \frac{13}{6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.18})$$

For the SUSY model they become:

$$b_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -24 & 0 \\ 0 & 0 & -54 \end{pmatrix} + N_{Fam} \begin{pmatrix} \frac{38}{15} & \frac{6}{5} & \frac{88}{15} \\ \frac{2}{5} & 14 & 8 \\ \frac{11}{15} & 3 & \frac{68}{3} \end{pmatrix} + N_{Higgs} \begin{pmatrix} \frac{9}{50} & \frac{9}{10} & 0 \\ \frac{5}{10} & \frac{7}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.19})$$

## Im Prinzip eine einfache Symmetrie, ABER



"Whatever happened to *elegant* solutions?"

# Vereinigung der Kräfte

## Input

$$\alpha^{-1}(M_Z) = 128.978 \pm 0.027$$

$$\sin^2 \theta_{\overline{MS}} = 0.23146 \pm 0.00017$$

$$\alpha_s(M_Z) = 0.1184 \pm 0.0031$$

## Output

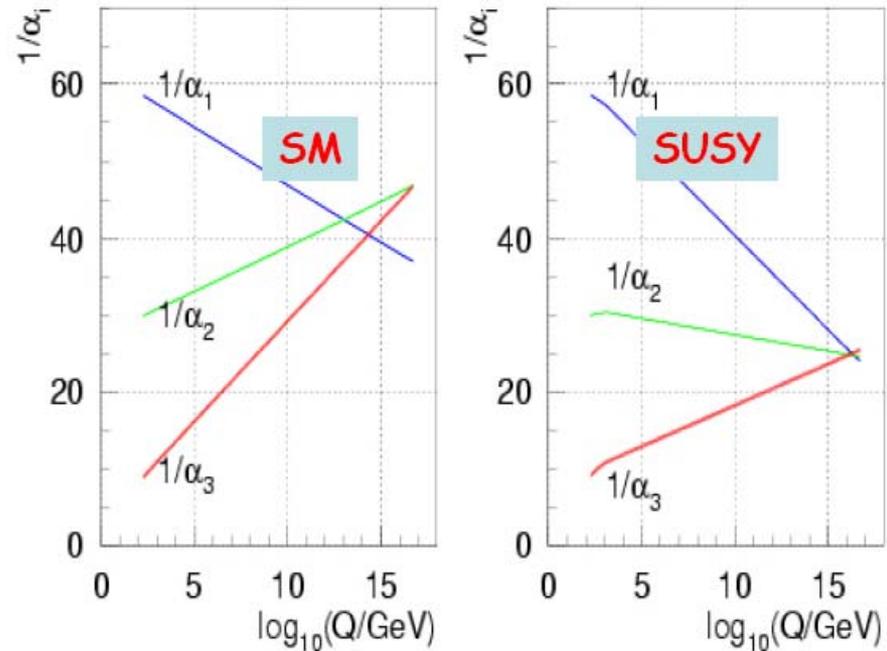
$$M_{SUSY} = 10^{3.4 \pm 0.9 \pm 0.4} \text{ GeV}$$

$$M_{GUT} = 10^{15.8 \pm 0.3 \pm 0.1} \text{ GeV}$$

$$\alpha_{GUT}^1 = 26.3 \pm 1.9 \pm 1.0$$

Amaldi, de Boer, Fürstenau (1991)

SUSY erlaubt die Vereinheitlichung der Kräfte bei großen Energieskalen.  
Die Kopplungskonstanten werden gleich groß.



Skalenverhalten:  $1/\alpha_i \propto \log Q^2$  beruht auf radiativen Korrekturen

# On the 1000+ citation list..

**May the forces be unified with supersymmetry**

**Supersymmetrie am Horizont?**

**Evidence of supersymmetry**

**UNIFICATION OF COUPLINGS**

**LEP's spicy hint at supersymmetry**

**Publications with SUSY in title**

Year	Publications with SUSY in title
1991	120
1992	160
1993	200
1994	220
1995	260
1996	350
1997	400

**UNIFICATION OF COUPLINGS**

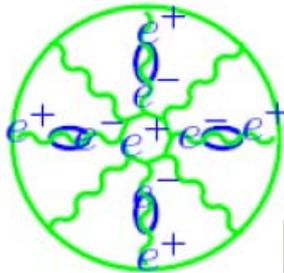
Recent high-precision experimental results support the predictions of the minimal supersymmetric SU(5) model that unifies electromagnetism and the weak and strong interactions.

Savas Dimopoulos, Stuart A. Raby and Frank Wilczek

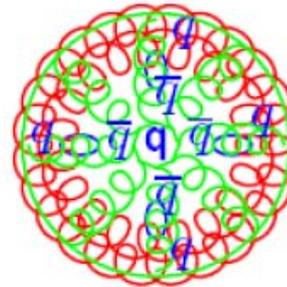
Amidst attempts to obtain a unified description of all the interactions of nature have so far been more notable for their ingenuity, beauty and elegance than for any help they have afforded toward understanding concrete facts about the physical world. In this article we wish to overcome one glaring exception: how ideas about the unification of the strong, weak and electromagnetic interactions lead to concrete, quantitative predictions.

To make a very long story short, it was the common mechanism underlying all three of the forces. Each is mediated by the exchange of particles, gauge bosons. The gauge bosons have names in the three cases. They are called color for the strong interaction, photons in the electroweak interaction, and W and Z bosons in the weak interaction. But despite the difference in names and in

# Running Coupling Constants



Electric Charge



Colour Charge

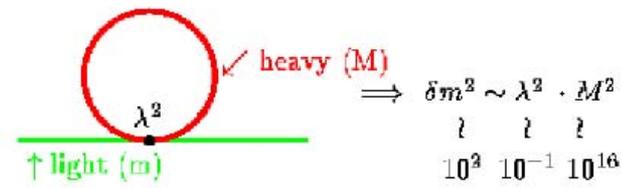
Quantum Fluctuations around “pointlike” charge create energy-dependent (running) “effective” charge.  
(Allowed by Einstein ( $E=mc^2$ ) and Heisenberg ( $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ ))

**QED:** Shielding of bare charge by  $f\bar{f}$  pairs.  
→ Reduced charge at large distance (or low energy.)  
At LEP  $\alpha(M_Z) = 1/128$  instead of  $1/137$  at low energy!

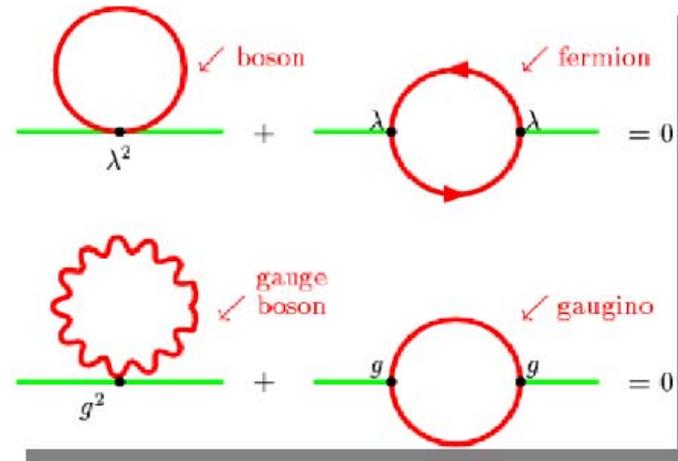
**QCD:** In contrast to photons, **GLUONS** carry (colour) charge **THEMSELVES!** → Not only splitting into  $q\bar{q}$  pairs, but into gluons as well → Gluons enhance charge → **Antishielding** (which dominates over shielding) → **opposite running!**  
At LEP  $\alpha_s(M_Z) = 0.12$  instead of  $\mathcal{O}(1)$  at the proton mass.

# Lösung des Hierarchieproblems

Zerstörung der Hierarchie durch radiative Korrekturen



Quadratische Terme fallen heraus



SUSY könnte die Ursache der Hierarchie mit Strahlungskorrekturen erklären.

Summenregel

$$\sum_{\text{Bosonen}} m^2 = \sum_{\text{Fermionen}} m^2$$

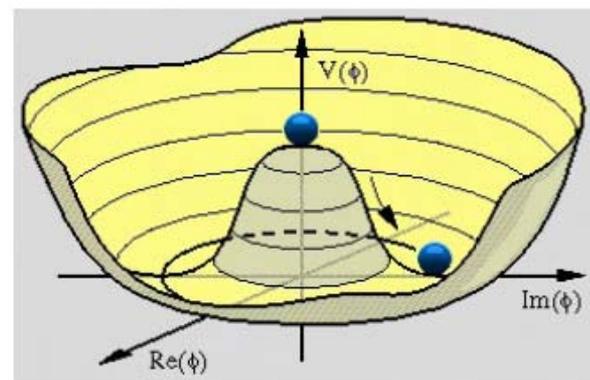
gilt exakt für ungebrochene Supersymmetrie

## STANDARDMODELL

- 1 komplexes Higgs Duplett (4 Komponenten)  
1 Vakuumerwartungswert  $v$
- 3 massive Eichbosonen ( $W^+ / W^- / Z^0$ )  
1 mögliche Anregung übrig  
1 neutrales Higgs Boson

## SUPERSYMMETRIE

- 2 komplexe Higgs Dupletts (8 Komponenten)
- 3 massive Eichbosonen
- 5 mögliche Anregungszustände übrig
  - 3 neutrale Higgs Bosonen:  $h/H/A$
  - 2 geladene Higgs Bosonen:  $H^+ / H^-$
- In niedrigster Ordnung 2 Parameter  $\tan \beta = v_2/v_1$   
und  $m_A$



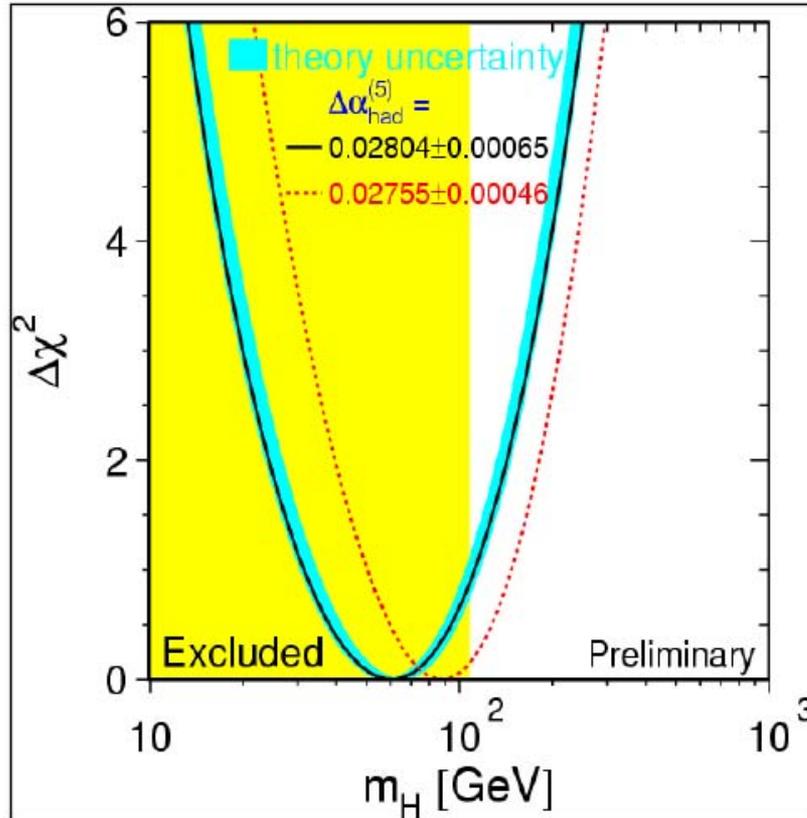
## Neutralino ist meistens LSP

Leichteste SUSY Teilchen ist meistens das Neutralino.  
Die 4 Neutralinos sind Mischungen aus den zwei neutralen Eichbosonen der  $SU(2) \times U(1)$  Gruppe und zwei neutralen Higgsinos (alle  $S=1/2$ ).

$$\begin{bmatrix} \tilde{\chi}_1^0 \\ \tilde{\chi}_2^0 \\ \tilde{\chi}_3^0 \\ \tilde{\chi}_4^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ \text{Massen-} & & & \\ \text{Mischungs-} & & & \\ \text{Matrize} & & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{B}^0 \\ \tilde{W}^3 \\ \tilde{H}_1^0 \\ \tilde{H}_2^0 \end{bmatrix}$$

Leichteste Neutralino hat großen Bino-Anteil, .d.h. Eigenschaften eines  $S=1/2$  Photons

## The Higgs Mass Limit



- Indirect limit from radiative corrections
- Direct limit from Higgs non-observation at LEP II (CERN)

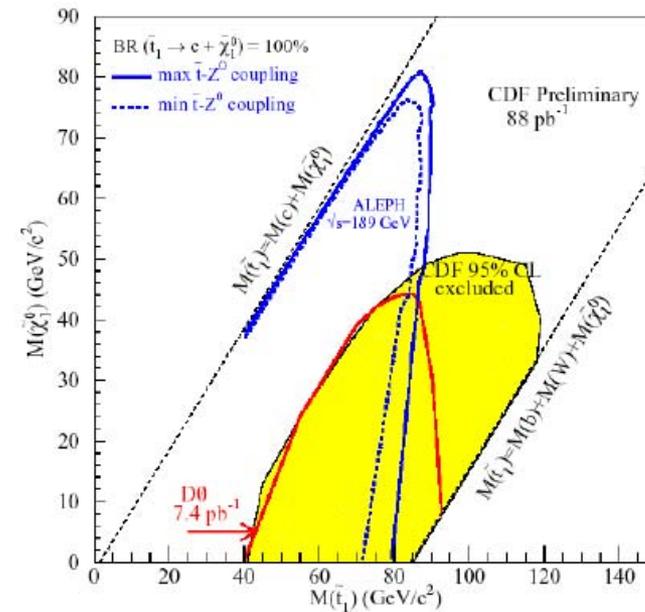
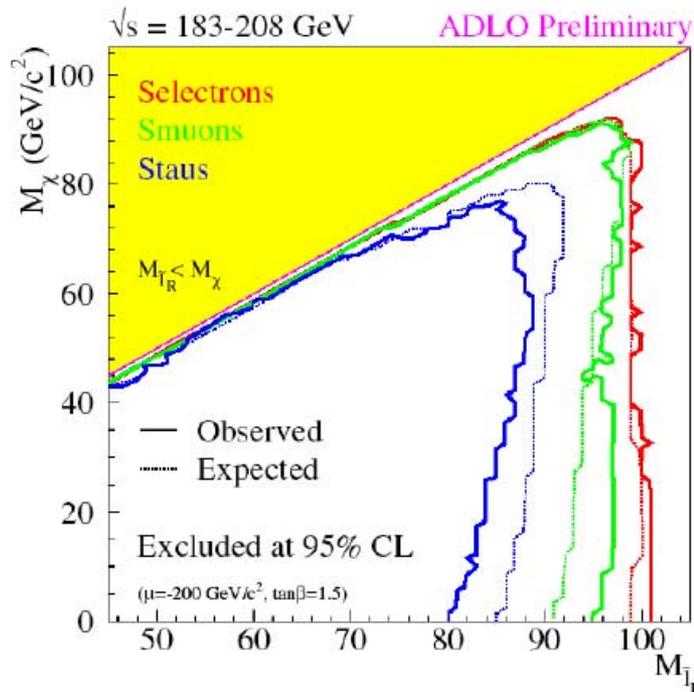
$$113 < m_H < 200 \text{ GeV}$$

At 95 % C.L.

SUSY Vorhersage: leichteste Higgs < 130 GeV!

# Supersymmetrie: direkte Suche

- kanonische Analyse: Suche nach fehlender Energie (entkommendes LSP) in hochenergetischen Teilchenreaktionen.
- signifikanteste Ausschlussgrenzen vom Tevatron und von LEP.
- Grenzen hängen in komplizierter Weise von Annahmen vieler SUSY-Parameter ab.



# Supersymmetrie: direkte Suche

**Table 1:** Lower limits on supersymmetric particle masses. 'GMSB' refers to models with gauge-mediated supersymmetry breaking, and 'RPV' refers to models allowing  $R$ -parity violation.

particle		Condition	Lower limit (GeV/ $c^2$ )	Source
$\tilde{\chi}_1^\pm$	gaugino	$M_{\tilde{\nu}} > 500 \text{ GeV}/c^2$	94	LEP 2
		$M_{\tilde{\nu}} > M_{\tilde{\chi}_1^\pm}$	75	LEP 2
		any $M_{\tilde{\nu}}$	45	$Z$ width
	Higgsino	$M_2 < 1 \text{ TeV}/c^2$	89	LEP 2
	GMSB		150	$D\bar{O}$ isolated photons
	RPV	$L\bar{L}\bar{E}$ worst case	87	LEP 2
$LQ\bar{D}$ $m_0 > 500 \text{ GeV}/c^2$		88	LEP 2	
$\tilde{\chi}_1^0$	indirect	any $\tan\beta$ , $M_{\tilde{\nu}} > 500 \text{ GeV}/c^2$	33	LEP 2
		any $\tan\beta$ , any $m_0$	32	LEP 2
	GMSB		83	$D\bar{O}$ and LEP 2
	RPV	$L\bar{L}\bar{E}$ worst case	23	LEP 2
$\tilde{e}_R$	$e\tilde{\chi}_1^0$	$\Delta M > 10 \text{ GeV}/c^2$	89	LEP 2 combined
$\tilde{\mu}_R$	$\mu\tilde{\chi}_1^0$	$\Delta M > 10 \text{ GeV}/c^2$	84	LEP 2 combined
$\tilde{\tau}_R$	$\tau\tilde{\chi}_1^0$	$M_{\tilde{\chi}_1^0} < 20 \text{ GeV}/c^2$	71	LEP 2
$\tilde{\nu}$			43	$Z$ width
$\tilde{\mu}_R, \tilde{\tau}_R$	stable		71	LEP 2 combined
$\tilde{t}_1$	$c\tilde{\chi}_1^0$	any $\theta_{\text{mix}}$ , $\Delta M > 10 \text{ GeV}/c^2$	87	LEP 2 combined
		any $\theta_{\text{mix}}$ , $M_{\tilde{\chi}_1^0} < \frac{1}{2}M_{\tilde{\tau}}$	88	$D\bar{O}$
	$b\bar{t}\tilde{\nu}$	any $\theta_{\text{mix}}$ , $\Delta M > 7 \text{ GeV}/c^2$	90	LEP 2 combined
$\tilde{g}$	any $M_{\tilde{q}}$		190	$D\bar{O}$ jets+ $\cancel{E}_T$
			180	CDF dileptons
$\tilde{q}$	$M_{\tilde{q}} = M_{\tilde{g}}$		260	$D\bar{O}$ jets+ $\cancel{E}_T$
			230	CDF dileptons

Quelle: review of particle properties 2001:  
<http://pdg.lbl.gov>

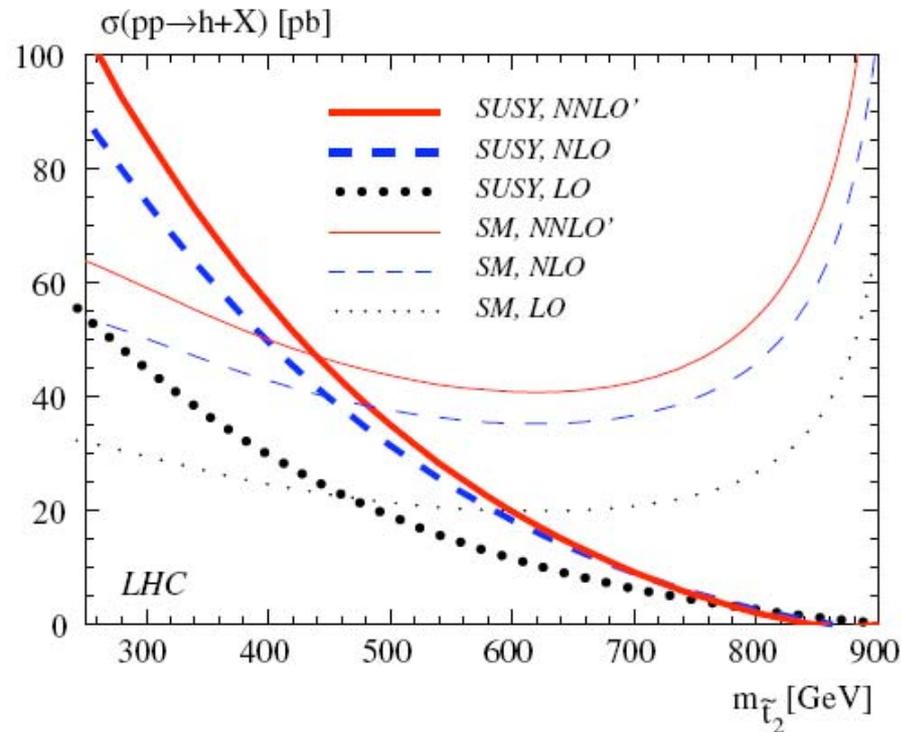


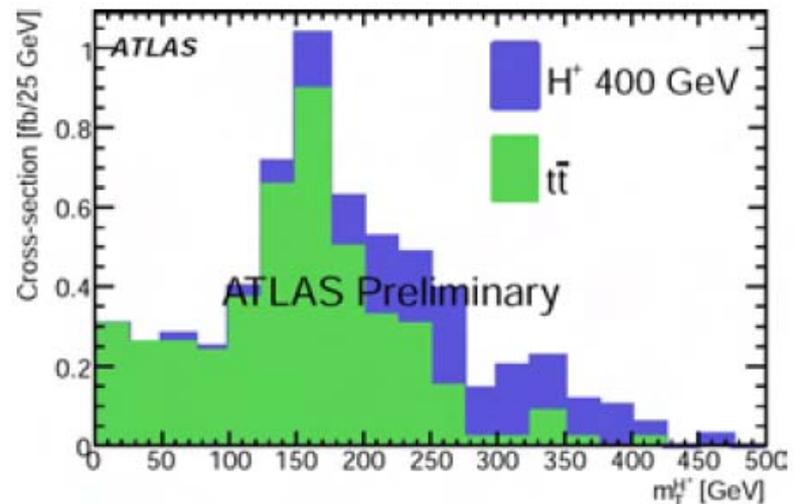
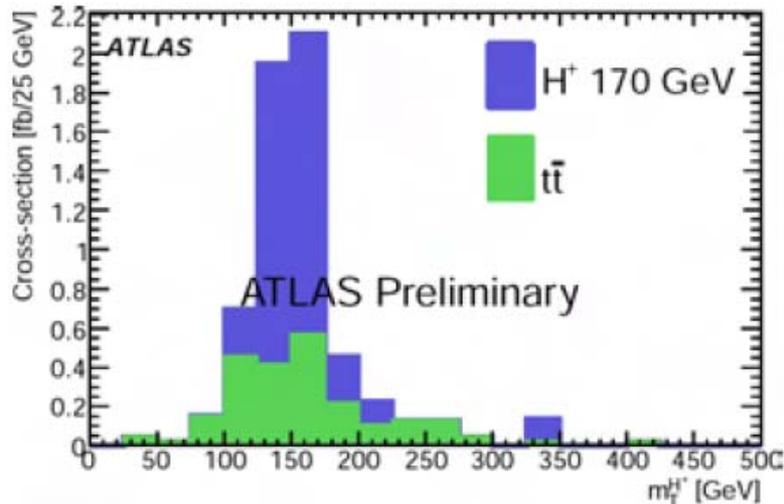
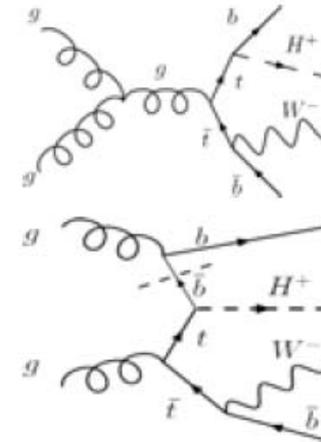
Figure 17. Thick lines: gluon-fusion cross section in the MSSM (for details, see [143, 144]). The thin lines show the result when the squark effects are neglected.

**In SUSY: Higgs Produktion mit Bottom Quarks kann signifikanten Beitrag zu gesamtem Higgs-Produktions Wirkungsquerschnitt leisten – kann Sogar die Komponente der Gluon-Verschmelzung übersteigen**

# Suche nach geladenen Higgs Bosonen

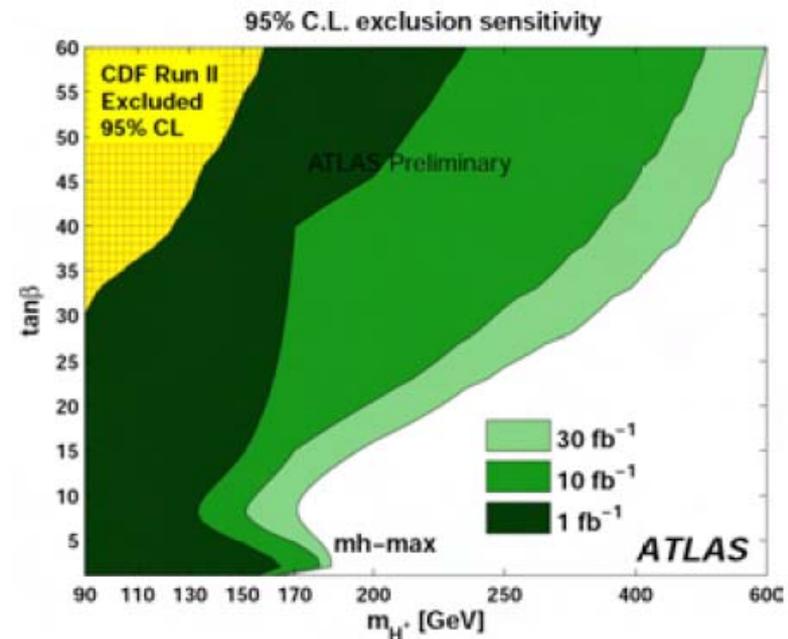
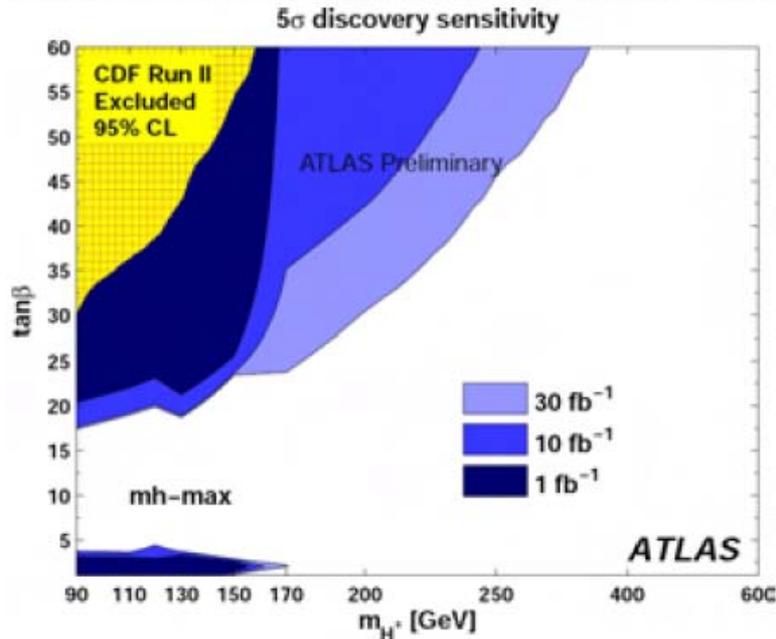
## PRODUKTION UND ZERFALL GELADENER HIGGS BOSONEN

- für  $m_{H^\pm} < m_t$ 
  - Produktion:  $gg \rightarrow t\bar{t} \rightarrow bWbH^\pm$
  - Zerfall: dominant in  $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$
- für  $m_{H^\pm} > m_t$ 
  - Produktion zusätzlich  $bg \rightarrow tH^\pm \rightarrow bWH^\pm$
  - Zerfall: dominant in  $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$



# Suche nach geladenen Higgs Bosonen

## SENSITIVITÄT FÜR GELADENE HIGGS BOSONEN

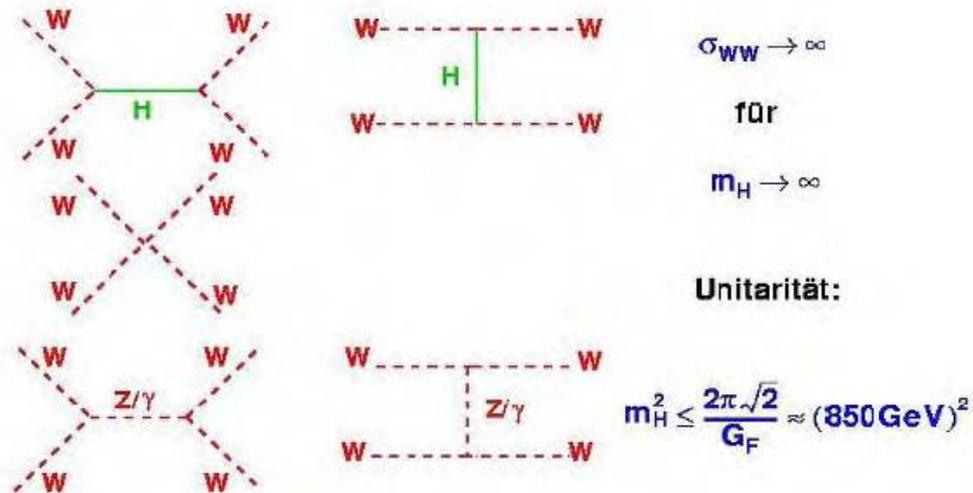


- Für  $m_{H^\pm} \leq m_t$ :
  - Wird am LHC entdeckt werden wenn es existiert.
  - Abhängig von Masse und  $\tan \beta$ , evtl. großer Datensatz notwendig
- Für  $m_{H^\pm} \geq m_t$ :
  - Entdeckung nur für große  $\tan \beta$  möglich

# Massenmechanismus ohne Higgs Boson

(J.Schumacher, M.Kobel, WM)

STANDARDMODELL OHNE HIGGS BOSON VERLETZT 'WAHRSCHEINLICHKEIT < 1'



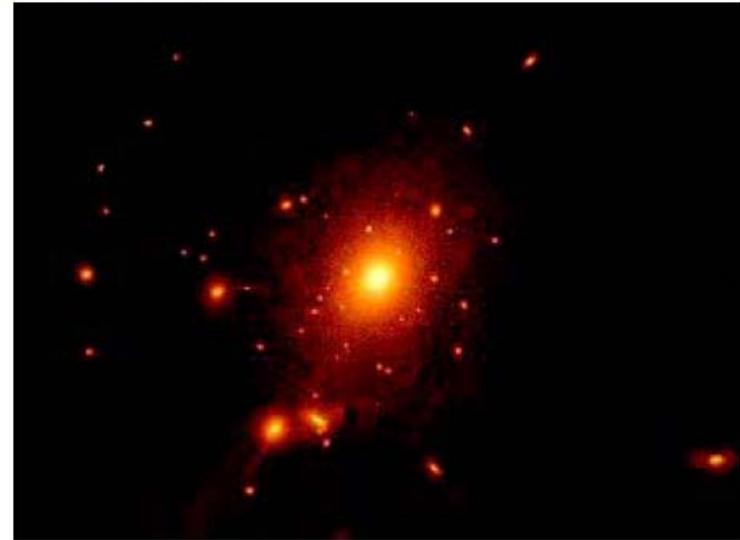
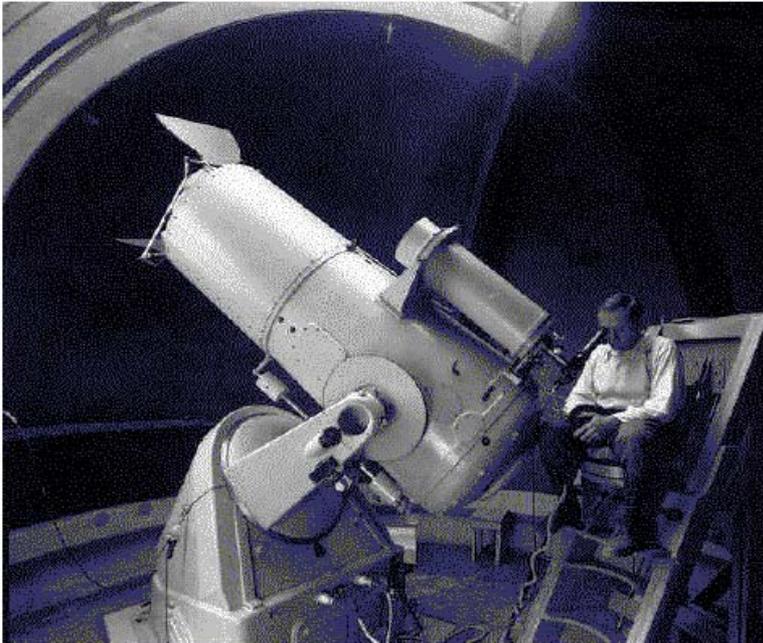
- Higgs Boson wird am LHC gefunden, wenn es existiert
- Wenn nicht: LHC muss alternativen Mechanismus finden



SUCHE NACH MASSENMECHANISMUS WIRD IN WENIGEN JAHREN ENDEN

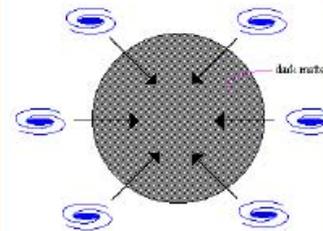
- Präzise Vermessung beginnt jedoch erst danach (LHC+ILC)

# Entdeckung der DM in 1933 Zwicky, Fritz (1898-1974)



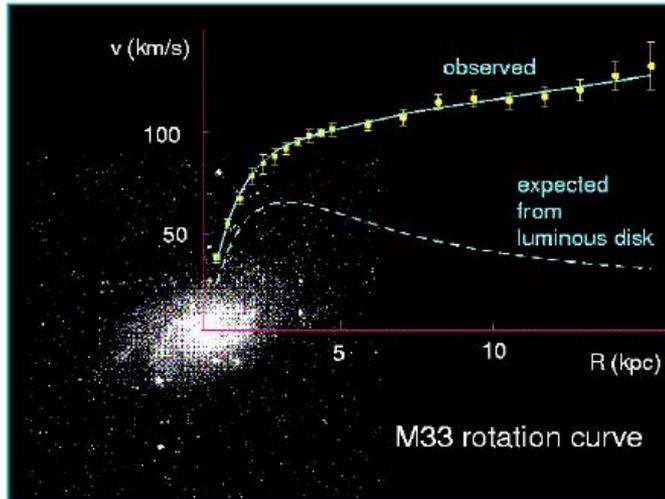
Center of the Coma Cluster by  
Hubble space telescope ©Dubinski

Zwicky bemerkt 1933 in USA, dass äussere Galaxien im Coma Cluster sich zu schnell bewegen um nur durch die sichtbare Materie angezogen zu werden. Er postuliert 90 % der Materie ist dunkle Materie



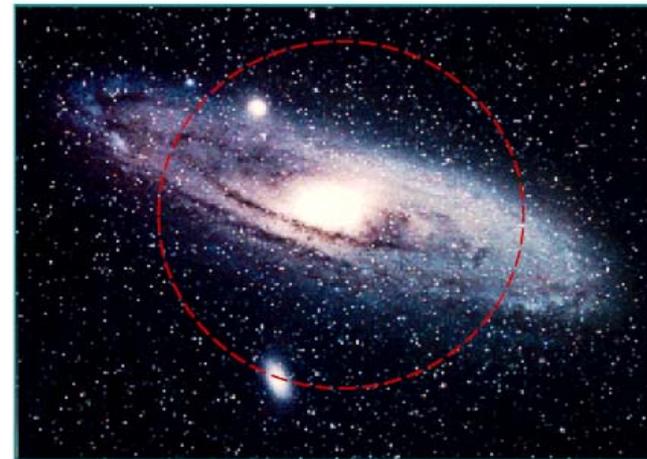
DM gibt stärkere Anziehung bei großen Abständen -> Galaxien mit hohen Geschwindigkeiten immer noch gebunden

# Dunkle Materie im Universum



Spiralgalaxien bestehen aus einem zentralen Klumpen und einer sehr dünnen Scheibe leuchtender Materie, welche von einem nahezu sphärischen, sehr ausgedehnten Halo umgeben ist.

Die Rotationskurven von Spiralgalaxien sind weitgehend flach, während die leuchtende Materie eine abfallende Kurve erwarten lässt.  
Erklärung: dunkle Materie.



## Neutralino ist perfekter Kandidat für DM

---

Dies ist perfekter DM Kandidat, denn

- i) neutral
- ii) schwach wechselwirkend  
(kein Photon- Gluon- oder W-Austausch wegen fehlender elektr. -,  
Farb- und schwache Ladung, daher nur Z- und Higgsaustausch in elast. Streuung  
an Materie)
- iii) nur elast. Streuung an Materie wegen R-Parität
- iv) Selbst-Annihilation möglich. Annihilationswirkungsquerschnitt bekannt aus  
Kosmologie, elast. WQ extrem klein (mindestens 10 Größenordnungen kleiner als  
Annihilations-WQ aus direkter Suche nach DM)

**Diese Tatsachen stimmen perfekt für Neutralino!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!**

# Zum Mitnehmen

## Notwendigkeit für Physik außerhalb des SMs

- SM erklärt nur 5% der Energie des Universums
- SM erklärt nicht, warum es keine Antimaterie gibt
- SM erklärt nicht, warum es vier sehr unterschiedliche Kräfte gibt
- SM hat viele ad hoc Parameter (Massen, Mischungsmatrizen, Kopplungen,..)
- SM erklärt die Massen der Teilchen mit dem HIGGS MECHANISMUS. Jedoch noch keine Higgs Teilchen gefunden und ad hoc SSB
- SM hat quadratische Divergenzen bei hohen Energien

## Zauberwort Supersymmetrie

GUTs geben gute Ansätze zur Lösung dieser Probleme

SUPERSYMMETRIE ist die einfachste (einzige?) Erweiterung des SMs, die gleichzeitig eine GUT bildet, den Higgs Mechanismus voraussagt, die quad. Divergenzen im SM beseitigt, Möglichkeiten zur Baryonasymmetrie und einen Kandidaten für die DM bietet

LHC bietet gute Chancen die Supersymmetrie zu entdecken! Sie könnten dabei sein!

The image features a dark blue background with a complex, abstract network of white lines. A central, prominent feature is a dense, circular structure composed of red lines, resembling a complex web or a multi-layered sphere. This red structure is surrounded by a vast, intricate network of white lines that form a web-like pattern, extending towards the edges of the frame. The overall appearance is that of a complex, interconnected system, possibly representing a theoretical model in physics or mathematics. The text is overlaid on a semi-transparent red rectangular area in the center of the image.

Jenseits des Standardmodells  
Extra Dimensionen



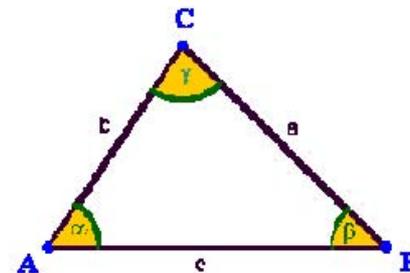
# Euklidische Geometrie

- Euklid, griechischer Mathematiker, ca 365 bis 300 v.Chr.
- Begründet zum ersten Mal axiomatisch die Geometrie.
- In einem Euklidischen Vektorraum sind die einzelnen Dimensionen über das euklidische Skalarprodukt mit einander verknüpft.

$$\vec{x} \cdot \vec{y} = |\vec{x}| |\vec{y}| \cos \angle (\vec{x}, \vec{y})$$

- Die Anzahl der Dimensionen beträgt aufgrund offensichtlicher Beobachtungen 3.
- Der Raum ist dank dem Parallelaxiom nicht gekrümmt.

**Zwei Geraden heißen dabei parallel, wenn sie in einer Ebene liegen und keinen gemeinsamen Punkt haben.**  
( Die Winkelsumme im Dreieck beträgt  $180^\circ$  )



# Die Spezielle Relativitätstheorie

Einsteins Vereinigung der 3 Raumdimensionen mit der Zeit führte zur 4 dimensionalen **Raumzeit**.

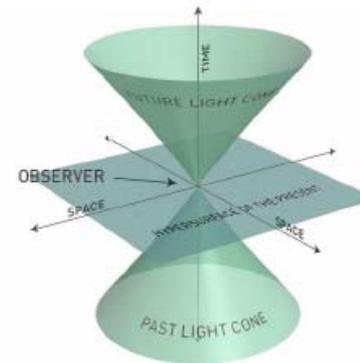
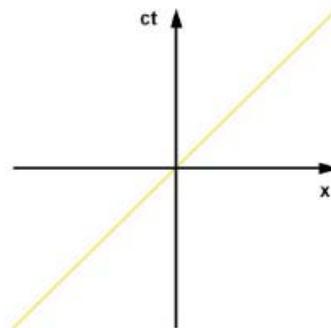
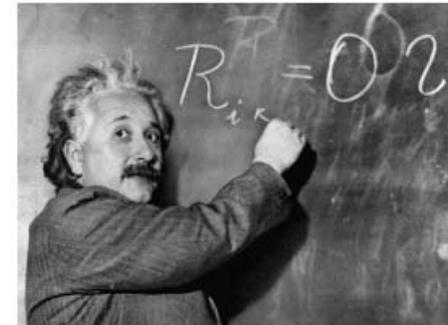
In der speziellen Relativitätstheorie (SRT) werden die dreidimensionalen Raumkoordinaten  $(x,y,z)$  um eine Zeitkomponente  $ct$  zu einem **Vierervektor** erweitert, also  $(ct,x,y,z)$ .

Ein Punkt in der Raumzeit besitzt drei Raumkoordinaten sowie eine Zeitkoordinate und wird als **Ereignis** bezeichnet.

Für Ereignisse wird ein raum-zeitlicher Abstand definiert :

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2.$$

Im **Minkowski-Diagramm** wird nur 1 (oder 2) Raumdimension auf der X-Achse ( und Z-Achse ) betrachtet, ergänzt durch die Zeitkoordinate auf der Y-Achse.



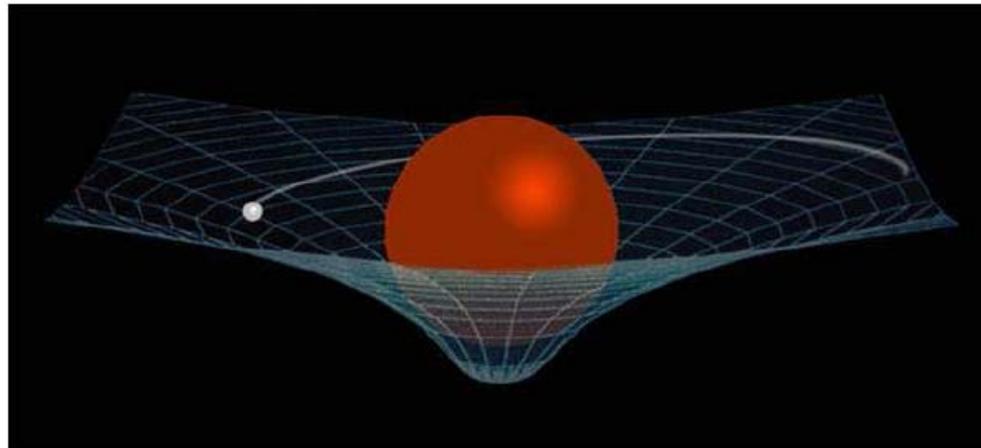
# Die Allgemeine Relativitätstheorie

Geschaffen als Theorie für die Gravitation, beschreibt sie die Wechselwirkung zwischen Energie einerseits und der Raumzeit andererseits. Die Einstein'schen Feldgleichungen beschreiben hierbei die Art und Weise wie die Raumzeit durch die enthaltene Energie gekrümmt wird.

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

## *Einstein'sche Feldgleichungen*

Dabei ist  $R_{\mu\nu}$  der Ricci-Krümmungstensor,  $R$  der Ricci-Krümmungsskalar,  $g_{\mu\nu}$  der metrische Tensor,  $\Lambda$  die kosmologische Konstante,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $G$  die Gravitationskonstante und  $T_{\mu\nu}$  der Energie-Impuls-Tensor.

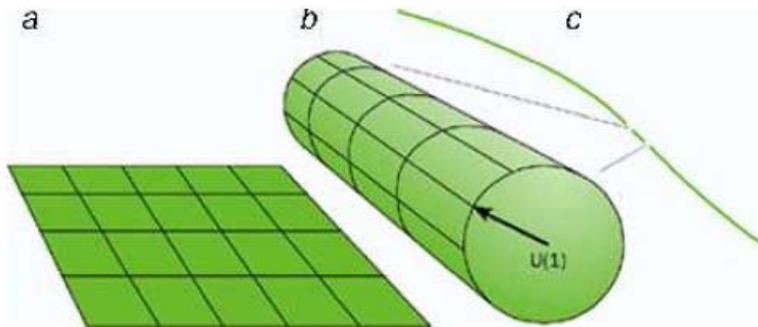


Die ART ist experimentell sehr genau bestätigt.

# Die Kaluza-Klein-Theorie

1921 stellte Kaluza eine **5-dimensionale** Theorie vor, die den Elektromagnetismus und die Gravitation einheitlich erklären sollte.

Aus Symmetriegründen war es nötig, eine vierte Raumdimension einzuführen. Da man diese aber in der Wirklichkeit nicht sieht, schlug Klein vor, die zusätzliche Dimension sei **kompaktifiziert**, aufgerollt sozusagen.



Theodor Kaluza



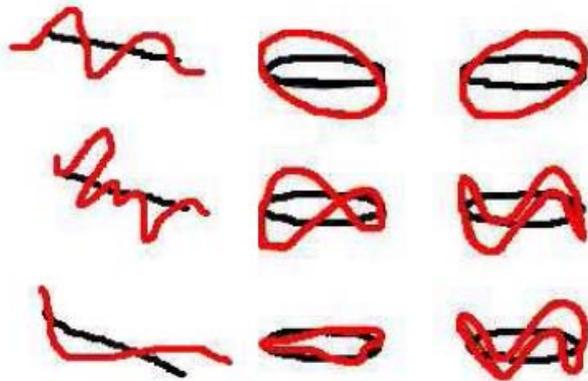
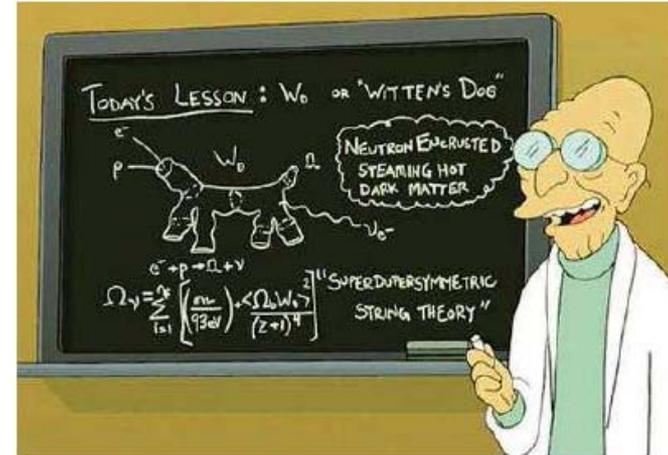
Oskar Klein

Da die Theorie aber nicht erklären konnte, warum die Gravitation so viel schwächer war als der Elektromagnetismus, und weil sie nicht zu der immer populärer werdenden Quantenmechanik passte, geriet sie bald in Vergessenheit.

# Die Ursprünge der String-Theorie

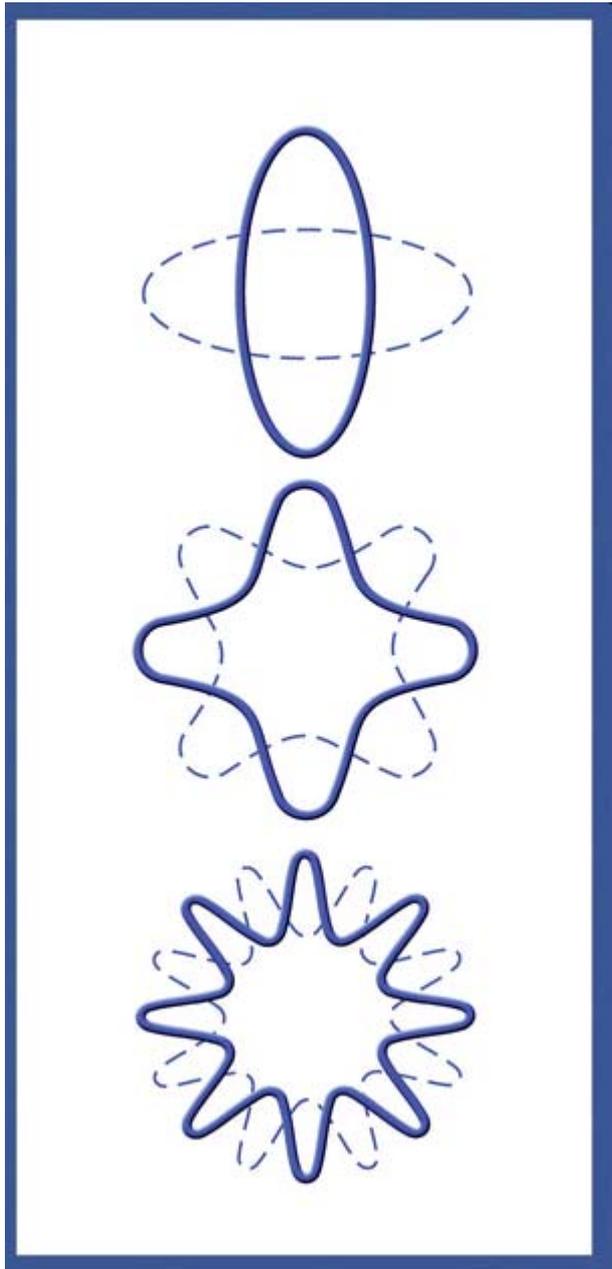
Auf der Suche nach einer vereinheitlichten Theorie von Gravitation und Quantenfeldtheorie, kam den Forschern erstmals in den 60er und 70er Jahren die Stringtheorie in den Sinn.

Die fundamentalen Bausteine sind hierbei keine Punktteilchen ( null-dimensionale Objekte), sondern Fäden ( ein-dimensionale Objekte ), die man als **Strings** bezeichnet. Auch mehrdimensionale Objekte wären möglich, die man als **Branes** bezeichnet.



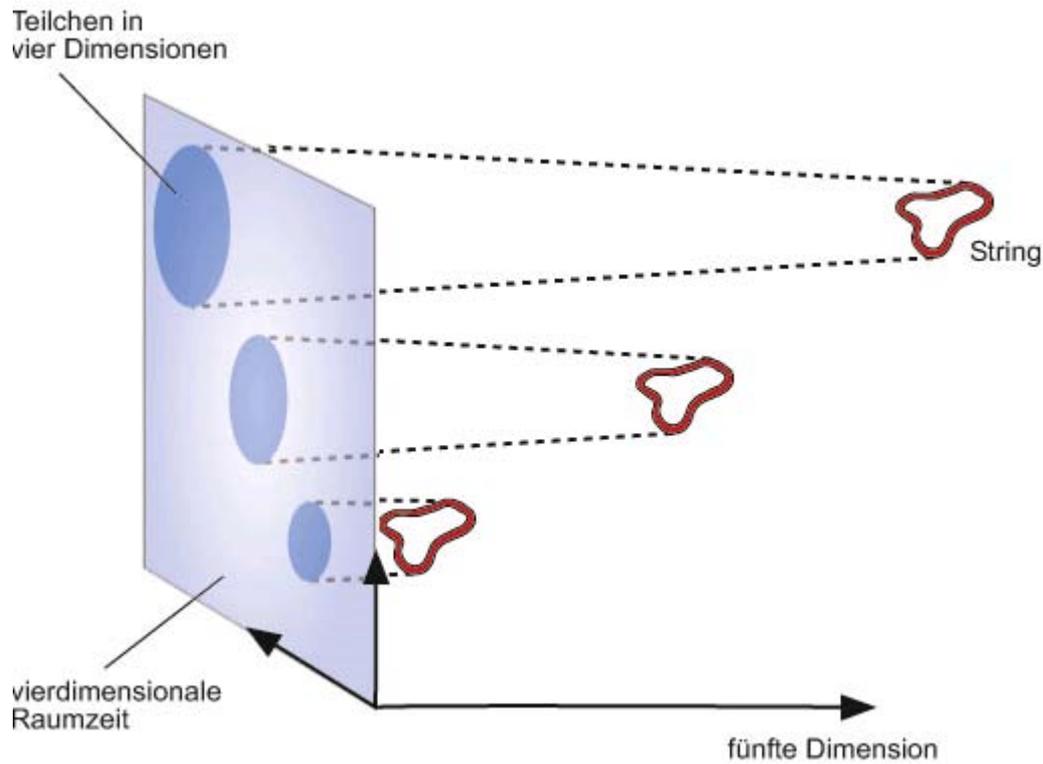
Diese Strings können offen sein ( Anfang & Ende ) oder geschlossen ( Kreis ) und schwingen.

Die verschiedenen Anregungszustände dieser Schwingungen werden als die uns bekannten Elementarteilchen interpretiert.



In der Stringtheorie werden die Teilchen nicht mehr als punktförmige Objekte, sondern als winzige Fäden oder Saiten - so genannte Strings - angesehen, die in charakteristischen Mustern schwingen können. Die verschiedenen Schwingungszustände entsprechen den verschiedenen Teilchen.

**Welt der Physik**



Eine ganz neue Sichtweise: Teilchen in unserer vierdimensionalen Raumzeit sind das holographische Abbild einer fünfdimensionalen Welt aus Strings. Hologramm und Urbild enthalten im Prinzip die gleiche Information, kodieren diese aber in sehr verschiedener Weise.

**Welt der Physik**

# Verschiedene Varianten der Stringtheorie

Es existieren 5 verschiedene Stringtheorien

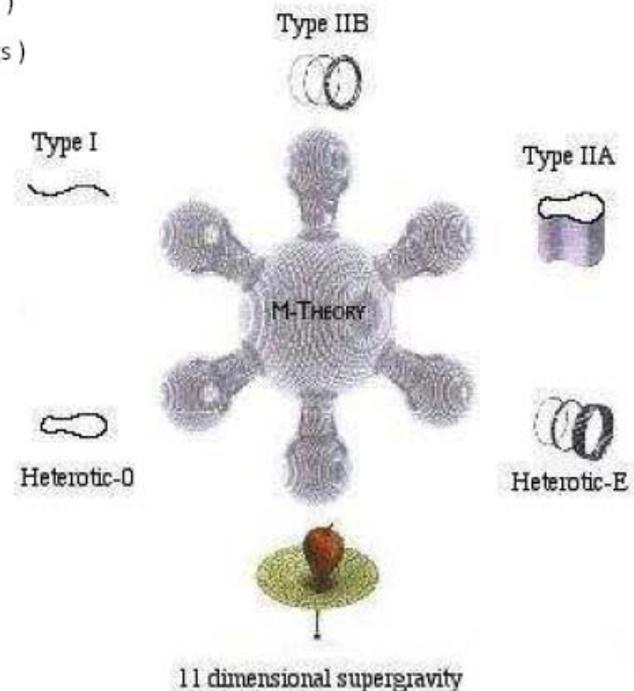
- Die **Typ-I** Stringtheorie ( mit offenen & geschlossenen Strings )
- **Typ-IIA/B** Stringtheorien ( nur mit geschlossenen Strings )
- 2 **heterotische** Stringtheorien ( nur geschlossene Strings )

Später fand man heraus, dass möglicherweise all diese ( und die Theorie der 11-dim Supergrav. ) nur Grenzfälle einer übergeordneten Theorie sind, die man als **M-Theorie** bezeichnet.

Die einzelnen Theorien sind hierbei über **Dualitäten** mit einander verknüpft ( S-Dualität und T-Dualität )

Die M-Theorie wird auch manchmal als „**Theory of Everything**“ bezeichnet.

Die Theorie selber ist noch völlig unbekannt, sicher ist nur, sie benötigt sogar **11 Dimensionen**.



# Stringtheorien und zusätzliche Dimensionen

- Zusätzliche Raumdimensionen wurden bislang nicht beobachtet => mögliche **Kompaktifizierung**
- **Abschätzung** für Auftreten von Abweichungen durch zusätzliche Dimensionen :

Schwarzschildradius  $\Leftrightarrow$  Compton Wellenlänge  $r_s = \frac{2GM}{c^2} \sim \lambda = \frac{h}{mc}$ ,

$\Rightarrow$  Planck-Masse  $m_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 1,2 \cdot 10^{19} \text{ GeV}/c^2$

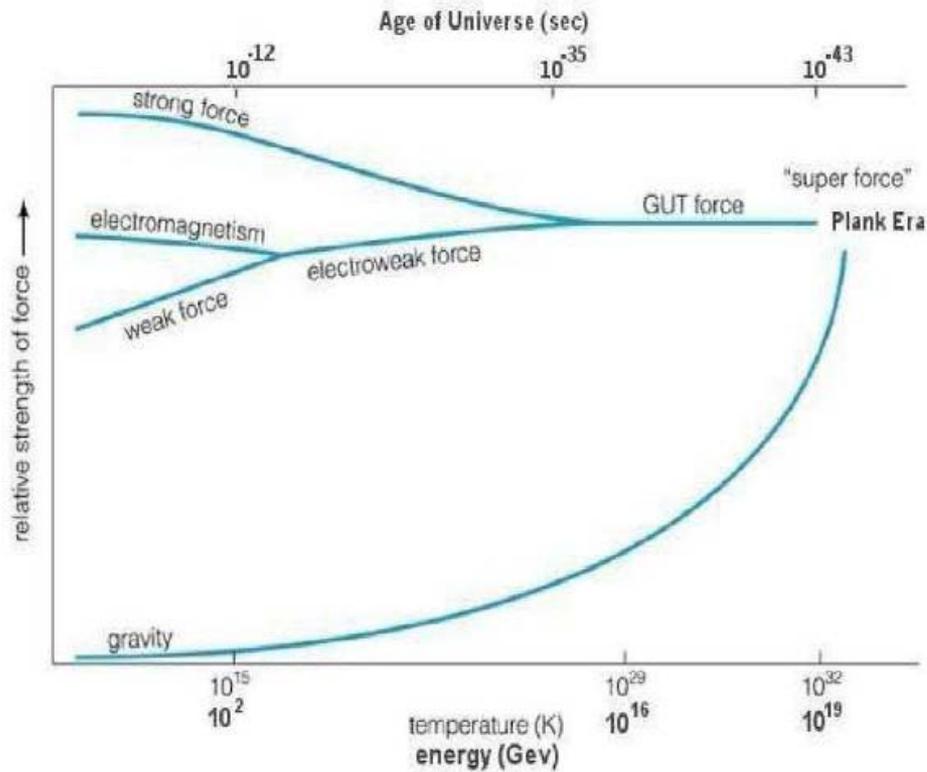
$\Rightarrow$  Planck-Länge  $l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$

Problem :

Für so hohe Energien bräuchte man nach gängiger Technik einen riesigen Beschleuniger.



# Das Hierarchie-Problem



Schwache Kraft : relative Stärke  $10^{-5}$

Gravitation : relative Stärke  $10^{-40}$

**Warum ist die  
Gravitation  
So schwach ?**

# „Große“ Extra Dimensionen ( LED's )

Mögliche Lösung für das Hierarchie Problem : **Große Extra Dimensionen**

Modifizierte Planck Skala  $\Rightarrow$  Mit LHC möglicherweise erreichbar.

$$R = \frac{1}{2\sqrt{\pi} m_f} \cdot \left( \frac{m_p}{m_f} \right)^{2/d}$$

Energie ab der Zusatzdimension spürbar sind  $m_f$   
Größe der zugehörigen Dimensionen  $R$   
Anzahl der zusätzlichen Dimensionen  $d$

Beispiel : neue Physik ab  $m_f = 1000 \text{ GeV}$  ( in näherer Zukunft überprüfbar )

$d = 1$	$\Rightarrow$	$R = 8 \cdot 10^{12} \text{ m}$
$d = 2$	$\Rightarrow$	$R = 7 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
$d = 3$	$\Rightarrow$	$R = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}$
$d = 4$	$\Rightarrow$	$R = 6 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

# Große Extra-Dimensionen

- Einführung von zusätzlichen Dimensionen, die auf Abständen unterhalb von 0.2 mm „aufgerollt“ sind, so ändert sich das Gravitationsgesetz bei diesen kurzen Abständen; bei den bisher experimentell überprüften Entfernungen oberhalb von 0.2 mm bleibt dagegen alles beim Alten; relativ große extra Dimensionen (groß bedeutet viel größer als die Planck-Länge von  $10^{-35}$  m, aber kleiner als 0.1mm)
- Schwere Objekte müssen unter Zuhilfenahme der großen Extra-Dimensionen nicht mehr dort zu sehen sein, wo die gravitierende Masse angesiedelt ist, da sich die Gravitonen in die LXD's ausbreiten können, Photonen jedoch nicht!!
- Damit würde zumindest ein Teil der Stringtherorien, nämlich der höher dimensional Rahmen, in dem sie sich bewegen, einer experimentellen Überprüfung an bestehenden oder geplanten Beschleunigern zugänglich
- Wenn die zusätzlichen Dimensionen so groß sind: Warum hat man sie bisher noch nicht gesehen?
  - Alle experimentell bisher untersuchten Teilchen sind weiterhin auf die üblichen drei Raumdimensionen beschränkt, ähnlich wie auf einer Wand oder Membran, die in die zusätzlichen Dimensionen eingebettet ist. Allein die Gravitonen – die hypothetischen Botenteilchen, welche die Schwerkraft übertragen – können sich frei in den Extra-Dimensionen bewegen. Die zusätzlichen Dimensionen machen sich ausschließlich über die Gravitationskraft bemerkbar.

# Das ADD Modell

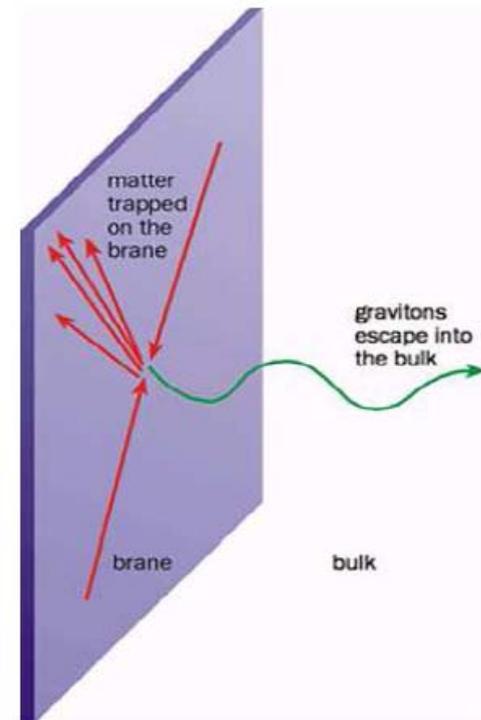
1999 Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos und Gia Dvali ( ADD Modell )

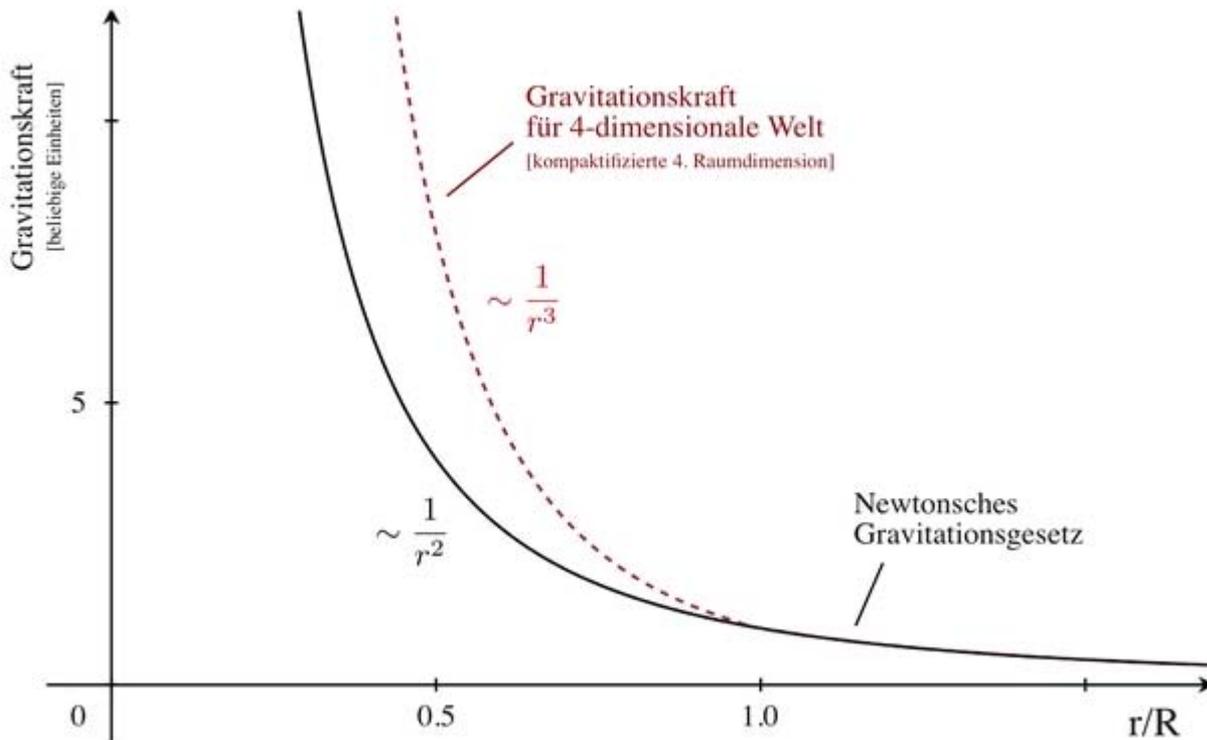


Zusätzliche Dimensionen sind zu Radius R zusammengerollt.

Gravitation kann sich in alle Dimensionen ausbreiten.  
Die restlichen Kräfte sind auf unsere 4 bekannten Dimensionen ( Untermannigfaltigkeit ) beschränkt.

=> **Gravitation erscheint uns schwach**

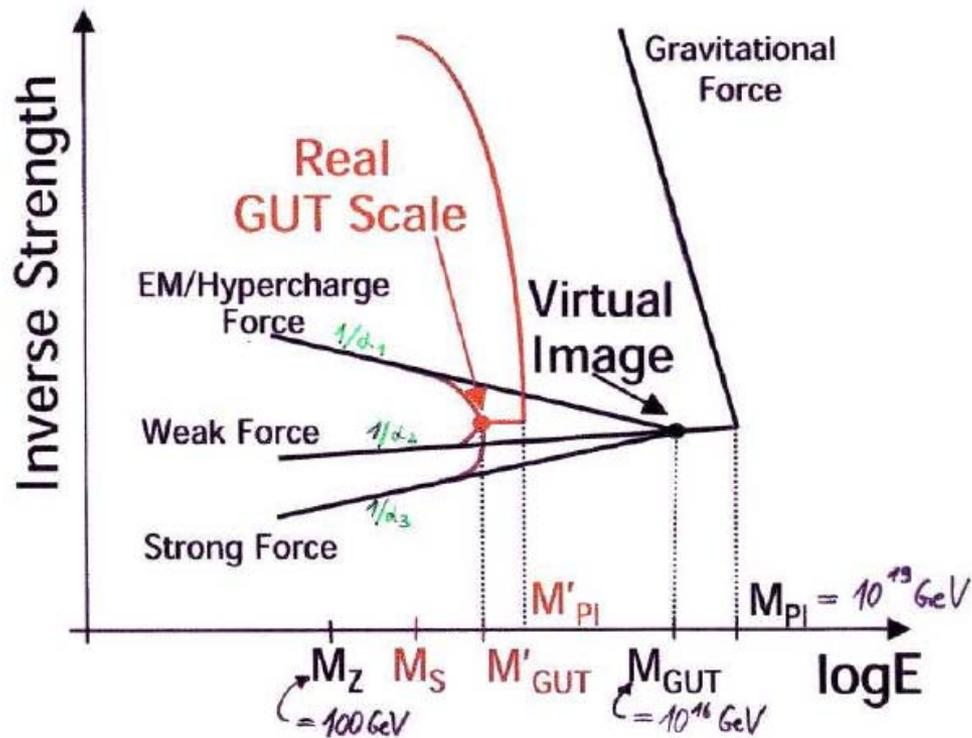




Vergleich des Newton'schen Gravitationsgesetzes in der dreidimensionalen Welt mit dem Verlauf der Gravitationskraft in einer Welt mit vier Raumdimensionen.  
Welt der Physik

# Lösung des Hierarchie Problems ?

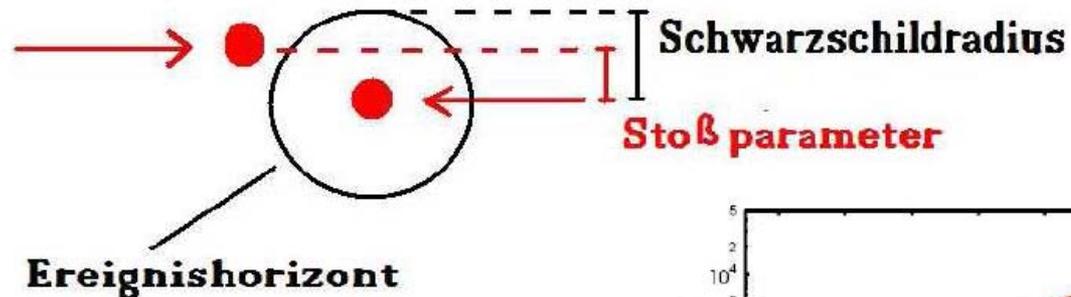
Die Gravitation wächst mit zunehmender Energie verstärkt an, sobald die zusätzlichen Dimensionen wirksam werden.



# Mini Schwarze Löcher

- Ein schwarzes Loch hat einen Radius (Schwarzschild Radius), der proportional seiner Masse ist – winzig!!
- Der Schwarzschild-Radius für Massen, wie sie in Beschleunigern erzeugt werden können, ist dermaßen klein, dass es illusorisch ist, diese Massen bis zu ihrem Schwarzschildradius zu fokussieren und zum Kollaps zu bringen ( $10^{19}$  GeV/c<sup>2</sup> und  $10^{-35}$ m)
- Aber: mit zusätzlichen Extra-Dimensionen ist der Schwarzschild Radius für Schwarze Löcher in einem Massebereich, der bald dem Experiment zugänglich sein wird, wesentlich größer als bisher !! So groß, das Schwarze Löcher an Beschleunigern erzeugt werden können! (Die Luft wiegt  $10^{15}$  Mal soviel ...)
- Dichte zu gering, als daß das Loch gefüttert werden und anwachsen könnte
- Hawking-Strahlung – Lebenszeit proportional zu Masse<sup>3</sup>
- Aber ...in Anwesenheit von Extra-Dimensionen wird das Schwarze Loch stabilisiert – überlebt länger ....

# Erzeugung Schwarzer Mini-Löcher



$$R_S = 2G_N(r) \cdot \frac{m}{c^2}$$

Bei einer neuen Planckmasse im Bereich von 1 TeV ist am LHC mit einer Produktion von  $10^8$  schwarzen Löcher pro Jahr zu rechnen.

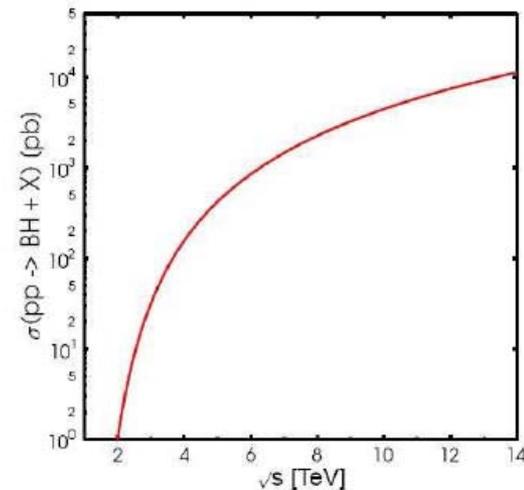
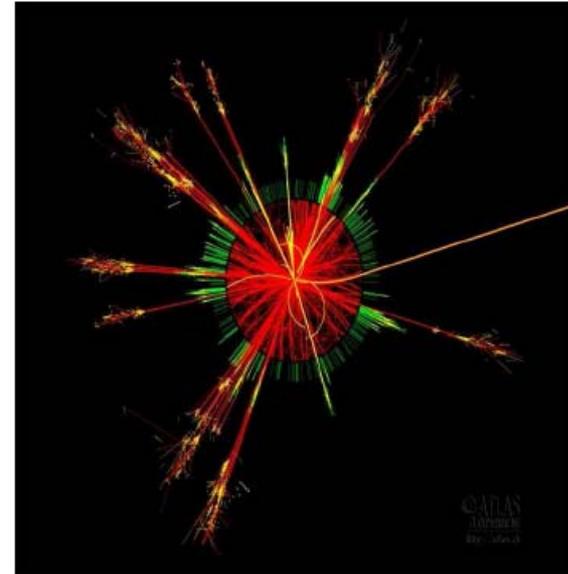
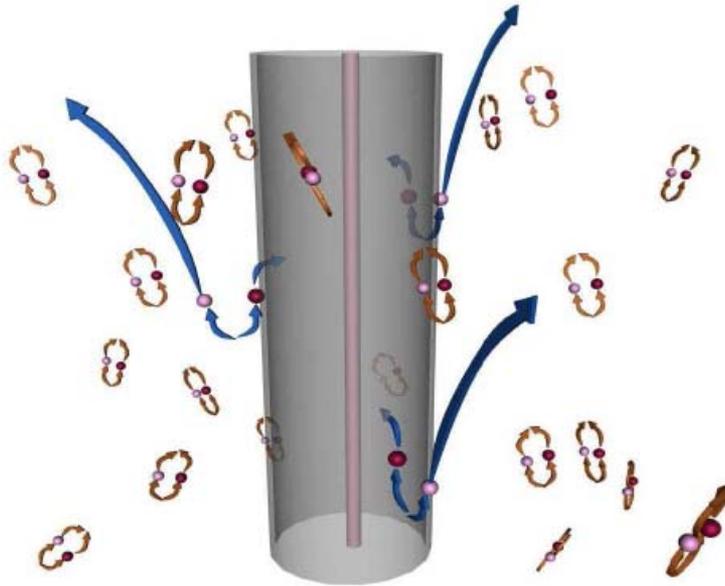


Abbildung 9.3: Der totale Wirkungsquerschnitt Schwarzer Löcher in Abhängigkeit von der Schwerpunktsenergie, hier dargestellt für  $d = 2$ . Die Kurven höher Dimensionenzahl differieren von der abgebildeten um weniger als einen Faktor 10.

# Zerfall der Schwarzen Mini-Löcher



Hawking-Strahlung : 
$$T_H = \frac{hc^3}{16\pi^2 k_B G M}$$

Neben Photonen könnten auch massive Teilchen wie Elektronen und Positronen abgestrahlt werden. Die Strahlung trägt vermutlich keine Information mehr über die ursprünglichen Teilchen.

## Abschließende Überlegungen

- Warum genau 3 ( bzw 4 ) makroskopische Dimensionen ?
- => **Anthropisches Prinzip**  
( Viele mögliche Universen ; wir leben in dem, das intelligentes Leben ermöglicht )





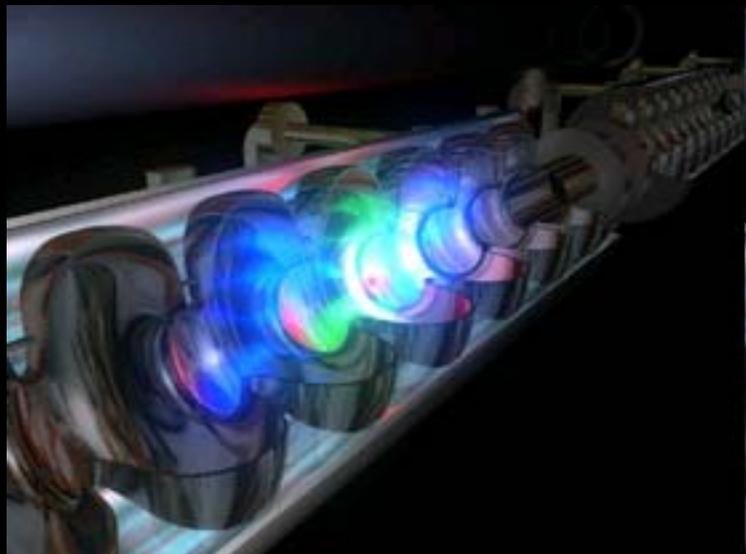
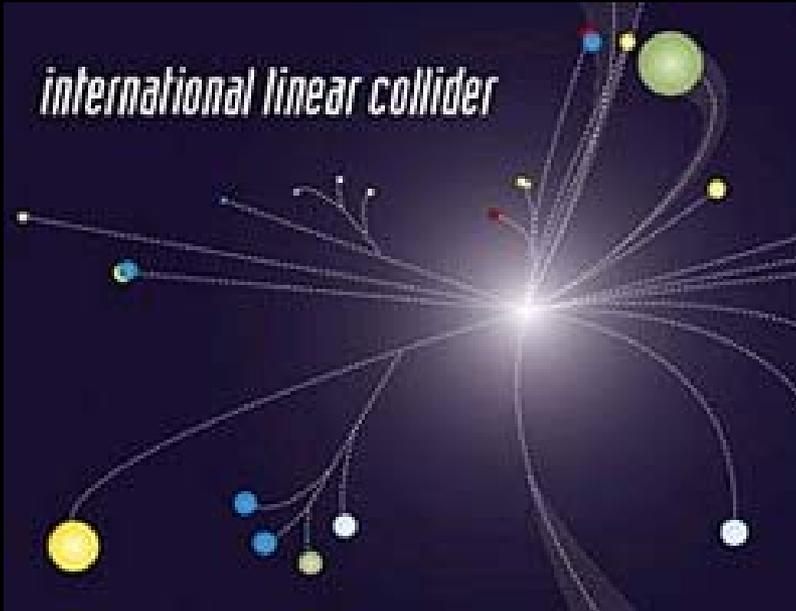


Die nächste  
Generation der  
Beschleuniger

# Warum ein weiterer Beschleuniger?

- LHC: beschleunigt Protonen, denen wegen großer Masse eine sehr hohe Energie mitgegeben werden kann – neue massereiche Teilchen entstehen – Entdeckermaschine
- aber: schwere Protonen bestehen aus Quarks – eine Vielzahl von Bruchstücken platzen beim Zusammenstoß nach allen seiten weg – schwer, die Eigenschaften der neu erzeugten Teilchen präzise zu messen
- ILC: punktförmige Elektronen stossen auf punktförmige Antiteilchen, neue Teilchen entstehen ohne Reste von Stoßpartnern – Ergebnis einfacher zu interpretieren
- ILC ist Präzisionsmaschine mit der man extrem genau die Eigenschaften der neuen Teilchen messen kann

*international linear collider*



# THE INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER

## GATEWAY TO TECHNOLOGY



16,000 superconducting cavities will drive the ILC's particle beams and could be a technology driver as well.

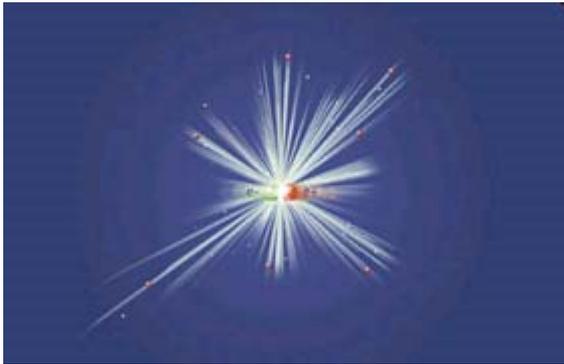
Humankind has always been driven by the desire to understand the world in which we live. The tools invented by scientists to gain this understanding in turn yield applications that benefit all of society and play a major role in the global economy.

Particle physics has been the source of many innovations not originally part of the quest for understanding the Universe. Many of these – medical diagnostics and therapy and the World-Wide Web are two striking examples – have changed the way we live and do business. Particle physicists continue their quest, and history tells us that the tools of the future should be the source of yet more technological breakthroughs, driving progress in industry and securing the workforce of the future. One of these tools is the proposed particle accelerator, the International Linear Collider or ILC.

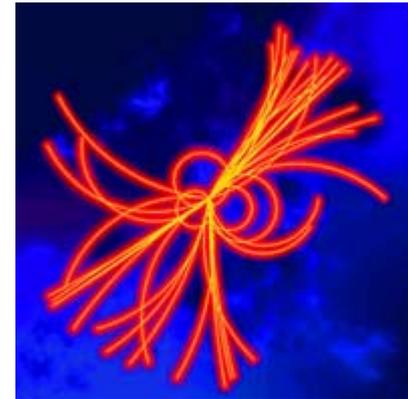
Using unprecedented technology, the 31-kilometre-long ILC will hurl electrons and their anti-particles, positrons, toward each other at nearly the speed of light to collide 14,000 times every second at energies of 500 billion electron-volts. With the ILC, discoveries are within reach that could stretch our imagination with new forms of matter, new forces of nature, new dimensions of space and time and bring into focus Albert Einstein's vision of an ultimate unified theory.

Fundamental research is not done with the aim to make computers even faster, chips even smaller or medicine even better. We cannot be sure where the research into nature's most fundamental constituents will take us, and likewise cannot be sure what beneficial innovations will emerge. However, the track record makes us confident that technological advances will occur, in one form or another.

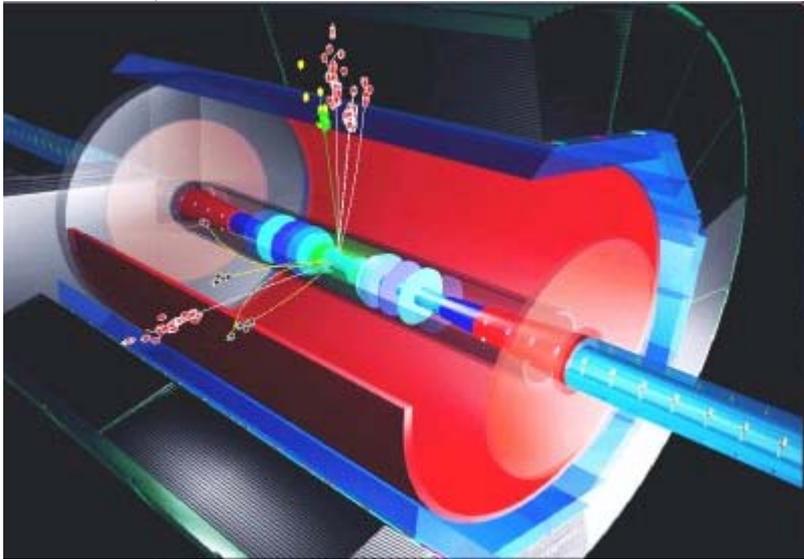
## The International Linear Collider – Gateway to the Quantum Universe



Im Internationalen Linearcollider ILC sollen Elektronen mit Höchstgeschwindigkeit auf Positronen prallen. Beide zerstrahlen zu reiner Energie, aus der neue Teilchen entstehen können.



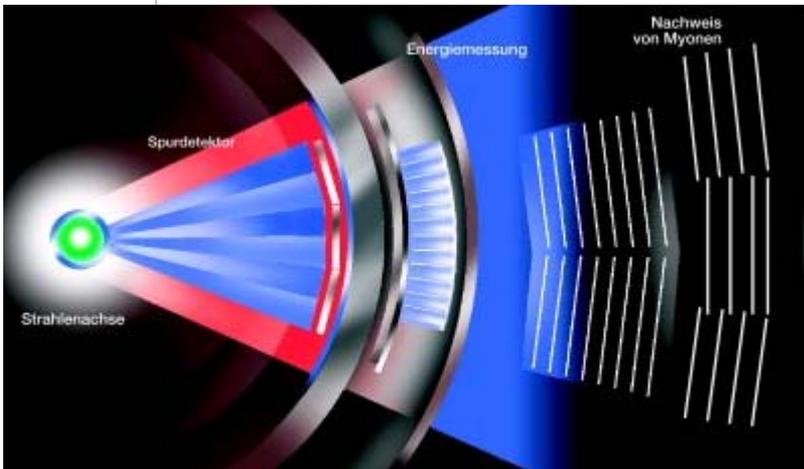
Computersimulation des Zerfalls eines Higgs-Teilchens im Detektor: Der Internationale Linearcollider ILC ist eine wahre "Fabrik" von Higgs-Teilchen und erlaubt Präzisionsmessungen, die es ermöglichen, die Rolle der Higgs-Teilchen in der Natur genau zu verstehen - oder eine alternative Erklärung für den Ursprung der Teilchenmassen zu finden.



Computersimulation einer Teilchenreaktion am geplanten Internationalen Linearcollider ILC:

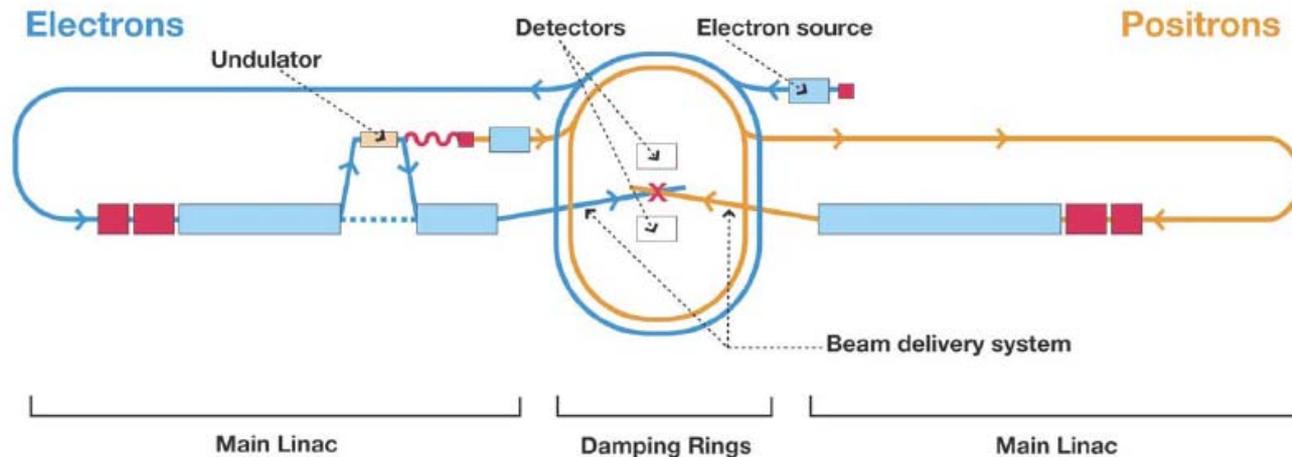
Die Elektronen und Positronen fliegen jeweils aus entgegengesetzter Richtung durch das Strahlrohr (blau) in den Detektor hinein und prallen in seinem Zentrum zusammen.

Die farbigen Spuren und Kreise symbolisieren die Folgen dieses "Kollisionsereignisses".



Schematischer Aufbau eines Detektors in der Teilchenphysik: Die haushohen Nachweisgeräte bestehen aus mehreren Schichten, in denen verschiedene Arten von Teilchen vermessen werden.

# What is the ILC?



- Two linear accelerators, shooting intense beams of electrons and positrons, into head-on-head collisions. 30 km long; same size as LHC ...
  - ◆ Initial phase 500 GeV, upgradeable to 1 TeV

# Why is it linear?

---



- Circular machines suffer synchrotron radiation

- ◆ Power loss:

$$\frac{dP}{dt} \propto \frac{E^4}{m^4 R^2}$$

- ◆ Electrons are much lighter than protons, so synchrotron radiation is a show stopper for circular machines at Terascale energies
- ◆ Three times the energy  $\Rightarrow$  nine times the radius!

# How does it work?

---



1. Create dense swarms of 20 billion electrons and 20 billion positrons
  2. Collect them into bunches and transport them to the ends of the linacs
  3. Accelerate them to close to the speed of light
  4. Focus the bunches to spots 5 nm high
  5. Collide them at interaction point, where the matter and antimatter annihilate into bursts of pure energy
- ◆ Control the energy of the beam, the shape of the bunches, and the polarization of the electrons!

# By the numbers



- Each beam contains 2625 bunches of 20 billion electrons or 20 billion positrons
  - ◆ Producing 14,000 collisions per second
- Each linac is built from 8000 superconducting niobium cavities, cooled to 1.8K
  - ◆ Accelerating particles 31.5 MV/meter
- Total power consumption:  
230 MWatt

Tour de force!



# Case studies

---



- The case for the ILC can be made by looking at various examples
  - ◆ Higgs and its Imposters
  - ◆ Extra Dimensions and their Avatars
  - ◆ Alchemy of Dark Matter
  - ◆ Ultimate Unification / Einstein's Dream
- In each case, the particles tell stories that go far beyond the particles themselves
  - ◆ And the ILC has an important role to play ...

# Higgs

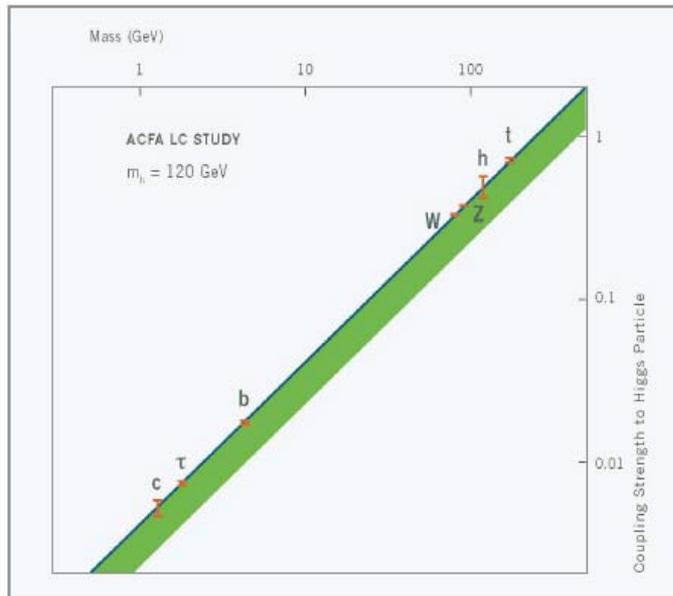


- The Higgs is different
  - ♦ A spin-zero boson that fills the vacuum
    - Bose-Einstein condensate!
- It is a radically new kind of particle
  - ♦ Responsible for the microphysical origin of mass



Masses and decay rates are related!

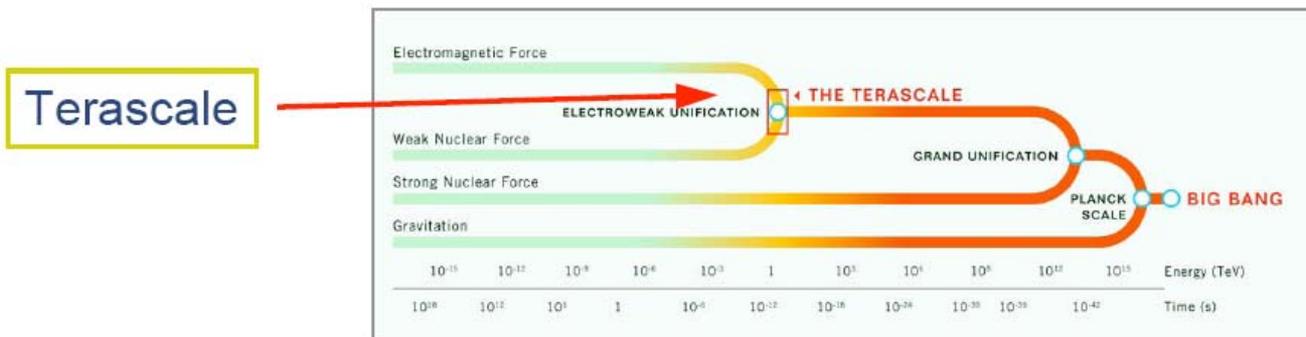
# Higgs



Higgs Couplings at ILC

- But is a “Higgs” the Higgs? Is it the *only* Higgs?
  - ◆ Does it have the correct spin?
  - ◆ Does it have the correct couplings?
  - ◆ Does it mix with other spin-zero particles – such as radions?
- We need experiments to know for sure!

# Extra Dimensions



- The Terascale is where EW unification occurs
  - ◆ Of course, the Higgs. But is there more?
- Many theories of EW unification involve exotic new physics
  - ◆ Even new dimensions of space ...

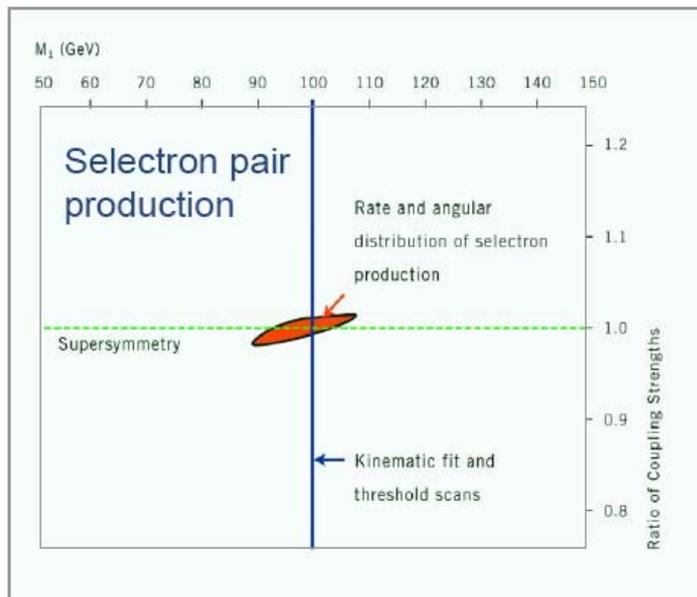
# Extra Dimensions



- Extra dimensions come in two types:
  - ◆ Fermionic  $\Rightarrow$  Supersymmetric partners
  - ◆ Bosonic  $\Rightarrow$  Kaluza-Klein partners
- In each case, they show up as new particles!



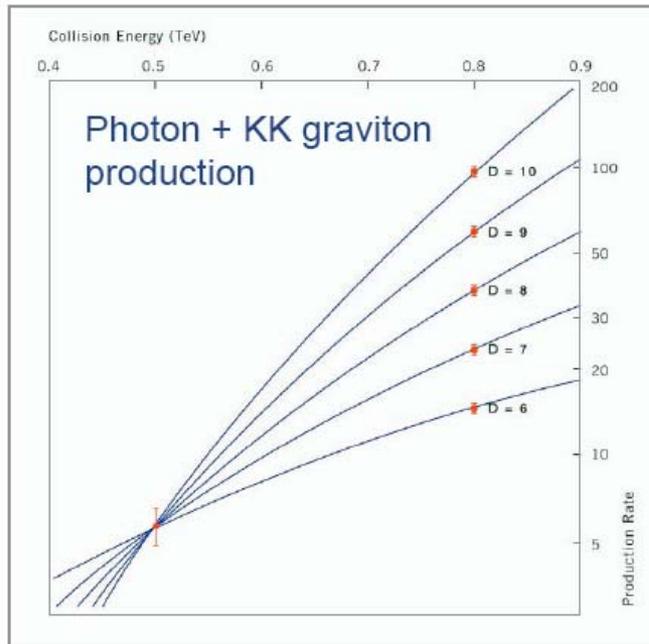
# Supersymmetry



SUSY Couplings at ILC

- But are they SUSY?
  - ◆ Does they have the correct spins?
  - ◆ Does they have the correct couplings?
  - ◆ What are their masses?
- The ILC makes model-independent measurements. It is well-suited to SUSY signatures!

# Bosonic Dimensions



Dimension Counting at ILC

- But are they the sign of a new dimension?
  - ◆ Does they have the correct spins?
  - ◆ Does they have the correct couplings?
  - ◆ What are their masses?
- How many hidden dimensions are there?
- The ILC is well-suited to missing-energy signatures

# Dark Matter



- Most theories of EW unification have viable dark matter candidates
- For example, the lightest KK particle or the lightest SUSY particle can do the job

Bosonic dimension



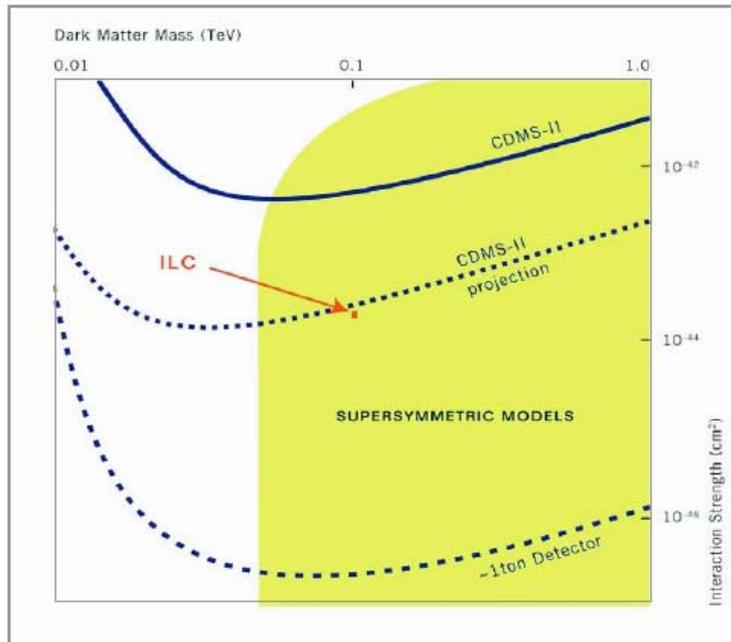
KK tower

Fermionic dimension



Supersymmetric partners

# Dark Matter



Dark Matter Direct Detection

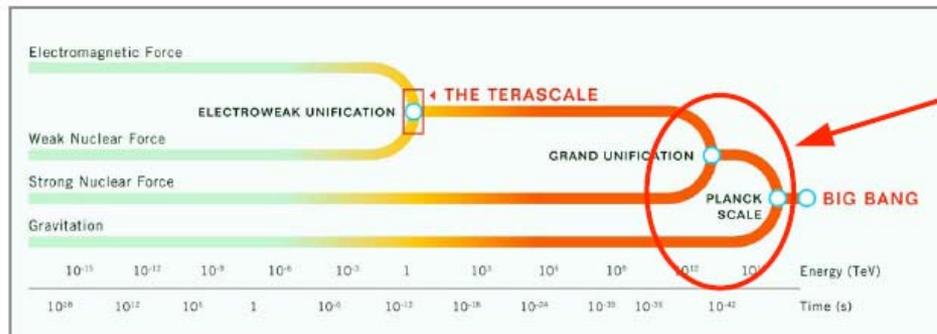
- Of course, one wants a triple check:
  - ◆ Astrophysics and cosmology
  - ◆ Accelerator production
  - ◆ Direct detection
- Is the dark matter candidate actually in our galactic halo?

# Ultimate Unification



- Because of its great precision, the ILC is sensitive to tiny quantum effects that let it act as a telescope to energies way past the Terascale

◆ It can probe physics far beyond 1 TeV



Ultimate Unification!

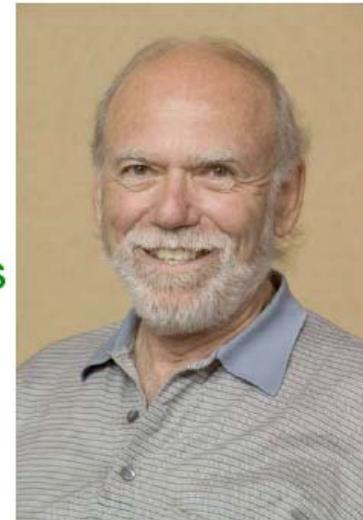
- Unification exhibits LHC / ILC synergy!

# Next steps

---



- The ILC is an international project, proposed by physicists from Europe, Asia and the Americas
  - ◆ The scope of the project is too large for any one country or region
- It is being run by a Global Design Effort, led by Barry Barish of Caltech
  - ◆ The GDE directs over 100 universities and laboratories around the world on ILC R&D. It involves over 1000 physicists in its work



# In the news!



Le Monde.fr

Sciences

Un effort mondial est requis pour le dernier des accélérateurs géants

LE MONDE | 15.02.07 | 15h52 • Mis à jour le 15.02.07 | 15h52

INTERNATIONAL  
Herald Tribune

宇宙創生解明へ、巨大粒子加速器は7780億円

YOMIURI ONLINE | 読売新聞

Physicists plan costly look at the beginnings of the universe

DIE ZEITUNG

国际科学家联合发布最新一代高能加速器设计报告

Wer soll das bezahlen?

Un accélérateur pour éclairer le big bang

5,5 Milliarden kostet einem neuen Bericht zufolge der modernste Teilchenbeschleuniger der Welt. Deutsche Physiker würden ihn gerne nahe Hamburg aufbauen. Von Björn Schwentker

CYRILLE VANLERBERGHE.  
Publié le 10 février 2007  
Actualisé le 10 février 2007 : 22h22



WIRED NEWS

NEWS OF THE WEEK

PHYSICS:  
International Team Releases Design, Cost for Next Great Particle Smasher  
Adrian Cho

Nachrichten > Wissen > Forschung

全球物理学家准备共建新一代高能加速器

TEILCHENPHYSIK DIE NÄCHSTE GENERATION DER LINEAR-BES  
Milliarden-Projekt für Hamburg?

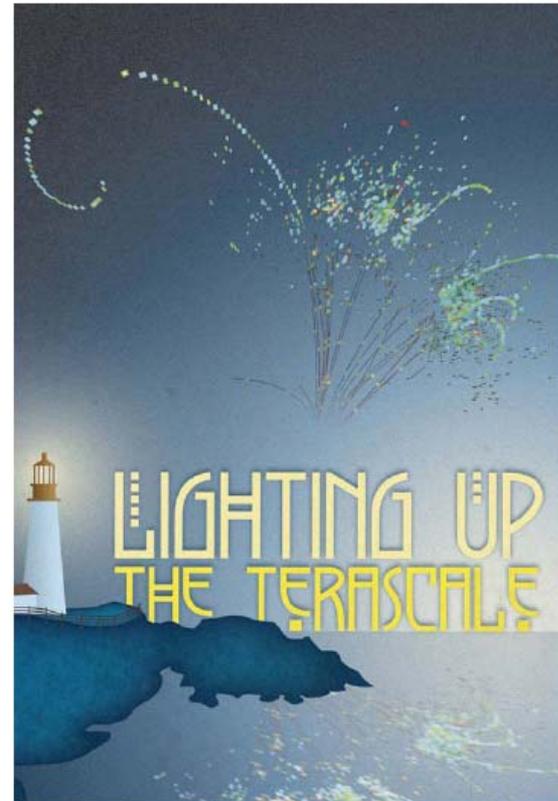
# Information

---



- For more information, visit
  - ◆ [www.interactions.org/quantumuniverse/](http://www.interactions.org/quantumuniverse/)
  - ◆ [www.linearcollider.org/](http://www.linearcollider.org/)

All unattributed plots are taken from *Discovering the Quantum Universe*, available at [interactions.org](http://interactions.org)



- **2015**
- **Möglicher Beginn der Inbetriebnahme des Internationalen Linearcolliders ILC.**
- **Etwa 2007**
- Vorlage eines **international erarbeiteten technischen Projektvorschlags** mit detaillierten Kosten als Basis für die politische Grundsatzentscheidung zum Bau des Internationalen Linearcolliders ILC in Amerika, Asien oder Europa.
- **Laufend**
- Weiterführende Arbeiten der von ICFA eingesetzten internationalen Lenkungsgruppe "International Linear Collider Steering Committee ILCSC":
  - Untersuchungen zu einer **ILC-Forschungsorganisation** sowie zum Konzept des "**Global Accelerator Network**", eines weltweiten Netzwerks von Beschleunigerzentren und Forschungseinrichtungen zum Betrieb des Linearcolliders
  - Verhandlungen möglicher **Zuwendungsgeber**
  - Weiterführung der **technischen Entwicklungsarbeiten** für den Linearcollider und die Detektoren.
- **August 2004**
- 
- **\_ Supraleitender Resonator**
- Beim Internationalen Linearcollider ILC soll die von DESY und seinen internationalen Partnern - der "TESLA Technology Collaboration" - entwickelte **supraleitende Beschleunigertechnologie** zum Einsatz kommen.
- **Auswahl der Beschleunigertechnologie** (normalleitend oder supraleitend) für den Internationalen Linearcollider ILC: Nach intensiver achtmonatiger Begutachtung durch eine Expertengruppe ("International Technology Recommendation Panel ITRP") entschied das "International Committee for Future Accelerators ICFA" - das Komitee, das die Teilchenphysik weltweit vertritt: Für den künftigen Linearcollider wird die **supraleitende Beschleunigertechnologie** eingesetzt. **DESY und seine internationalen Partner - die "TESLA Technology Collaboration" - haben diese Technologie gemeinsam entwickelt und an der TESLA-Testanlage in Hamburg erfolgreich getestet.**

- **Februar 2004**
- Veröffentlichung einer **Stellungnahme der OECD-Wissenschaftsminister** ("OECD Committee for Scientific and Technological Policy at Ministerial Level"), in dem diese "bestätigen, wie wichtig ein gesicherter Zugang zu Großgeräten für die Forschung ist, und die Bedeutung der langfristigen Stärke der Hochenergiephysik unterstreichen. Sie nehmen den weltweiten Konsens der wissenschaftlichen Gemeinschaft zur Kenntnis, die einen Elektron-Positron-Linearcollider als nächste Beschleunigeranlage ausgewählt hat, um die Entdeckungen zu vervollständigen und weiterzuführen, die der zurzeit bei CERN im Bau befindliche Large Hadron Collider voraussichtlich liefern wird. Sie stimmen überein, dass die Planung und Realisierung eines derart umfangreichen, langjährigen Projekts auf globaler Basis durchgeführt werden sollte und Absprachen sowohl zwischen den Wissenschaftlern als auch zwischen den Vertretern der Zuwendungsgeber der interessierten Länder erfordert". - Diese Stellungnahme macht die weltweite Unterstützung der Politik deutlich sowie die Bedeutung, die sie der Teilchenphysik und dem Linearcollider beimisst.
- **November 2003**
- Veröffentlichung des "**20-Jahre-Plans**" des US-amerikanischen "**Department of Energy DOE**", in dem die Prioritäten der USA für die Realisierung großer Forschungsanlagen in den nächsten 20 Jahren festgelegt werden. An erster Stelle der als "mittelfristig" eingestuften Projekte steht der Elektron-Positron-Linearcollider.
- **April 2003**
- Veröffentlichung des **Berichts der weltweiten Untersuchungsgruppe zu Physik und Detektoren an Linearcollidern** ("Worldwide Study of Linear Collider Physics and Detectors"), in dem das Forschungspotenzial des Linearcolliders eingehend dargelegt wird. - Als erste weltweit gemeinsam verfasste Aussage zur Zukunft der Teilchenphysik wurde das Dokument von über 2000 Wissenschaftlern unterschrieben.
- **Februar 2003**
- Veröffentlichung des **Abschlussberichts des "International Linear Collider Technical Review Committee ILCTRC"**, das vom internationalen Komitee für zukünftige Beschleuniger ("International Committee for Future Accelerators ICFA") eingesetzt wurde, um den technischen Status der verschiedenen Linearcolliderprojekte zu begutachten.

- **Februar 2003**
- Veröffentlichung des **Projektentwurfs** ("GLC Roadmap") zum **asiatischen Linearcollidervorschlag GLC**.
- **Februar 2003**
- **Grundsatzentscheidung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF):**  
Ein deutscher Standort für den Linearcollider wird noch nicht vorgeschlagen, da die internationalen Entwicklungen abgewartet werden sollen. DESY soll die international eingebetteten Forschungsarbeiten für TESLA weiterführen, um die Beteiligung Deutschlands an einem späteren globalen Linearcolliderprojekt zu ermöglichen. - Damit ist die deutsche Regierung die erste, die sich grundsätzlich bereit erklärt hat, sich an einem künftigen internationalen Linearcolliderprojekt zu beteiligen.
- **2001-2002**
- **Weltweite Einigung auf einen Linearcollider:**  
Ein Elektron-Positron-Linearcollider im Energiebereich von 500 bis etwa 1000 Giga-Elektronenvolt hat als nächster großer Beschleuniger für die Teilchenphysik höchste Priorität - dies ist das übereinstimmende Ergebnis von Studien der Komitees für zukünftige Beschleuniger in Asien (ACFA), Europa ("European Committee for Future Accelerators ECFA") und den USA ("High Energy Physics Advisory Panel HEPAP") sowie der "Consultative Group on High Energy Physics" des "OECD Global Science Forum". Einig ist man sich auch, dass ein solcher Beschleuniger in weltweiter Zusammenarbeit gebaut werden sollte und dass der Bau so bald wie möglich beginnen sollte, um eine möglichst große zeitliche Überlappung mit dem Betrieb des Protonenbeschleunigers LHC bei CERN in Genf zu erzielen.
- 
- \_ Veröffentlichung des TESLA Technical Design Reports
- Die wissenschaftlichen Perspektiven und die technische Realisierung des TESLA-Projekts waren Thema eines zweitägigen Kolloquiums, das am 23. und 24. März 2001 anlässlich der Veröffentlichung des TESLA Technical Design Reports bei DESY stattfand. Dazu meldeten sich etwa 900 Teilnehmer an, davon 40 Prozent aus dem Ausland.
- **März 2001**
- Veröffentlichung des **Projektentwurfs** ("TESLA Technical Design Report") zum **Linearcollidervorschlag TESLA**.
- **Anfang der 1990er Jahre bis 2004**
- **Forschungs- und Entwicklungsarbeiten** in internationaler Zusammenarbeit zu verschiedenen technologischen Konzepten für einen Elektron-Positron-Linearcollider an den Forschungszentren CERN (Schweiz, Projektvorschlag **CLIC**), DESY (Deutschland, Projektvorschlag **TESLA**), KEK (Japan, Projektvorschlag **GLC**) und SLAC (USA, Projektvorschlag **NLC**).

# Jetzt erstmal ...

- 30.10. Gamma-Ray Bursts
- 13.11. GUT & TOE (Stringtheorie, etc.)
- 27.11. LHC & Higgs
- 11.12. Higgs & die Physik jenseits des Standardmodells

Winterferien: 23.12.-06.01.10

- 08.01.10 Higgs & die Inflation
- 22.01.10 Zeit & Lichtgeschwindigkeit
- 05.02.10



*Frohe Weihnachten  
und  
ein*

*GUTES NEUES JAHR !!!!!!!!!!!*