



Teilchenphysik

Lehrerprogramm - Mai 2016

European Organisation for Nuclear Research

„Magic is not happening at CERN, magic is explained at CERN“ - Tom Hanks



Kristof Schmieden
EP Department

kristof.schmieden@cern.ch

• Elementare Teilchen

- Bausteine der Materie
 - Fermionen ($S=1/2$)
- Überträger der Kräfte
 - Bosonen ($S=1$)

	1.	2.	3.	Familie / Generation
Quarks	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ t top	0 0 1 γ Photon
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g Gluon
Leptonen	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson
				125,9 GeV 0 0 H Higgs Boson
				Eichbosonen

• Elementare Teilchen

- Bausteine der Materie
 - Fermionen ($S=1/2$)
- Überträger der Kräfte
 - Bosonen ($S=1$)

Doublets der schwachen Ladung

	1.	2.	3.	Familie / Generation	
Quarks	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ t top	0 0 1 γ Photon	125,9 GeV 0 0 H Higgs Boson
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 0 1 Z^0 Z Boson	
Leptonen	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson	Eichbosonen

- Higgs Mechanismus spielt eine zentrale Rolle in der Elektroschwachen Theorie

Higgs,
Englert,
Brout: 1964

- Warum ist der „Higgs Mechanismus“ so Wichtig für die Teilchenphysik?

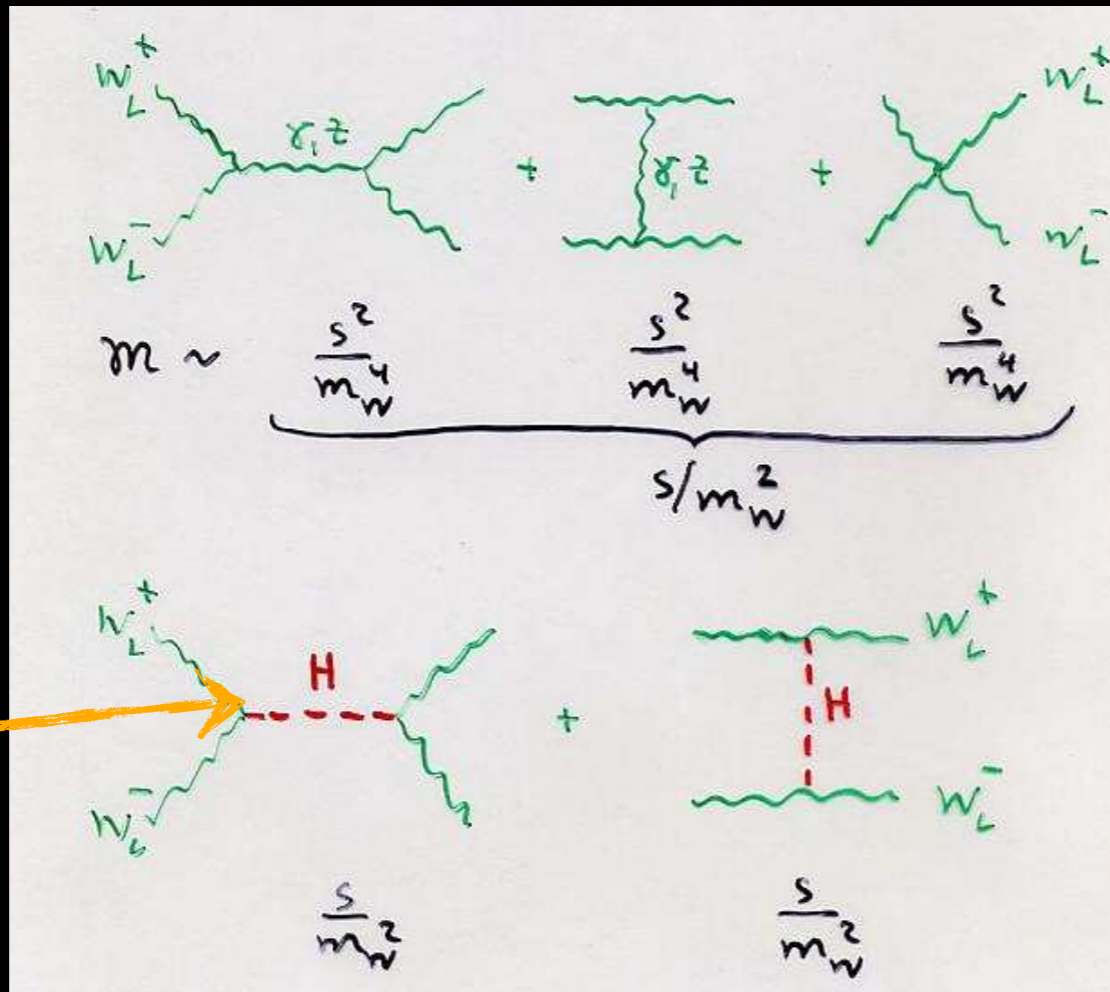
- Alle Eichbosonen sind masselos in der Theorie!
 - Aber W & Z Bosonen sind massiv in der Natur!
- Wahrscheinlichkeitserhaltung!

- Higgs Mechanismus spielt eine zentrale Rolle in der Elektroschwachen Theorie

Higgs,
Englert,
Brout: 1964

- Warum ist der „Higgs Mechanismus“ so Wichtig für die Teilchenphysik?

- Alle Eichbosonen sind masselos in der Theorie!
 - Aber W & Z Bosonen sind massiv in der Natur!
- Wahrscheinlichkeitserhaltung!



Streuwahrscheinlichkeit > 1 für Q^2 groß!

Alles zusammen: destruktive Interferenz
→ Wahrscheinlichkeit < 1

Muss ‚Skalar‘ sein: Spin = 0

- Alle Eichbosonen sind masselos in Elektroschwacher Theorie!
 - Masse ‚per hand‘ hinzugefügt: Theorie bricht zusammen
 - → Eichinvarianz geht verloren
- Dynamische Erzeugung der Masse:
 - Interaktion mit einem Skalaren Feld
 - Erfüllt das ganze Universum
 - Führt zu Massentermen in Gleichungen

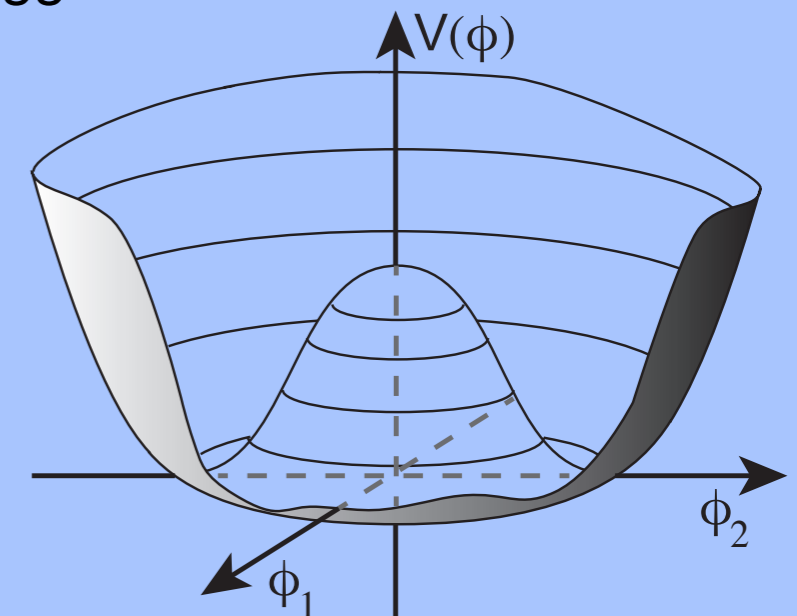
• **Symmetrie** des Potentialminimums ‚spontan‘ gebrochen

- Führt zur Brechung der EW Symmetrie
 - Elektromagnetismus & schwache Kraft

• Analoge Effekte bereits aus Festkörperphysik bekannt! (Supraleitung)

$$V(\phi^\dagger\phi) = m^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2, \quad m, \lambda \in \mathbb{R}.$$

Higgs - Potential



Massen der Eichbosonen



- Alle Eichbosonen sind masselos in Elektroschwacher Theorie!

- Masse ‚per hand‘ hinzugefügt: Theorie bricht zusammen
 - → Eichinvarianz geht verloren

- Dynamische Erzeugung der Masse:

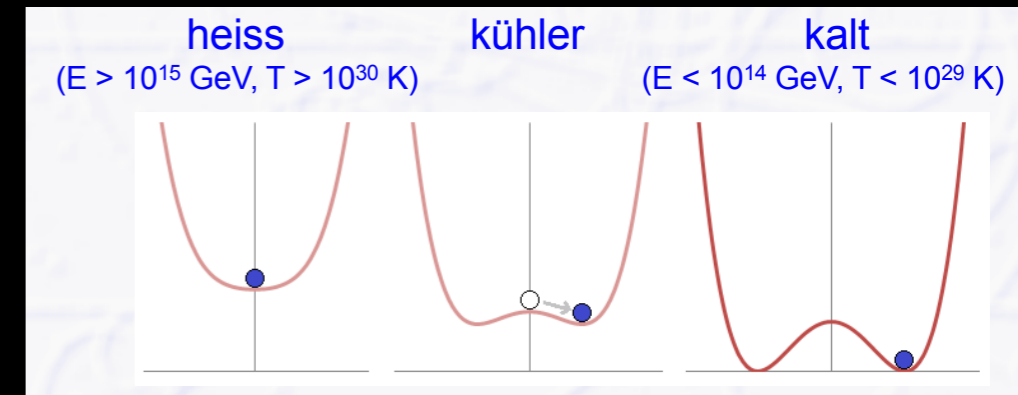
- Interaktion mit einem Skalaren Feld
 - Erfüllt das ganze Universum

- Führt zu Massentermen in Gleichungen

- Symmetrie des Potentialminimums ‚spontan‘ gebrochen

- Führt zur Brechung der EW Symmetrie
 - Elektromagnetismus & schwache Kraft

- Analoge Effekte bereits aus Festkörperphysik bekannt! (Supraleitung)

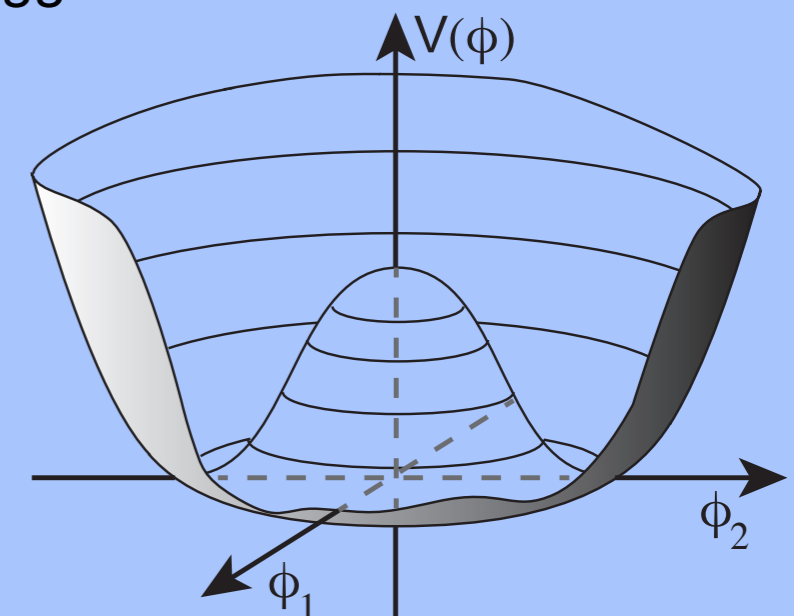


Hohe Energiedichte

Niedrige Energiedichte

$$V(\phi^\dagger\phi) = m^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2, \quad m, \lambda \in \mathbb{R}.$$

Higgs - Potential



Das Higgs Teilchen



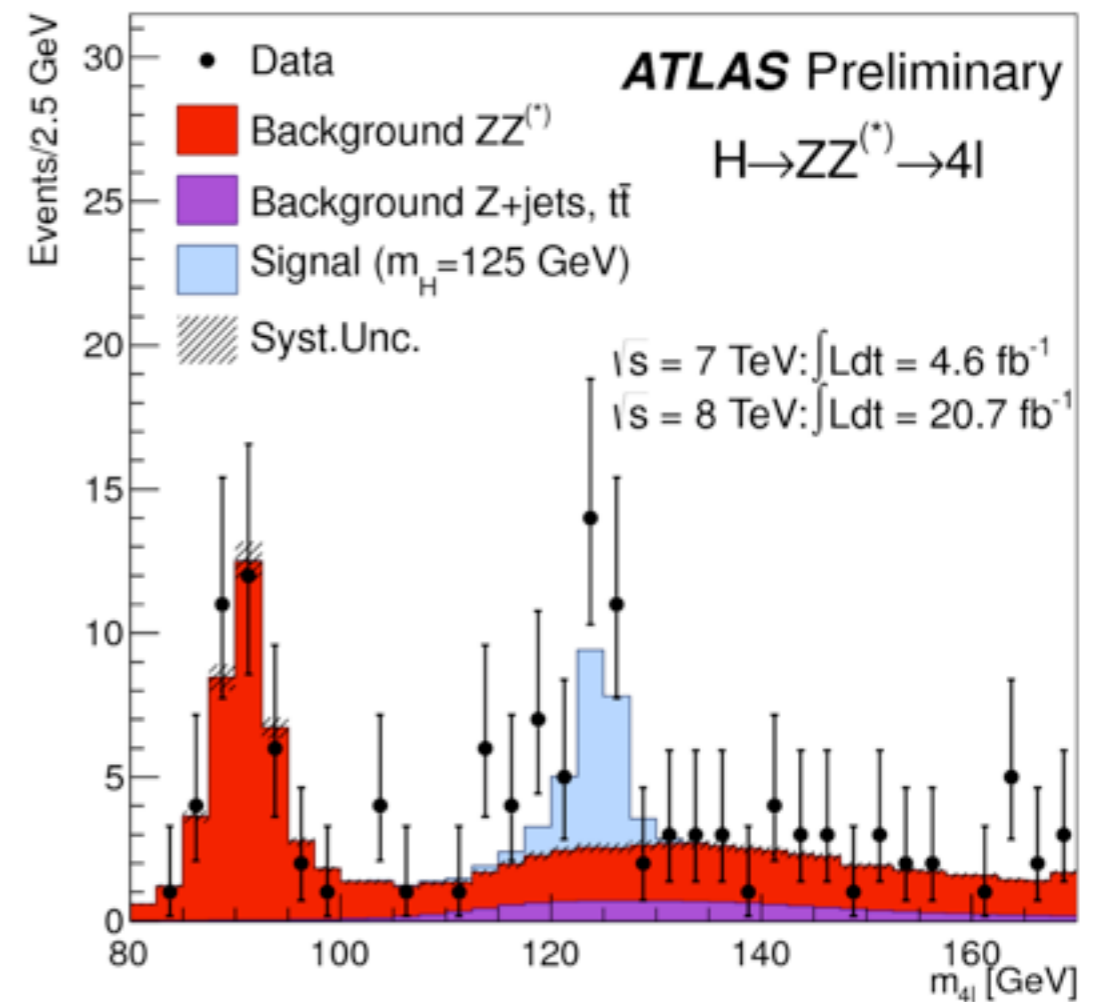
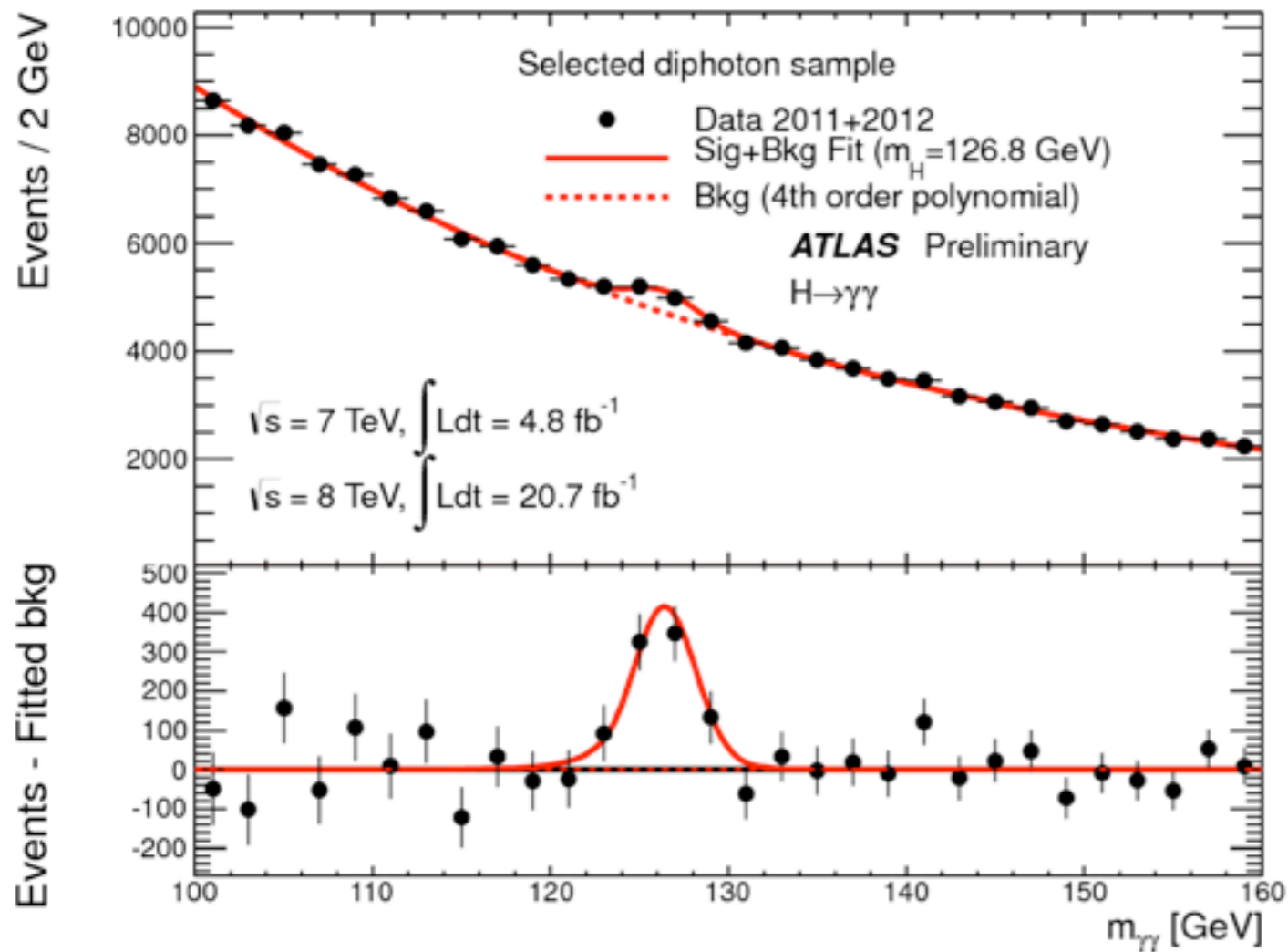
- Higgs Mechanismus erfordert zwingend ein **Teilchen mit Spin = 0** (Skalar)
 - Entspricht einer Anregung des Higgs-Feldes

Das Higgs Teilchen



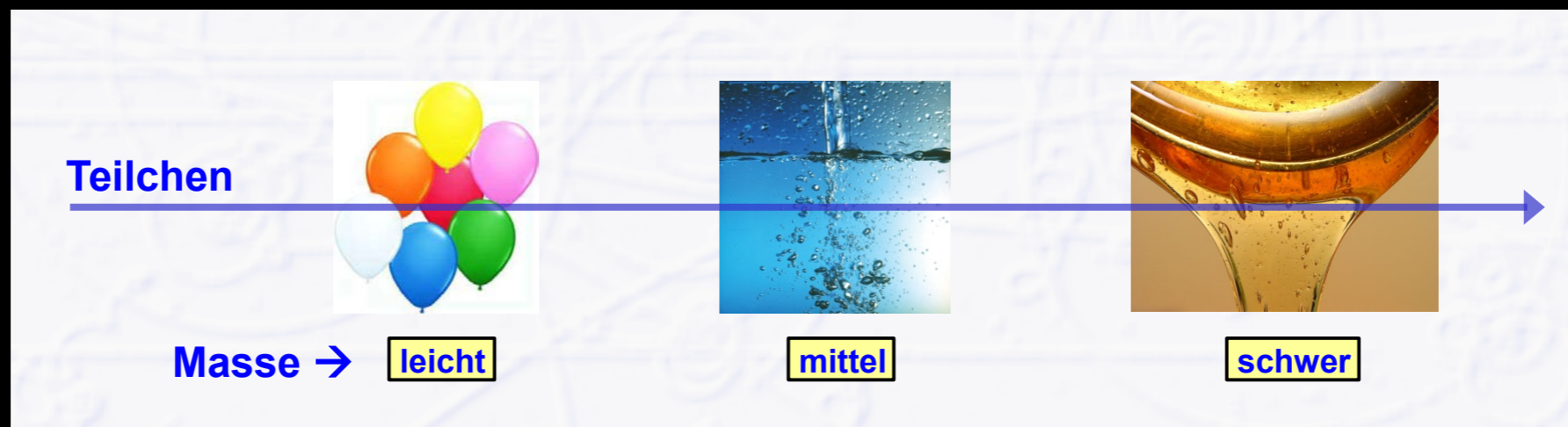
- Higgs Mechanismus erfordert zwingend ein **Teilchen mit Spin = 0** (Skalar)
- Entspricht einer Anregung des Higgs-Feldes

CERN
(ATLAS &
CMS): 2012



Wie die Teilchen Massiv wurden

- Masse der Teilchen hängt von Kopplungsstärke zum Higgsfeld ab:
 - Direkt Verantwortlich für Masse der **Vektorbosonen**: $g_V \sim m_V^2$
 - Gebrochene Symmetrie \rightarrow Goldstone Bosonen \rightarrow Freiheitsgrade absorbiert in Massiven Eichbosonen
- Masse der Fermionen über Yukawa Wechselwirkung:
 - **Explizit hinzugefügt**
 - $g_F \sim m_F$



Eigenschaften des Higgs - Bosons



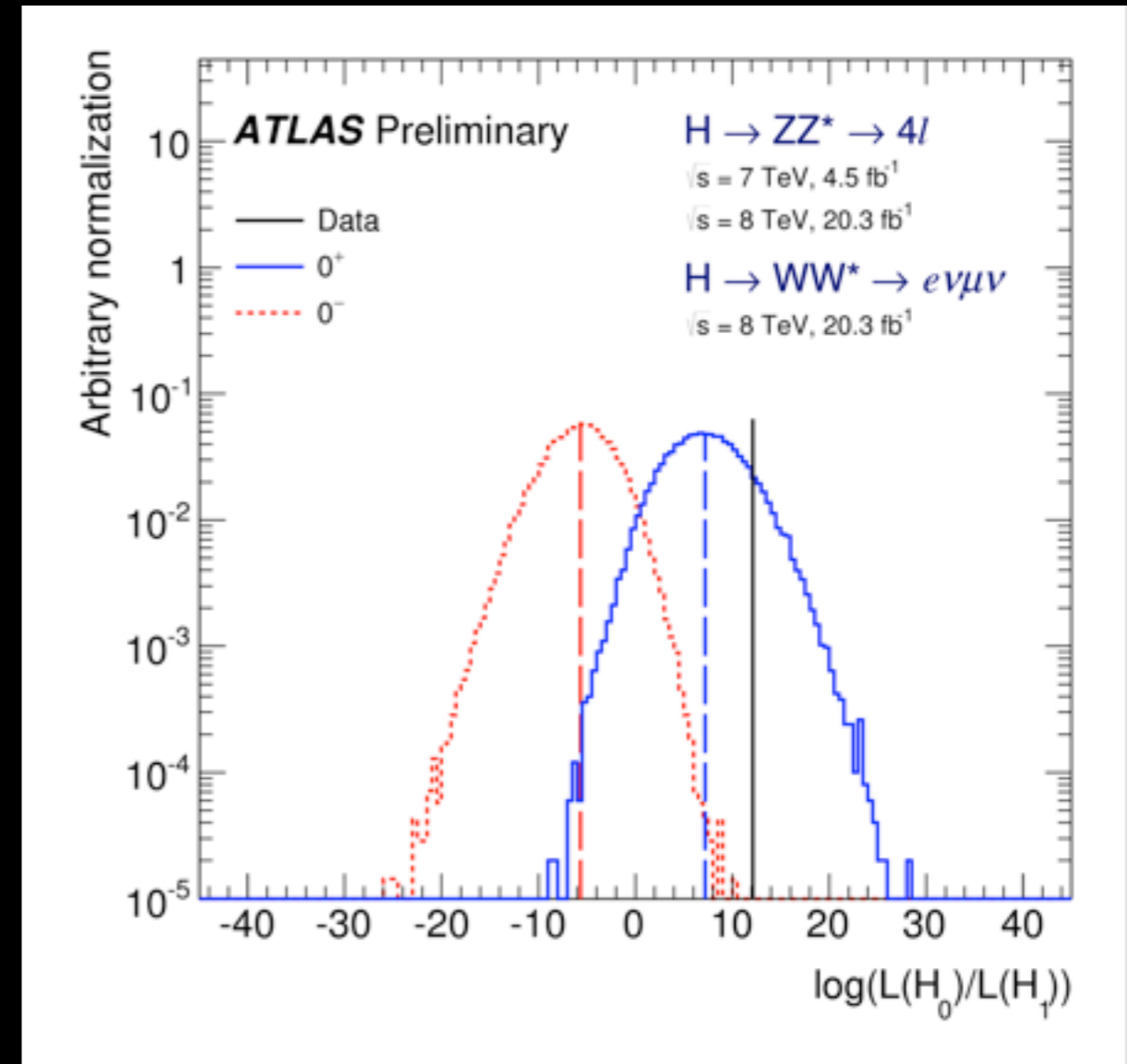
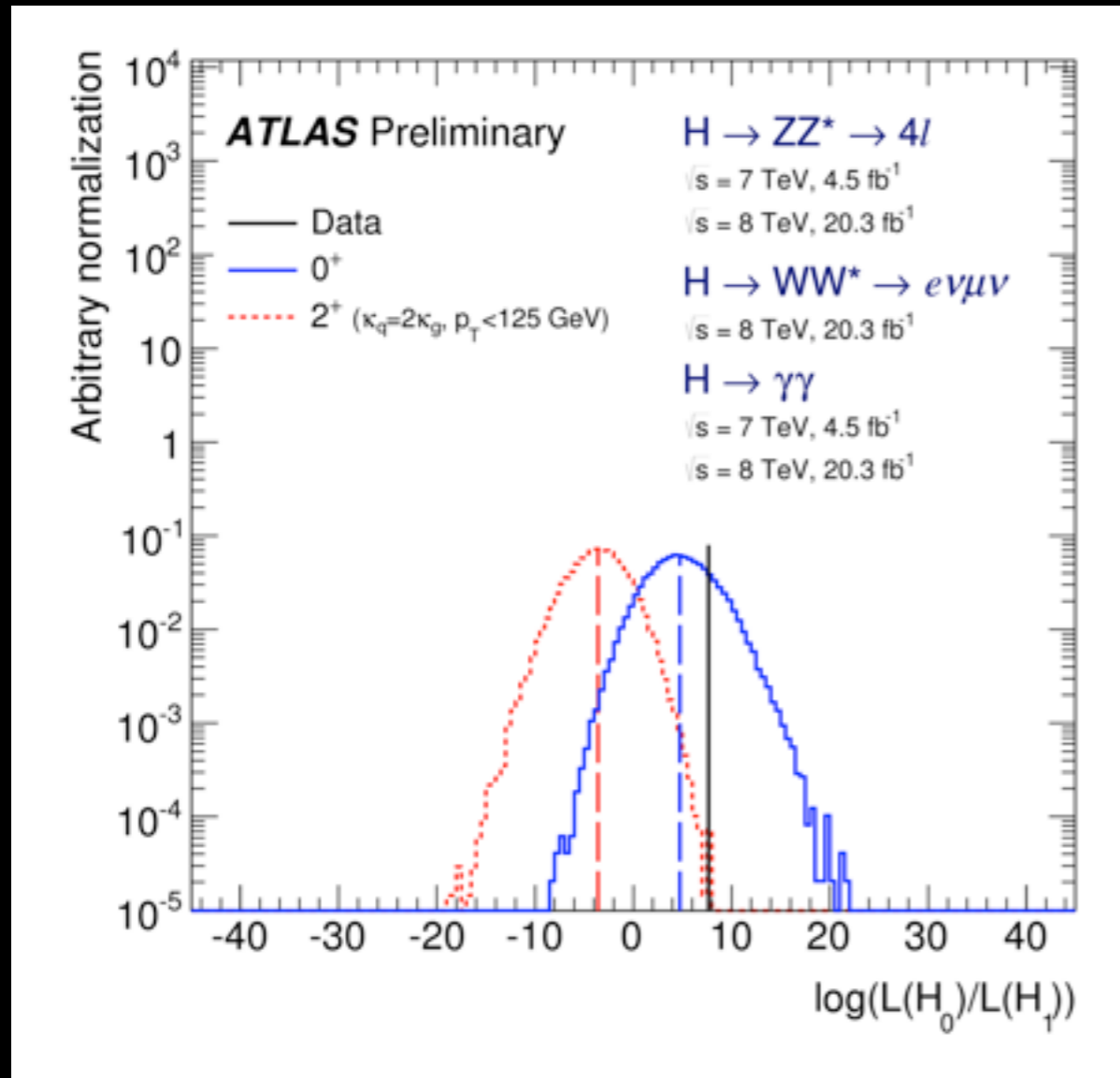
- Ist das gefundene Teilchen wirklich das SM Higgs Teilchen?

- Spin:

- Ganzzahlig, das Zerfall in $\gamma \gamma$

- Parität:

- Gerade oder Ungerade?

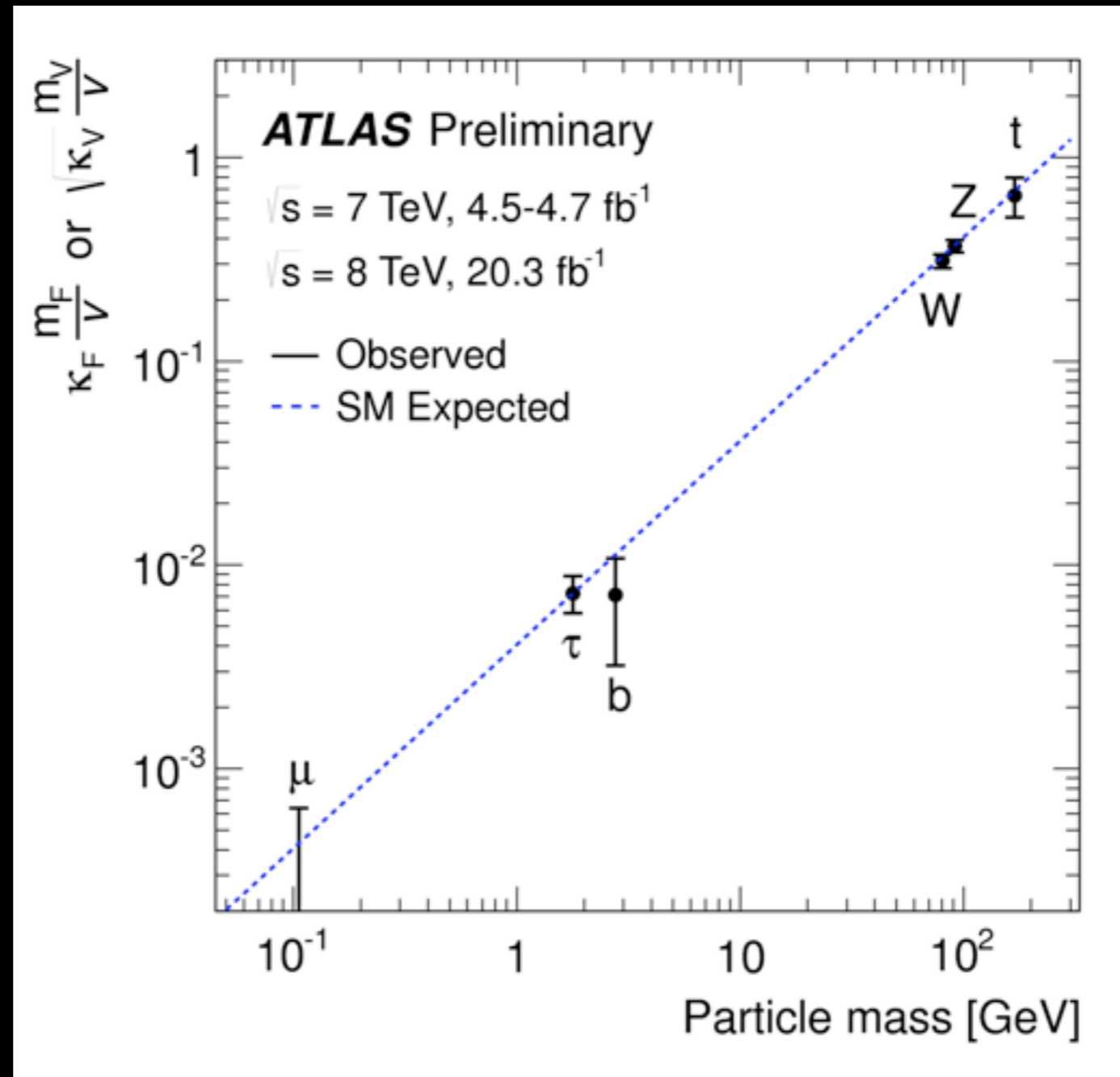


- Bestimme alle Quantenzahlen des Teilchens!

Zusammenhang mit der Masse

- Ist Kopplung an Vektorbosonen / Fermionen abhängig von der Masse?

- Normierung
- V & F auf gerade

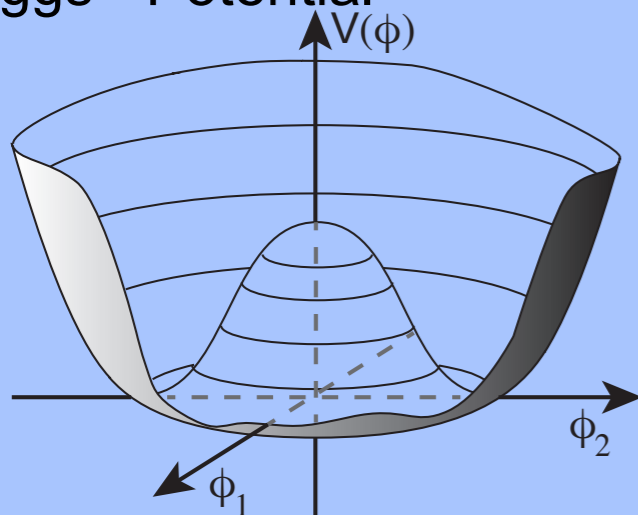


Stabilität des Universums

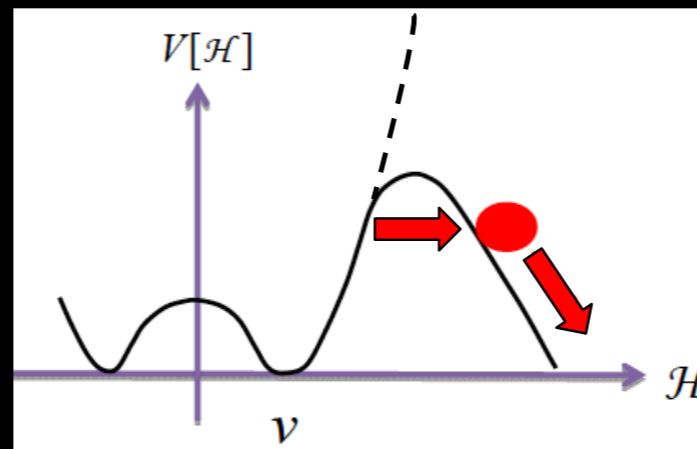
- Entspricht **Vakuum Energie** des Higgs Feldes **lokalen** oder **globalen Minimum**?
 - Falls lokal, gibt es Zustand geringerer Energie?
 - Könnte Universum in diesen Zustand Tunneln?
- Abhängig von Higgs & Top Masse

$$V(\phi^\dagger\phi) = m^2\phi^\dagger\phi + \lambda(\phi^\dagger\phi)^2, \quad m, \lambda \in \mathbb{R}.$$

Higgs - Potential

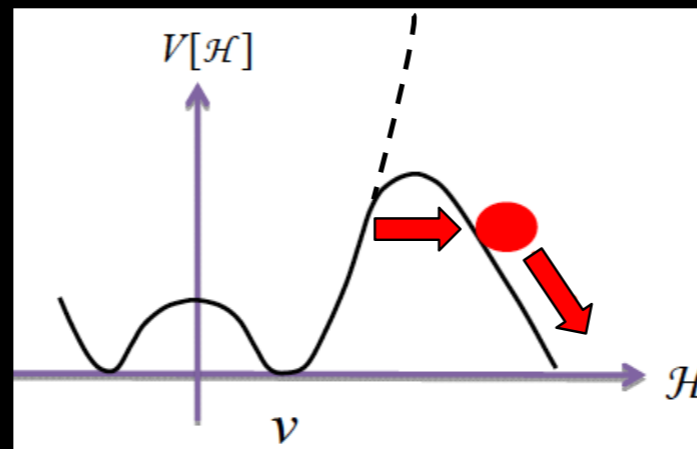
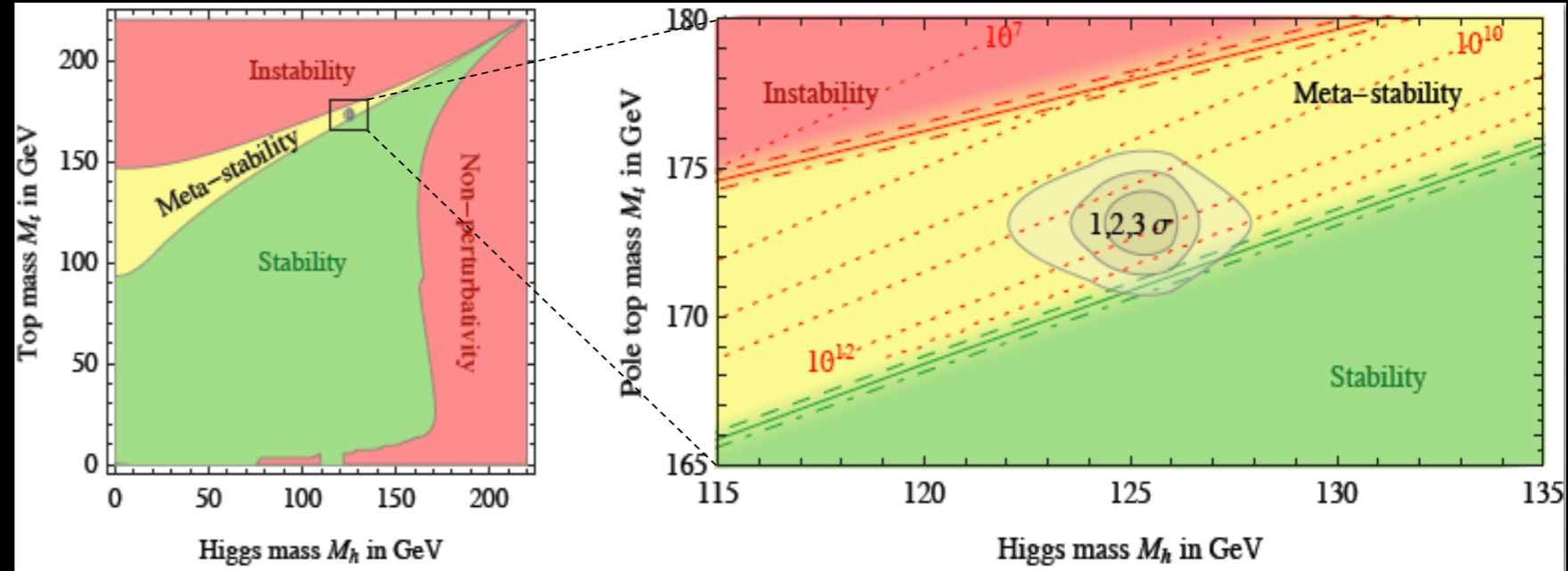
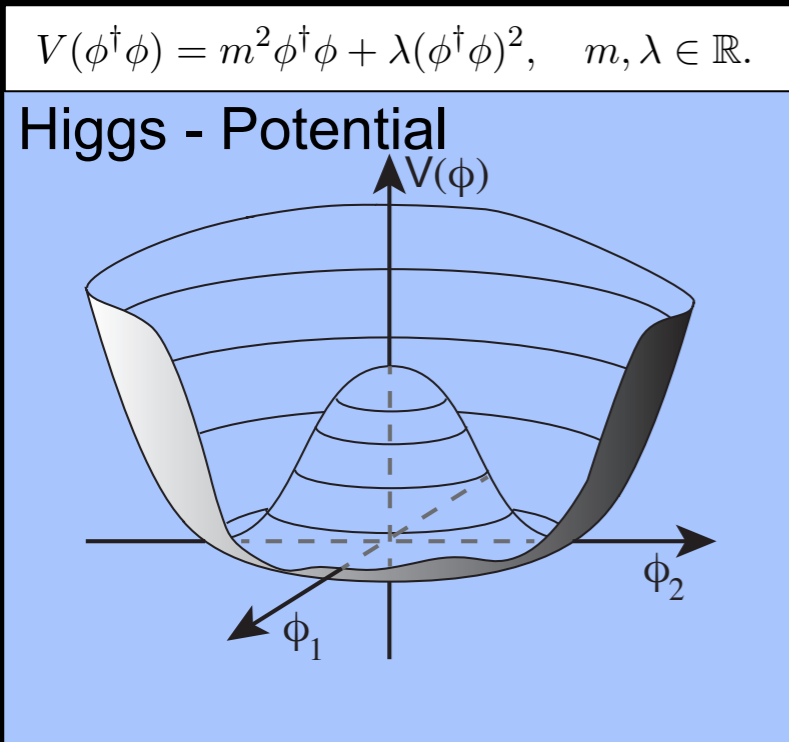


?



Stabilität des Universums

- Entspricht **Vakuum Energie** des Higgs Feldes **lokalen** oder **globalen Minimum**?
 - Falls lokal, gibt es Zustand geringerer Energie?
 - Könnte Universum in diesen Zustand Tunneln?
- Abhängig von Higgs & Top Masse



• Tunnelzeit $\sim 10^{100}$ Jahre

Was haben wir jetzt gelernt?



- Dynamische Erzeugung von Masse
- Vereinheitlichung der elektromagnetischen & schwachen Kraft
- Elektroschwache Symmetriebrechung konsistent Beschrieben
- Wie ist es möglich das W&Z massiv, das Photon aber masselos ist?
 - Wie ist es möglich das $M_W \neq M_Z$

Was haben wir jetzt gelernt?



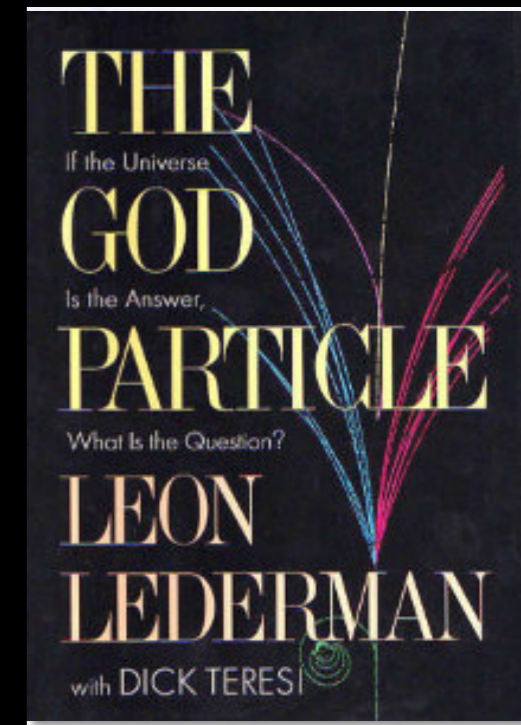
- Dynamische Erzeugung von Masse
- Vereinheitlichung der elektromagnetischen & schwachen Kraft
- Elektroschwache Symmetriebrechung konsistent Beschrieben
- Wie ist es möglich das W&Z massiv, das Photon aber masselos ist?
 - Wie ist es möglich das $M_W \neq M_Z$

- Wieso haben Fermionen eine Masse $\neq 0$?
- Wieso haben Fermionen unterschiedliche Massen?
- Was Bestimmt die „Massen-Hirarchie? [2 MeV (u) -- 173 GeV (t)]

Letzte Anmerkung zum Higgs



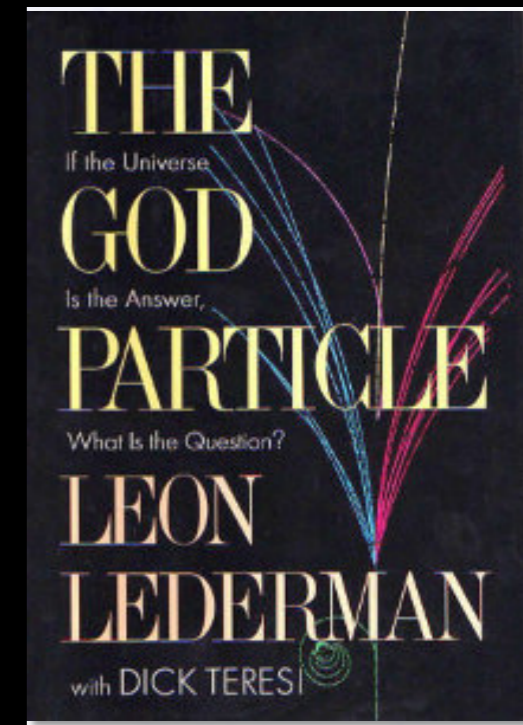
- Leon Lederman (frühere Direktor des Fermilab), Nobelpreis 1988
 - Schrieb 1993 Buch über Teilchenphysik und das Higgs-Teilchen
 - Präge den Begriff „Gottesteilchen“ - „God particle“
- Und der Grund:



Letzte Anmerkung zum Higgs



- Leon Lederman (frühere Direktor des Fermilab), Nobelpreis 1988
 - Schrieb 1993 Buch über Teilchenphysik und das Higgs-Teilchen
 - Prägte den Begriff „Gottesteilchen“ - „God particle“
- Und der Grund:



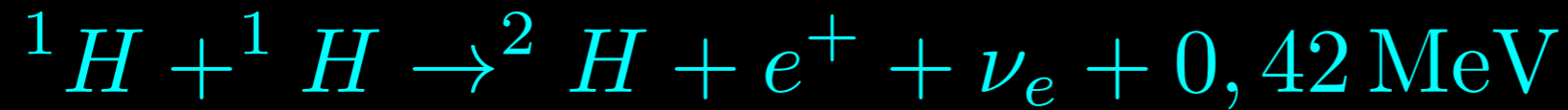
"so central to the state of physics today, so crucial to our final understanding of the structure of matter, yet so elusive"

but "the publisher wouldn't let us call it the **Goddamn Particle**, though that might be a more appropriate title, given its villainous nature and the expense it is causing."



Neutrinos

- **Sonne / Supernovae:** Kernfusion



- **Kernreaktoren:** Kernspaltung
 - β - Zerfall von Spaltprodukten & Neutronen $\rightarrow \nu_e$
- **Atmosphäre:**
 - Myonzerfälle aus kosmischer Strahlung $\rightarrow \nu_\mu, \nu_e$
- **Beschleuniger:**
 - Myonzerfälle $\rightarrow \nu_\mu, \nu_e$

- Nachweis Stellarer Neutrinos im Homestake Experiment: Davis Jr.: 1960er
 - Gemessener Neutrinofluß 50% der Erwartung aufgrund der Sonnenleuchtkraft

Super Kamiokande: 1998

- Nachweis Stellarer Neutrinos im Homestake Experiment: **Davis Jr.: 1960er**
 - Gemessener Neutrinofluß 50% der Erwartung aufgrund der Sonnenleuchtkraft
- Nachweis Stellarer Neutrinos in Superkamiokande
 - Bestätigung der Homestake Ergebnisse **Super Kamiokande: 1998**
- Nachweis Atmosphärischer Neutrinos
 - Fluß der von „oben“ und von „unten“ kommenden Neutrinos unterscheidet sich um ~50%
 - Was passiert mit den Neutrinos?

- Nachweis Stellarer Neutrinos im Homestake Experiment: Davis Jr.: 1960er
 - Gemessener Neutrinofluß 50% der Erwartung aufgrund der Sonnenleuchtkraft
 - Nachweis Stellarer Neutrinos in Superkamiokande
 - Bestätigung der Homestake Ergebnisse Super Kamiokande: 1998
 - Nachweis Atmosphärischer Neutrinos
 - Fluß der von „oben“ und von „unten“ kommenden Neutrinos unterscheidet sich um ~50%
 - Was passiert mit den Neutrinos?
- Neutrinos Oszillieren von einer Art (flavour) zur Anderen
 - Nur Elektron & Muon Neutrinos werden Nachgewiesen

- Analog zum Quark-Sektor

- **Masseneigenzustände != flavour Eigenzustände**

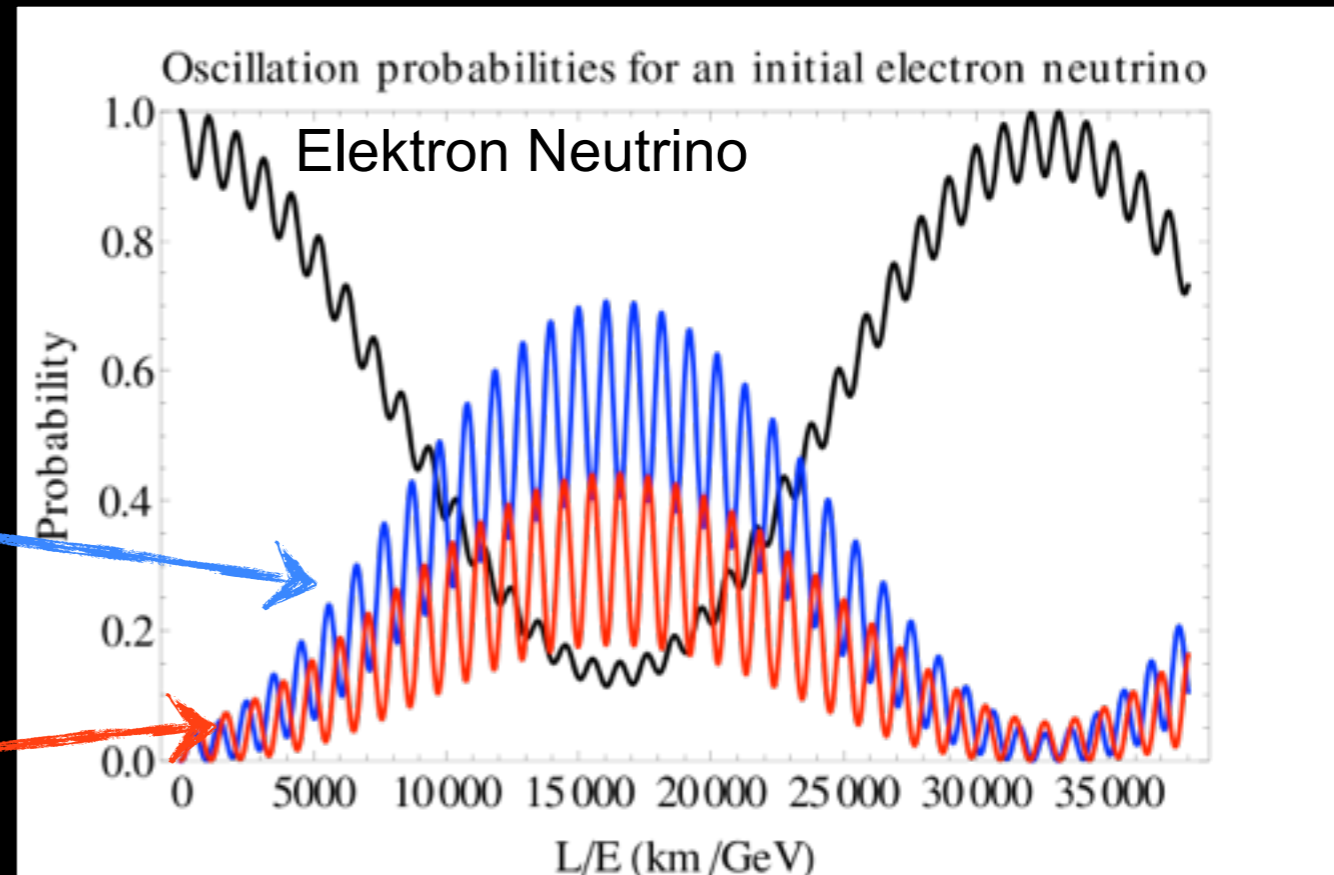
- Erlaubt Mischung → Oszillationen

- Erfordert $m_\nu > 0$ & $m_{\nu_1} \neq m_{\nu_2} \neq m_{\nu_3}$

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta_m & \sin \Theta_m \\ -\sin \Theta_m & \cos \Theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix},$$

Muon Neutrino

Tau Neutrino



$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta(0) | \nu_\alpha(L) \rangle|^2 \approx \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 c^4}{4E} \frac{L}{\hbar c} \right) \cdot \sin^2 (2\Theta_m)$$

- Verschiedenen Reaktor & Beschleuniger Experimente
 - Detektoren in Unterschiedlichen Entfernungen der Quelle
 - Double Chooz, KamLand, DayaBay / T2K, Opera, Minos
 - Messen Unterdrückung des Neutrinoflusses

Neutrinooszillationen - Nachweis



- Verschiedenen Reaktor & Beschleuniger Experimente

- Detektoren in Unterschiedlichen Entfernungen der Quelle
 - Double Chooz, KamLand, DayaBay / T2K, Opera, Minos

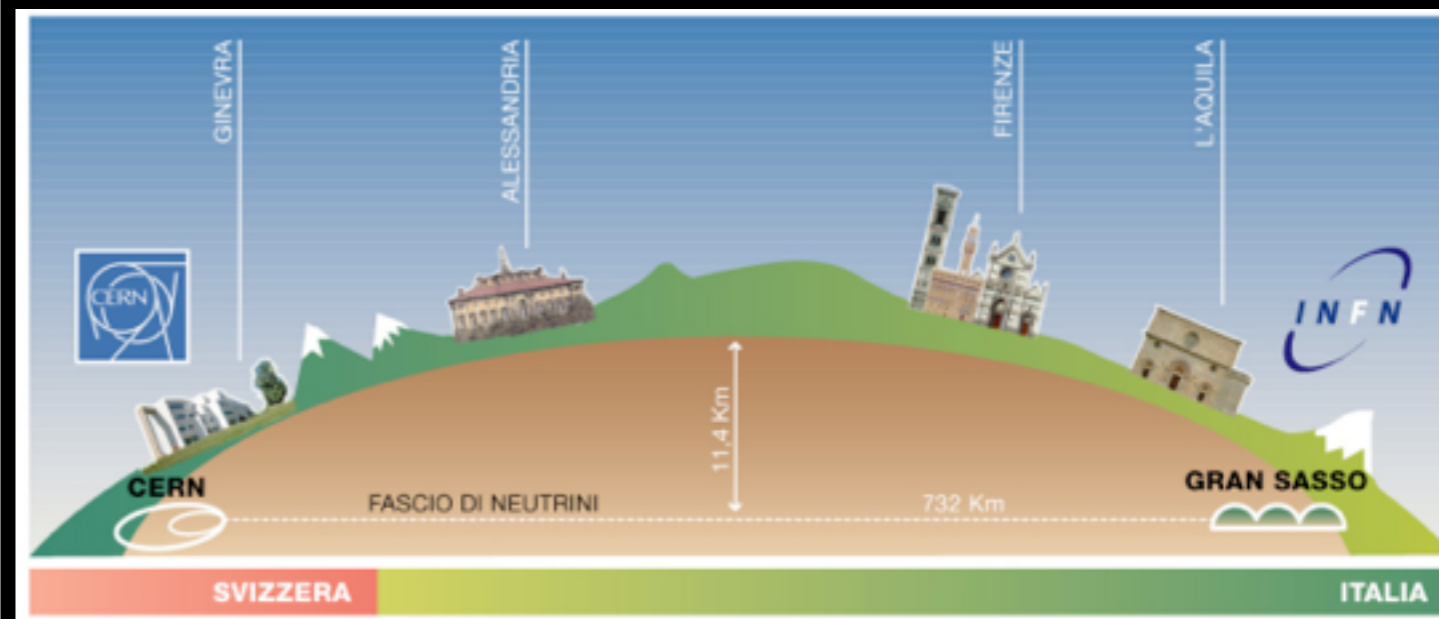
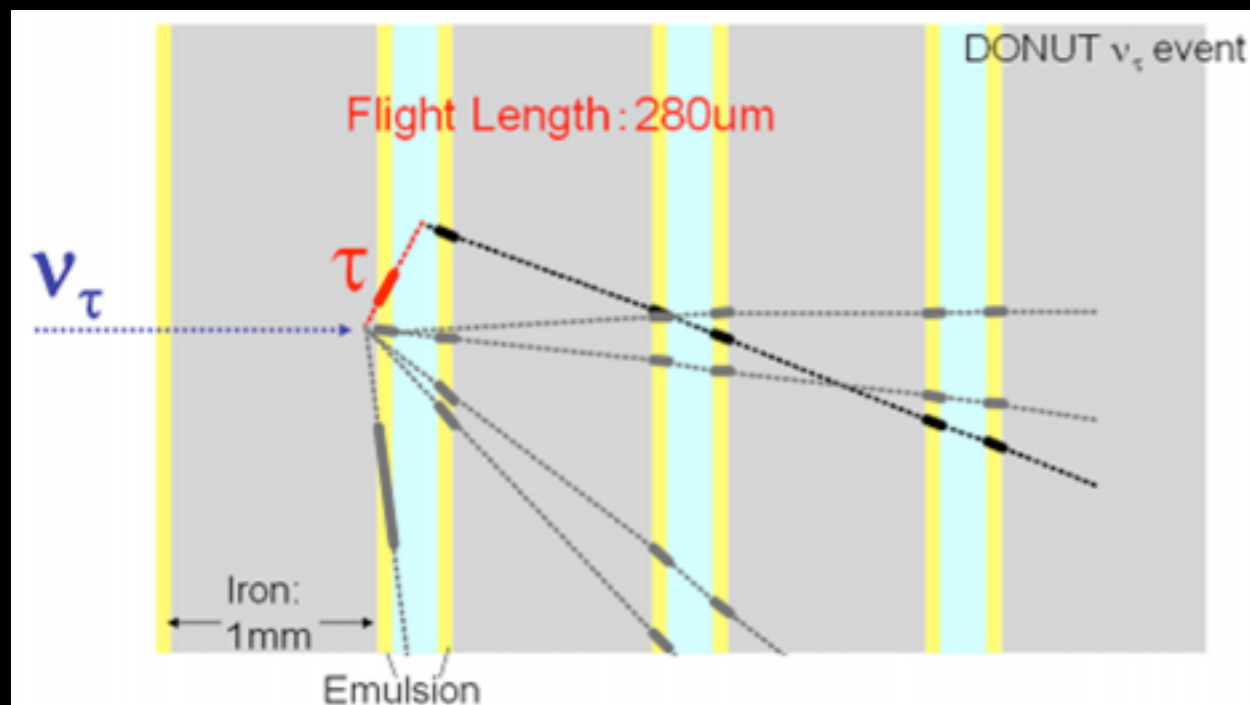
- Messen Unterdrückung des Neutrinoflusses

- **Opera: Erscheinen eines tau-Neutrinos nachgewiesen**

Opera: 2010-2014

- Neutrinostrahl (μ , e) vom CERN 740km nach Gran Sasso (IT)

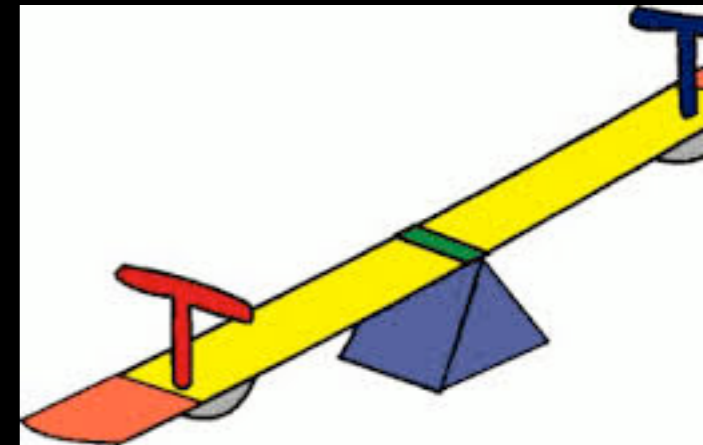
- Nachweis von Tau Neutrinos im Neutrinostrahl (5x)



Woher haben Neutrinos ihre Masse?



- Und wieso ist die Masse so klein im Vergleich zu Leptonen? ($< 2\text{eV}$)
- Genauso wie Elektronen, über Kopplung um Higgsfeld?
 - Erfordert **Links & Rechtshändige** Neutrinos
 - **Nur Linkshändige Neutrinos sind beobachtet worden!**
- Anderer Mechanismus?
- Hoch im Trend: **See-Saw Mechanismus:**
 - Neutrinos sind Majorana Teilchen (eigenen Anti-Teilchen)
 - Zusätzlich **sehr schwere Rechtshändige Neutrinos** (sterile Neutrinos)
 - **Erzwingen sehr kleine Masse für bekannte Neutrinos**
 - **Dies Verletzt Leptonzahlerhaltung & B-L**
 - Könnte die Existenz von Materie über Leptogenesis erklären



• Elementare Teilchen

- Bausteine der Materie
 - Fermionen ($S=1/2$)
- Überträger der Kräfte
 - Bosonen ($S=1$)

	1.	2.	3.	Familie / Generation
Quarks	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ t top	0 0 1 γ Photon
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g Gluon
Leptonen	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson
				125,9 GeV 0 0 H Higgs Boson
				Eichbosonen

• Elementare Teilchen

- Bausteine der Materie
 - Fermionen ($S=1/2$)
- Überträger der Kräfte
 - Bosonen ($S=1$)

Doublets der schwachen Ladung

	1.	2.	3.	Familie / Generation	
Quarks	2,3 MeV $\frac{2}{3}$ u up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ c charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ t top	0 0 1 γ Photon	125,9 GeV 0 0 H Higgs Boson
	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b bottom	0 0 1 g Gluon	
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson	
Leptonen	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson	Eichbosonen

Erfolg des Standardmodells

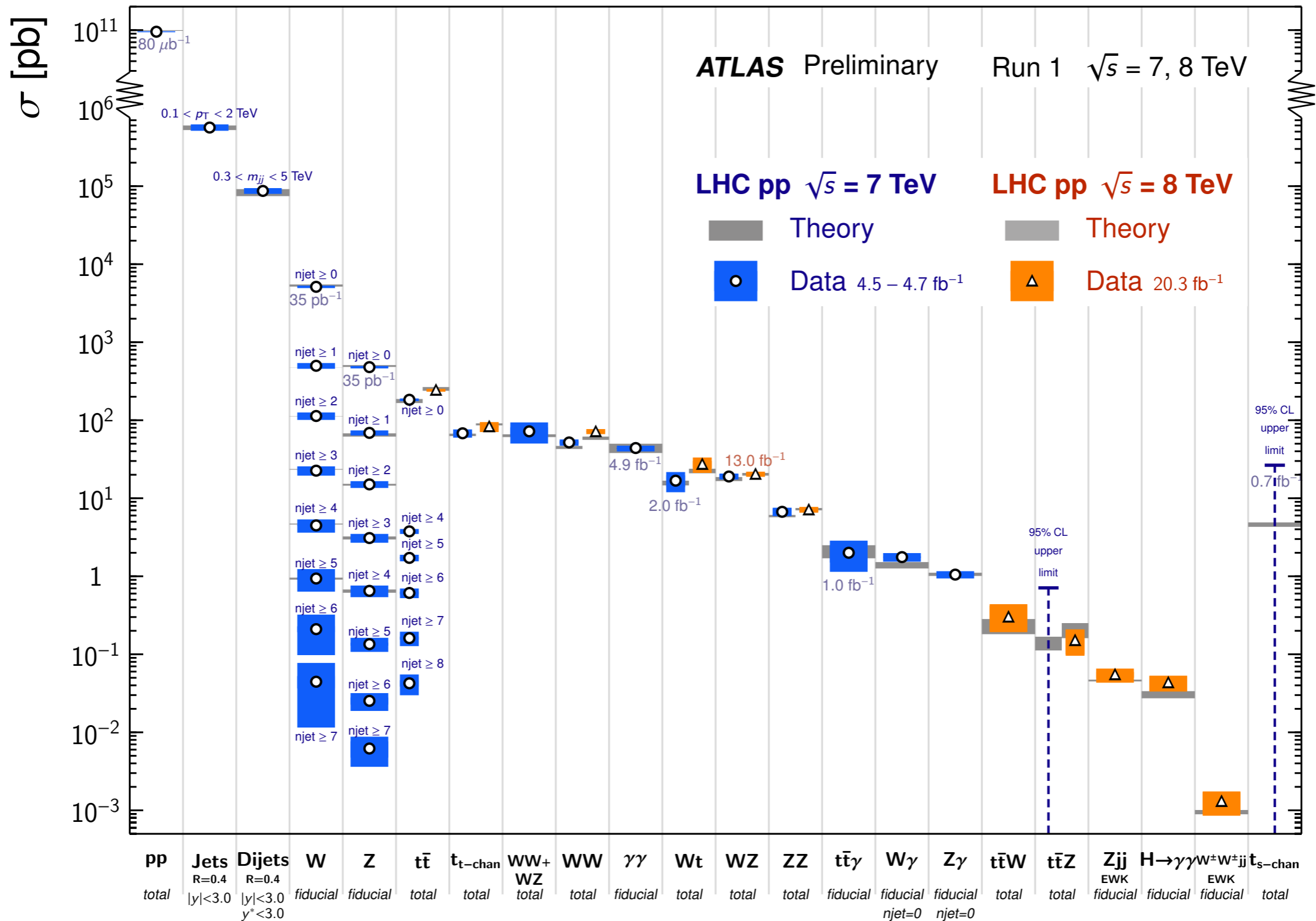


Elektroschwache & Starke Kraft

Quarks, Leptonen, Neutrinos

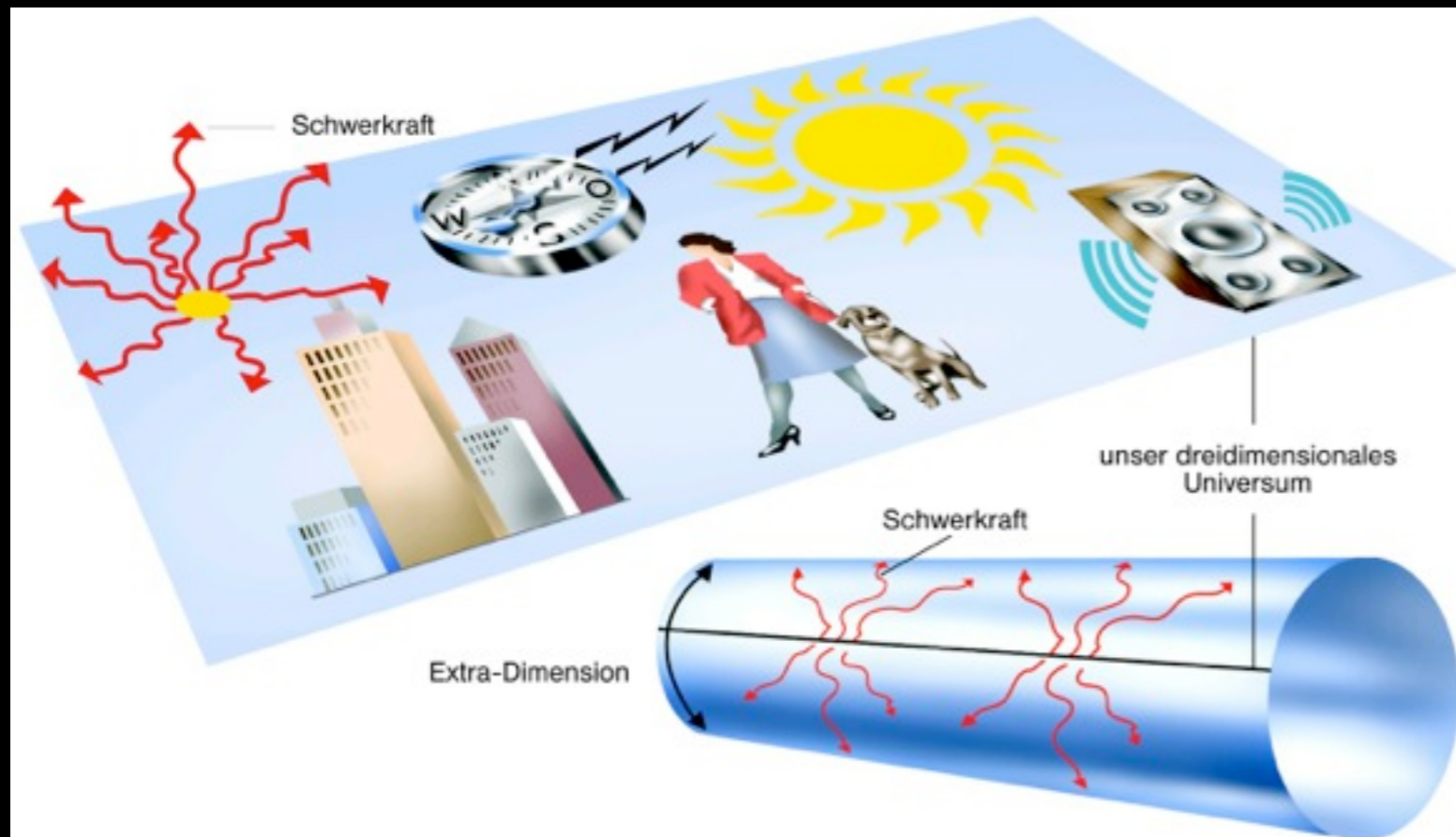
Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: July 2014



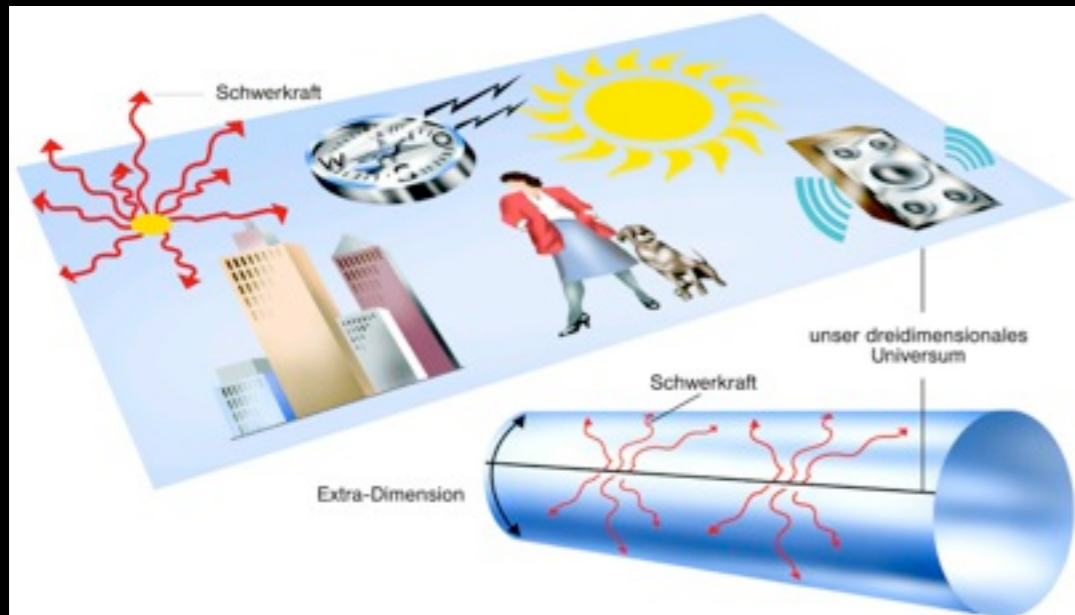
Noch ein paar Lose
Enden ...

- Gravitation lässt sich nicht innerhalb des SM beschreiben
 - **Theoretisches Problem:** Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik konnten bisher nicht zusammengefügt werden
- Wieso ist Gravitation so schwach?
 - Dominiert makroskopische Objekte
 - Auf Teilchenebene vernachlässigbar!
 - 10^{-38} mal so stark wie Elektromagnetische Wechselwirkung!



• Zusätzliche Dimensionen?

- Wieso ist Gravitation so schwach?

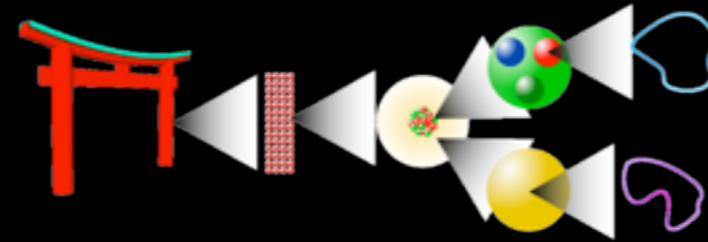


- Zusätzliche Dimensionen?

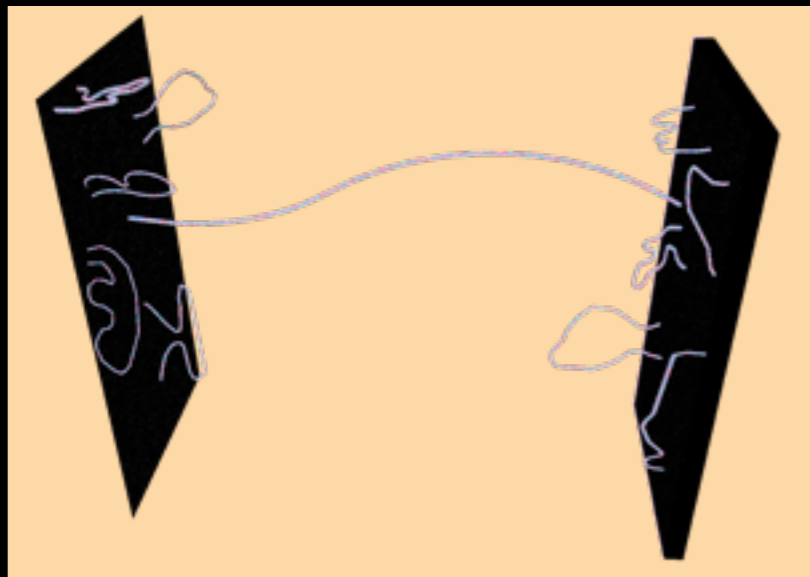
- Vorhersage von ‚schwarzen Löchern‘
 - Teilchen die am LHC erzeugt werden könnten
- Streuung an Kompaktifizierten Extra-Dimensionen
 - Kaluza-Klein Tower / Anregungen (= stehende Wellen in Extra-Dimension)

Bisher nicht beobachtet :(

- Ein fundamentales Objekt:
 - String (Saite)
 - Größe ~ Planck Länge: 10^{-35}m



ab ~1980 bis heute



- Können offen oder Geschlossen sein
 - Angeheftet auf „Welt-Brane“
 - Schwingungsmoden entsprechen Beobachtbaren Teilchen
 - Branen leben in 11 Dimensionalen Raum
 - M-Theorie
- Sehr Einfacher, eleganter Ansatz
 - Vereinheitlichung aller bekannten Kräfte (beinhaltet Quanten-Gravitation)
 - Unglaublich schwer zu Berechnen. Bisher keine Überprüfbaren Vorhersagen

Wo ist die Antimaterie?

- Bekannte **Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie** kann beobachtete Materie im Universum nicht Erklären.
- CP - Verletzung der schwachen Wechselwirkung
 - **Teilchen und Anti-Teilchen werden Leicht unterschiedlich behandelt**
 - LHCb untersucht dies (u.a.)
- **Muss Wechselwirkungen außerhalb des Standardmodells geben!**



Wo ist die Antimaterie?



- Bekannte **Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie** kann beobachtete Materie im Universum nicht Erklären.
- CP - Verletzung der schwachen Wechselwirkung
 - **Teilchen und Anti-Teilchen werden Leicht unterschiedlich behandelt**
 - LHCb untersucht dies (u.a.)
- **Muss Wechselwirkungen außerhalb des Standardmodells geben!**



- => **Wie viel Energie ist im Universum?**

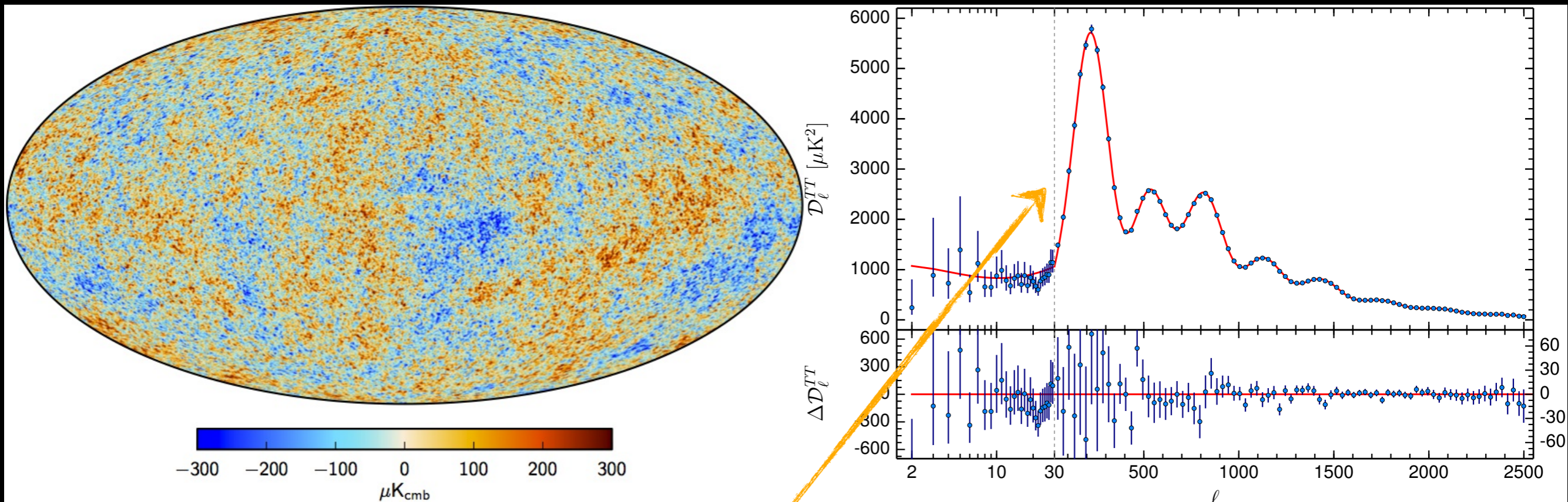
Bekannte Teilchen - Antiteilchen asymmetrie:

Erzeugte Menge an Materie / Antimaterie im Urknall > **totale Energiedichte**

- Beobachtungen der Kosmischen Hintergrundstrahlung:

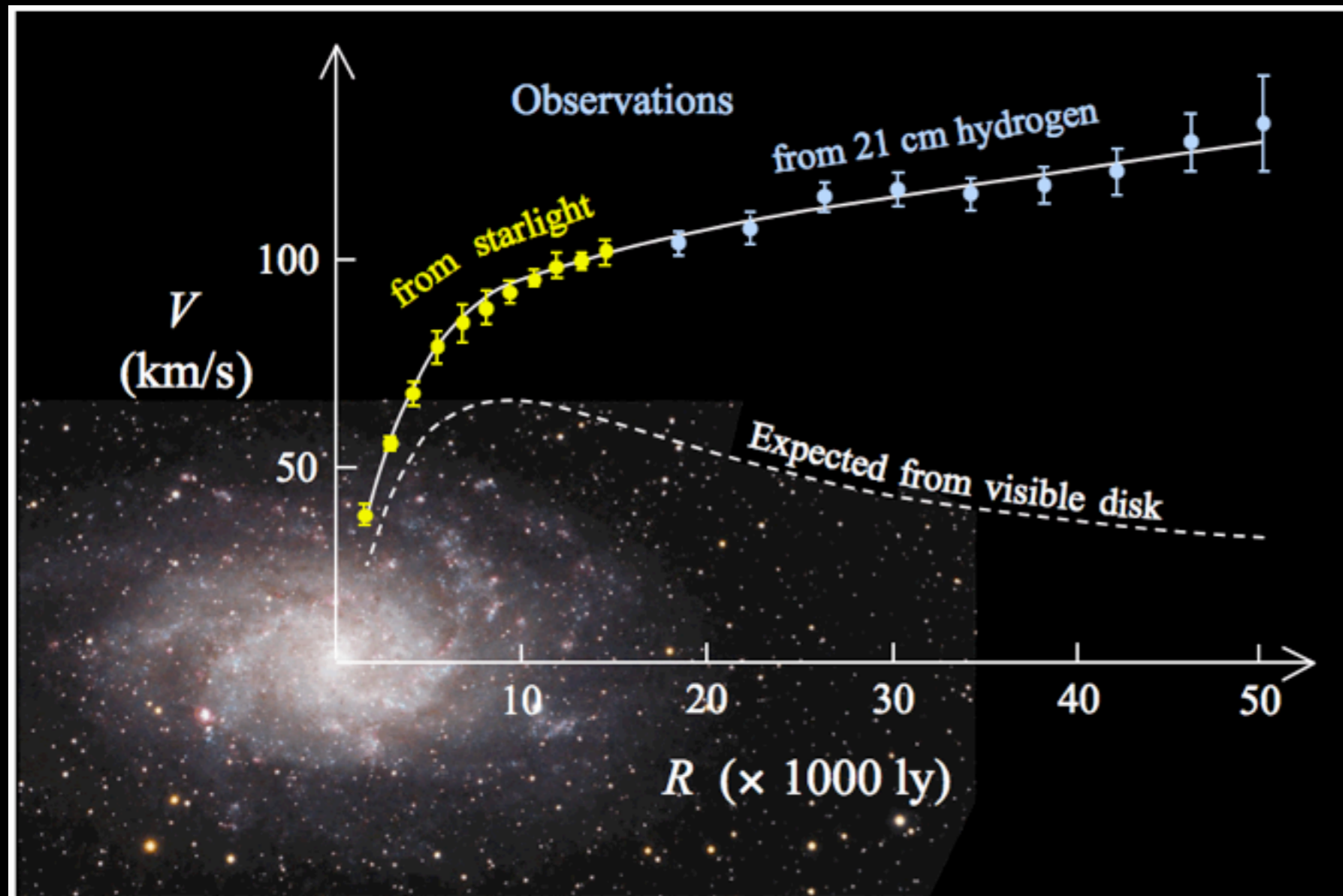
WMAP /
Planck:
2010 / 2015

- Universum kühlt ab => Neutrale Atome => Durchsichtig
- Strahlung von diesem Zeitpunkt: Durchquert Universum, Wellenlänge durch Ausdehnung des Raums gedehnt: Röntgen → Mikrowellen



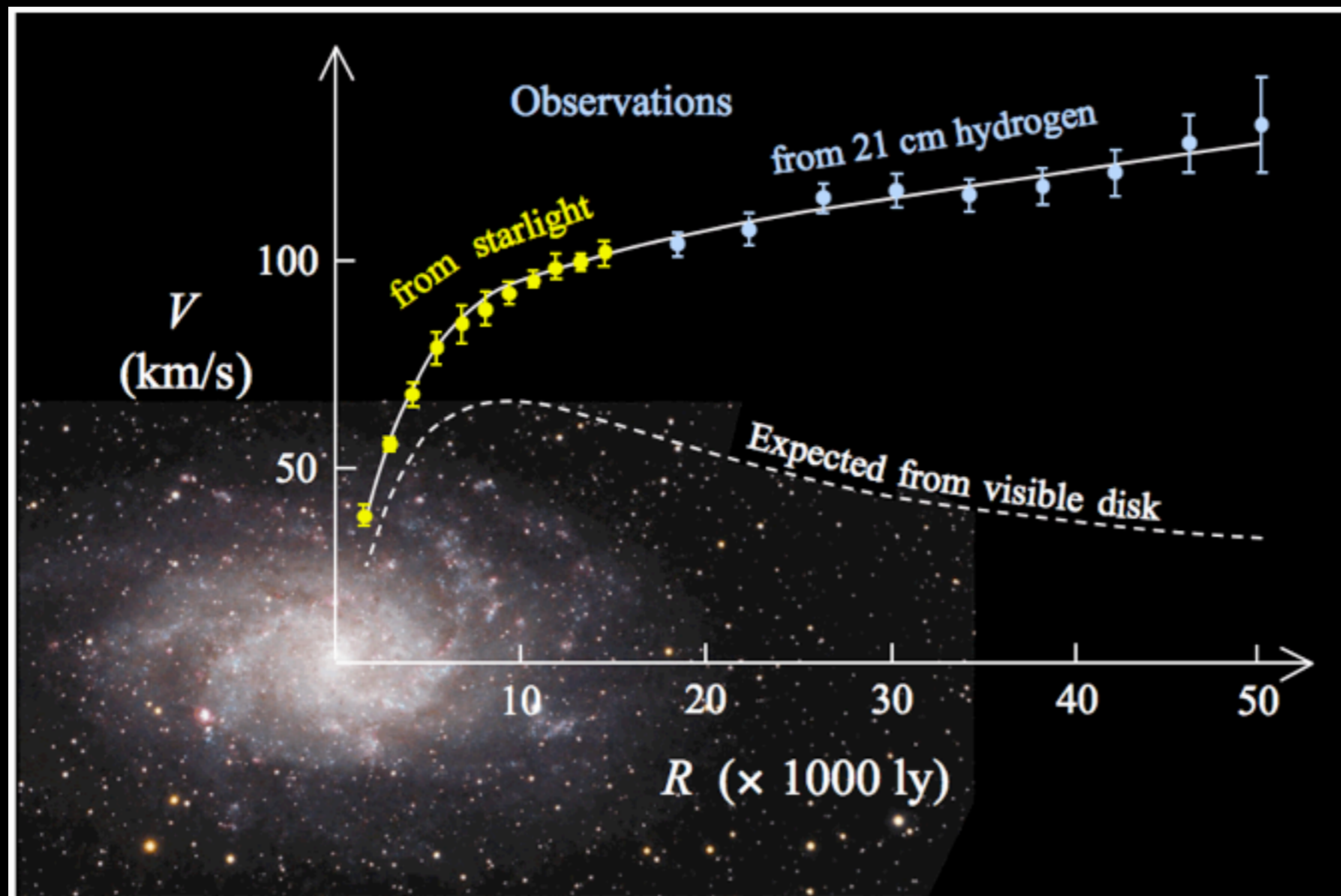
- Fit des Λ CDM Modells an Daten. Parameter: Baryon-Dichte, Materie-Dichte, Raumkrümmung,

Apropos Dunkle Materie



- Gravitationszentrum
- Per „Weak-Lensing“

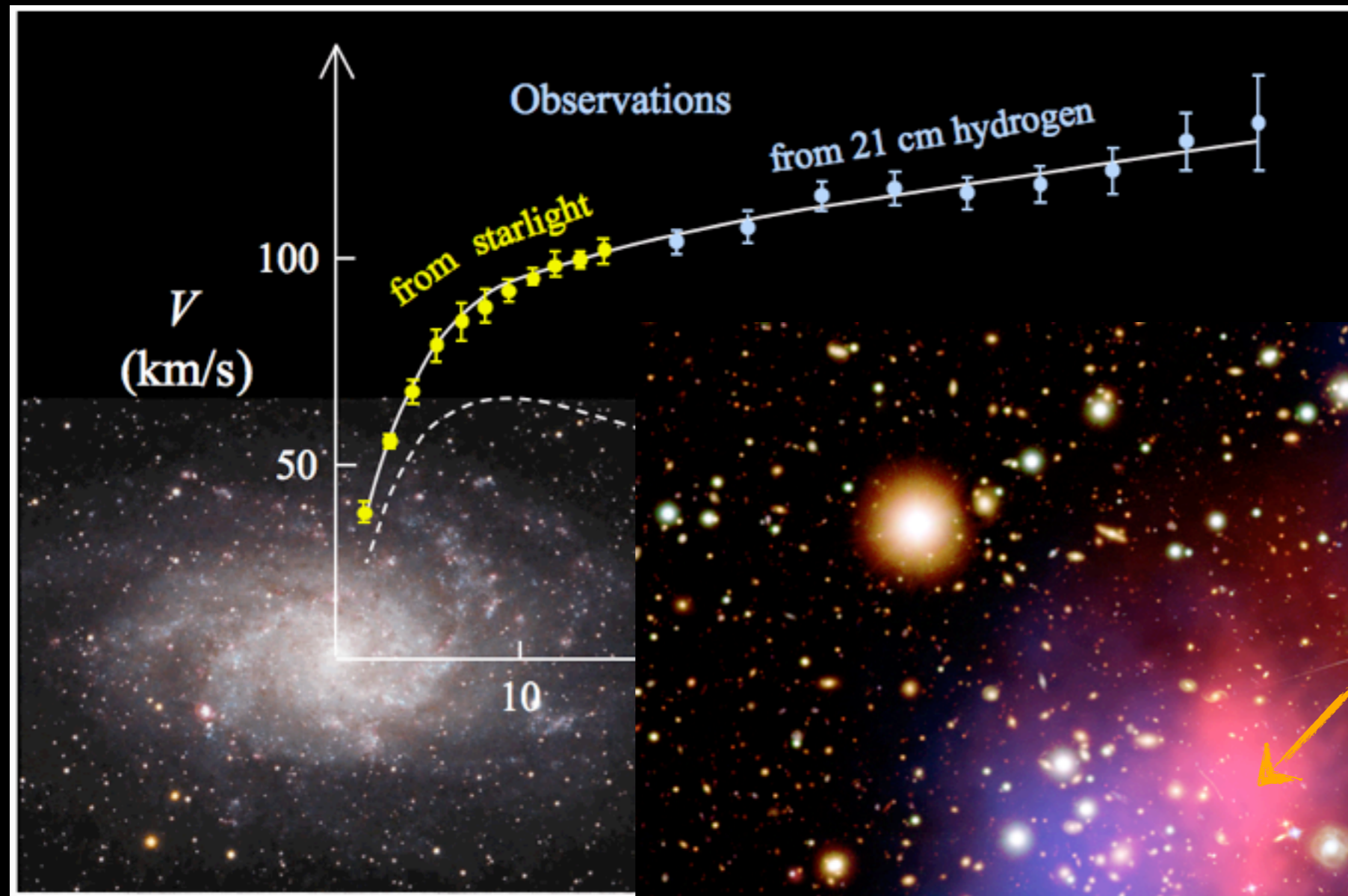
Apropos Dunkle Materie



- X-ray Emission von heisem Gas
- höchste Baryonendichte

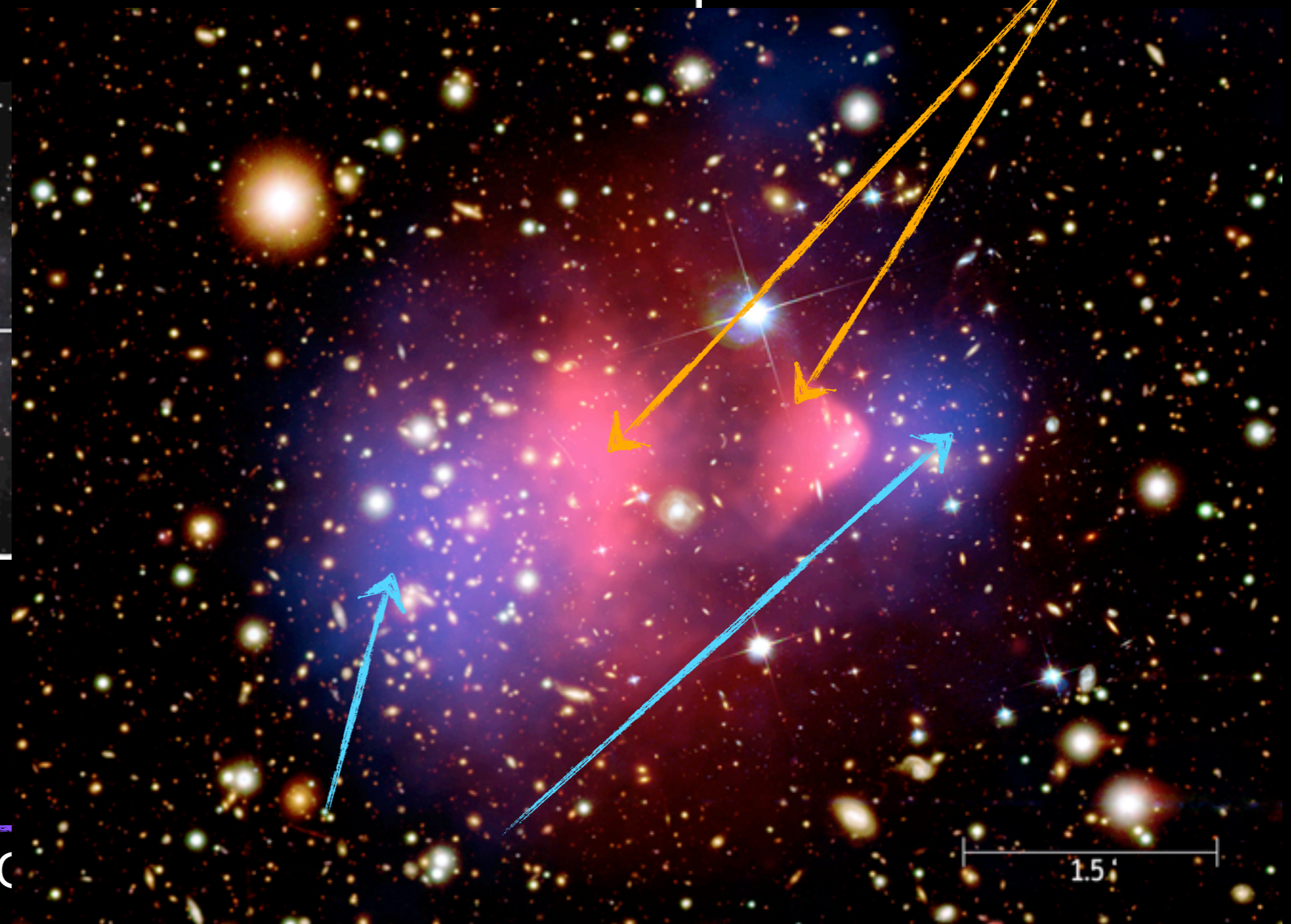
- Gravitationszentrum
- Per „Weak-Lensing“

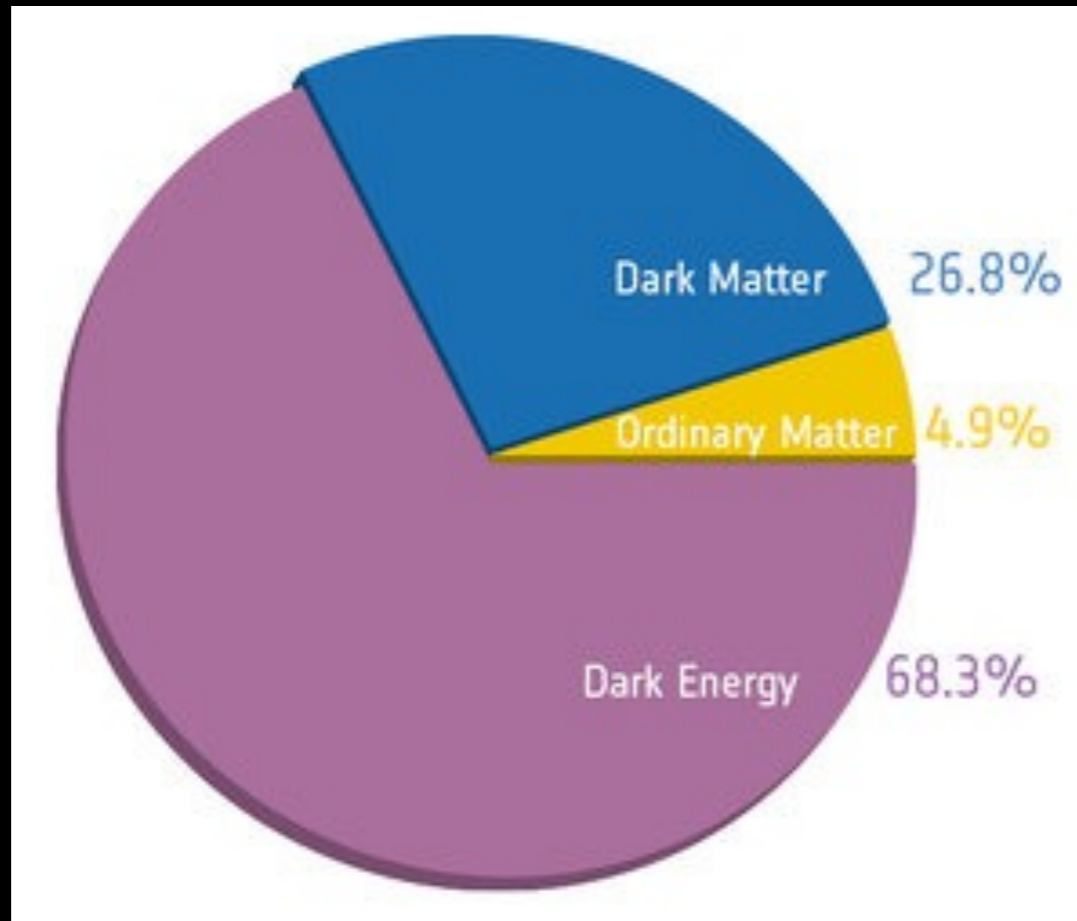
Apropos Dunkle Materie



- X-ray Emission von heisem Gas
- höchste Baryondichte

• ()
- für „weak-lensing“





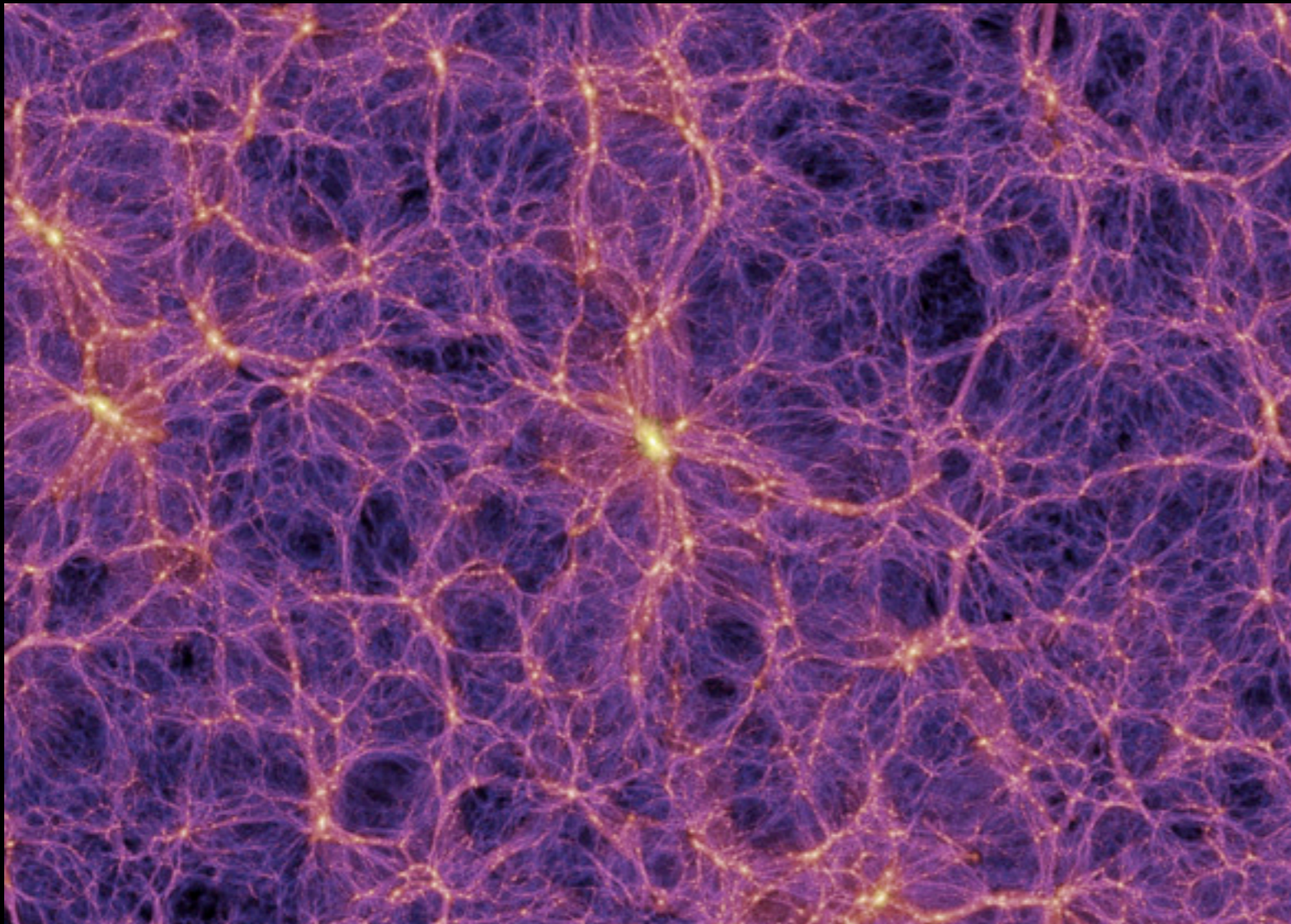
Dunkle Materie ?

Baryonen

Dunkle Energie ???

- Mehrere Kandidaten + Erweiterungen des SM zur Beschreibung DM

- Eigenschaften:
 - Massiv (Gravitation)
 - Wechselwirken schwach

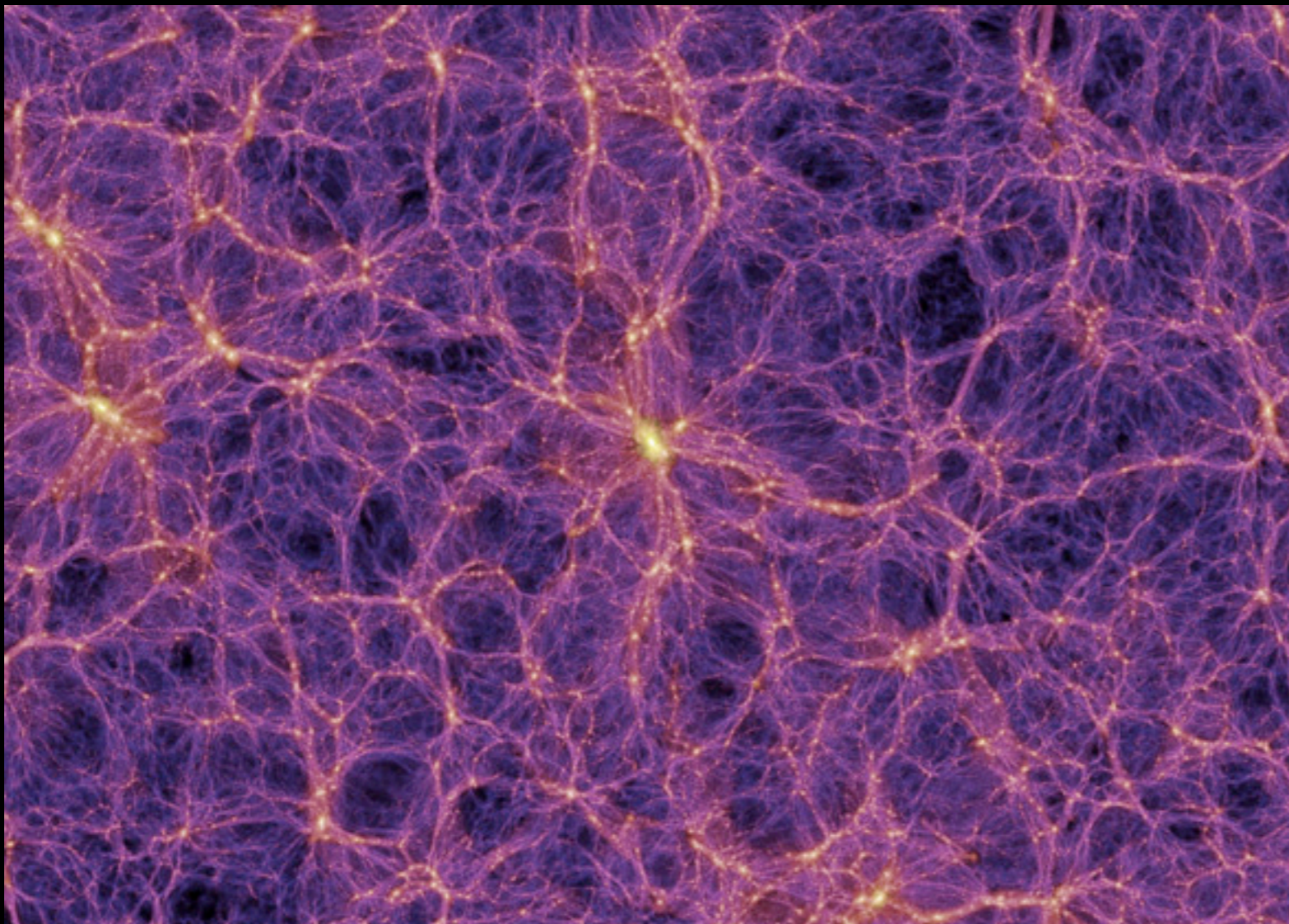


- Eigenschaften:

- Massiv (Gravitation)

→ Neutrinos?

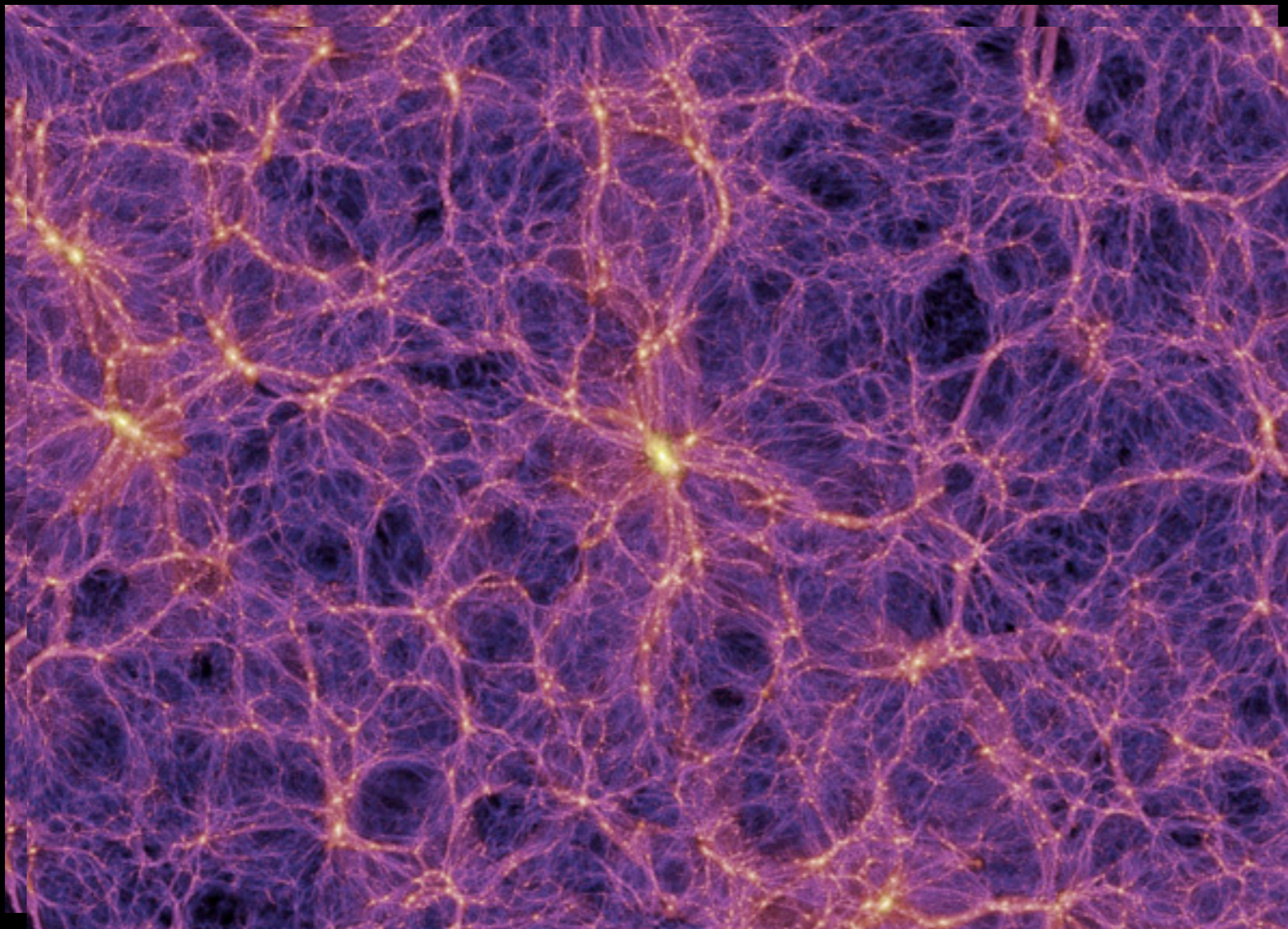
- Wechselwirken schwach



- Eigenschaften:
 - Massiv (Gravitation)
 - Wechselwirken schwach

→ Neutrinos?

Nein! Nur nicht-relativistische Teilchen tragen zur Strukturbildung bei!



- Eigenschaften:

- Massiv (Gravitation)
- Wechselwirken schwach
- ~Nichtrelativistisch
 - Ansätze mit ‚heißer‘ dunkler Materie existieren

- Kandidatenliste:

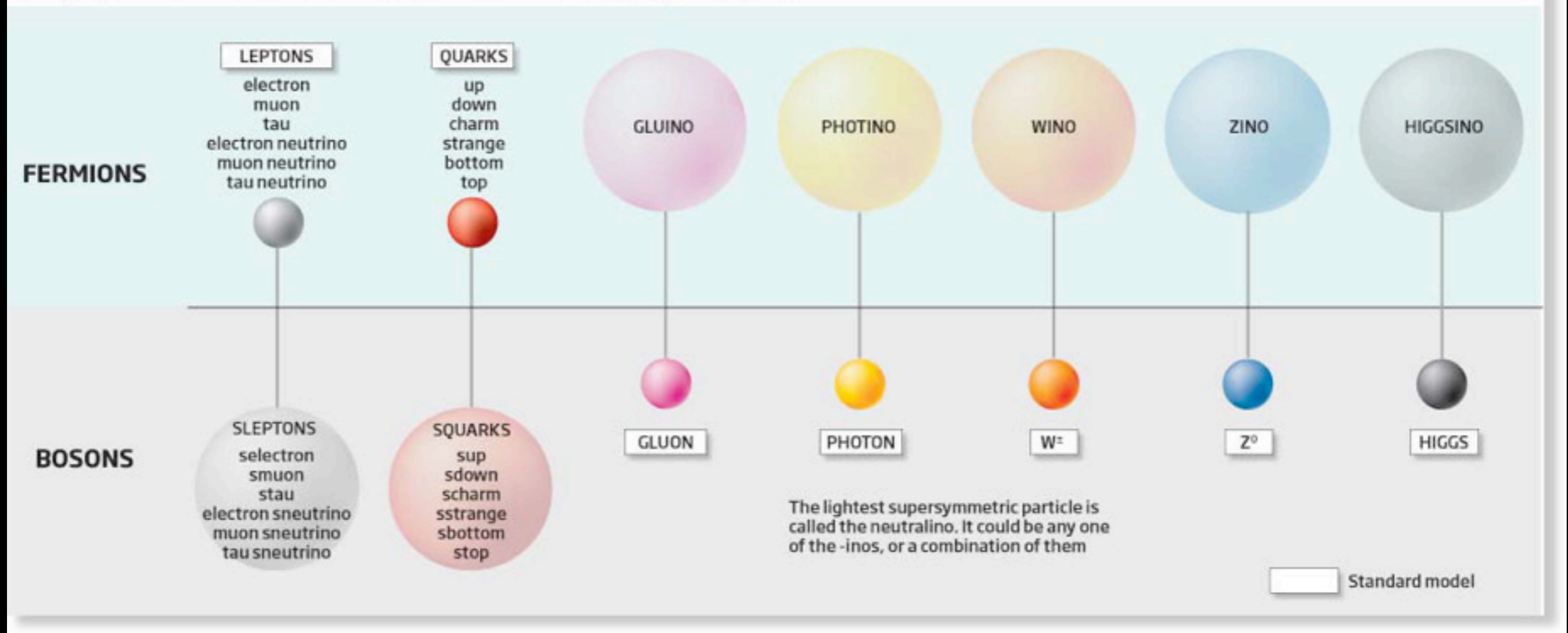
- **WIMPs** (Lightest Supersymmetric Particle?)
- **Axionen**
- Sterile Neutrinos

- **Neue Symmetrie:**
 - Jedem Boson ($S=0,1$) wird ein neues Fermion ($S=1/2$) zugeordnet, und umgekehrt

Particle zoo

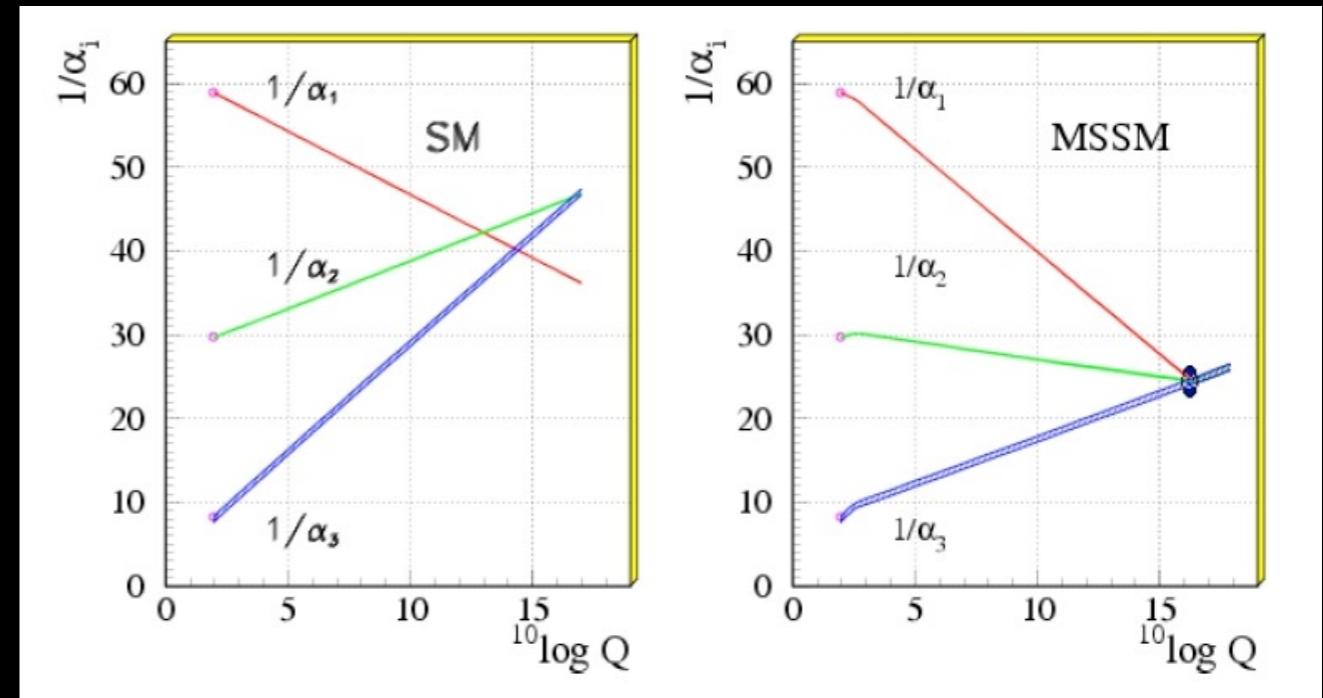
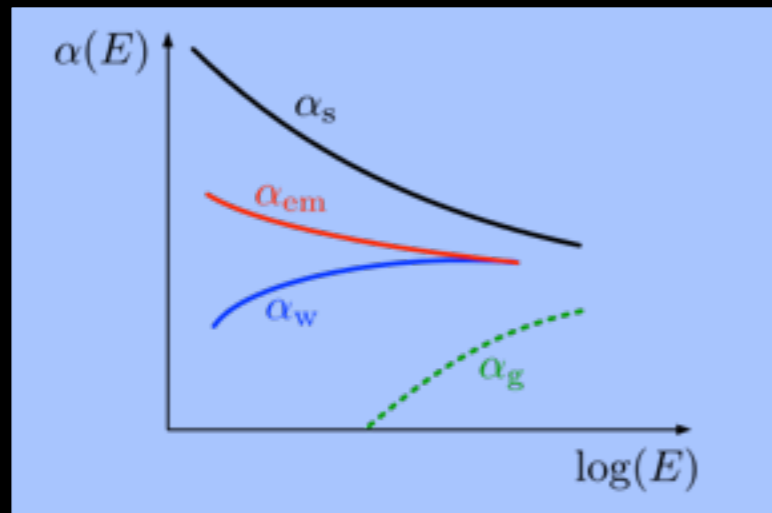
©NewScientist

Particles are divided into two families called bosons and fermions. Among them are groups known as leptons, quarks and force-carrying particles like the photon. Supersymmetry doubles the number of particles, giving each fermion a massive boson as a super-partner and vice versa. The LHC is expected to find the first supersymmetric particle

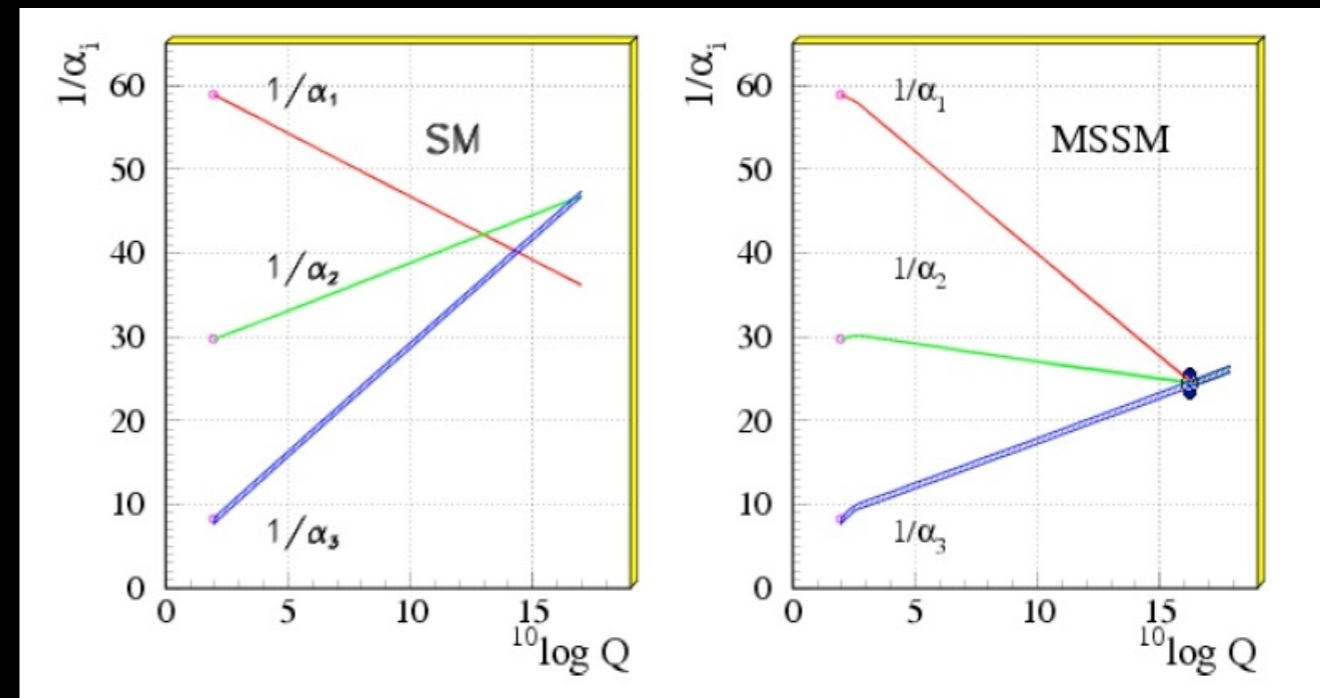
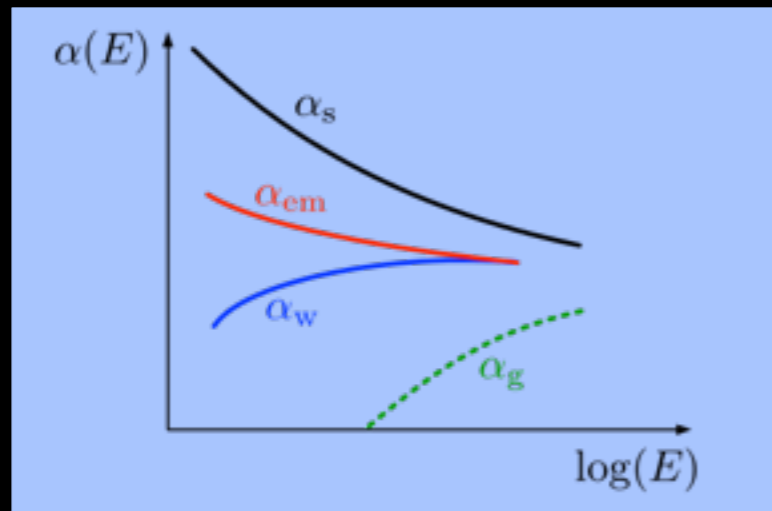


Supersymmetrie

- „Komplettiert“ SM → alle Symmetrien ausgeschöpft
- Neue Teilchen Beeinflussen das „laufen“ der Kopplungen
 - Große Vereinheitlichung möglich

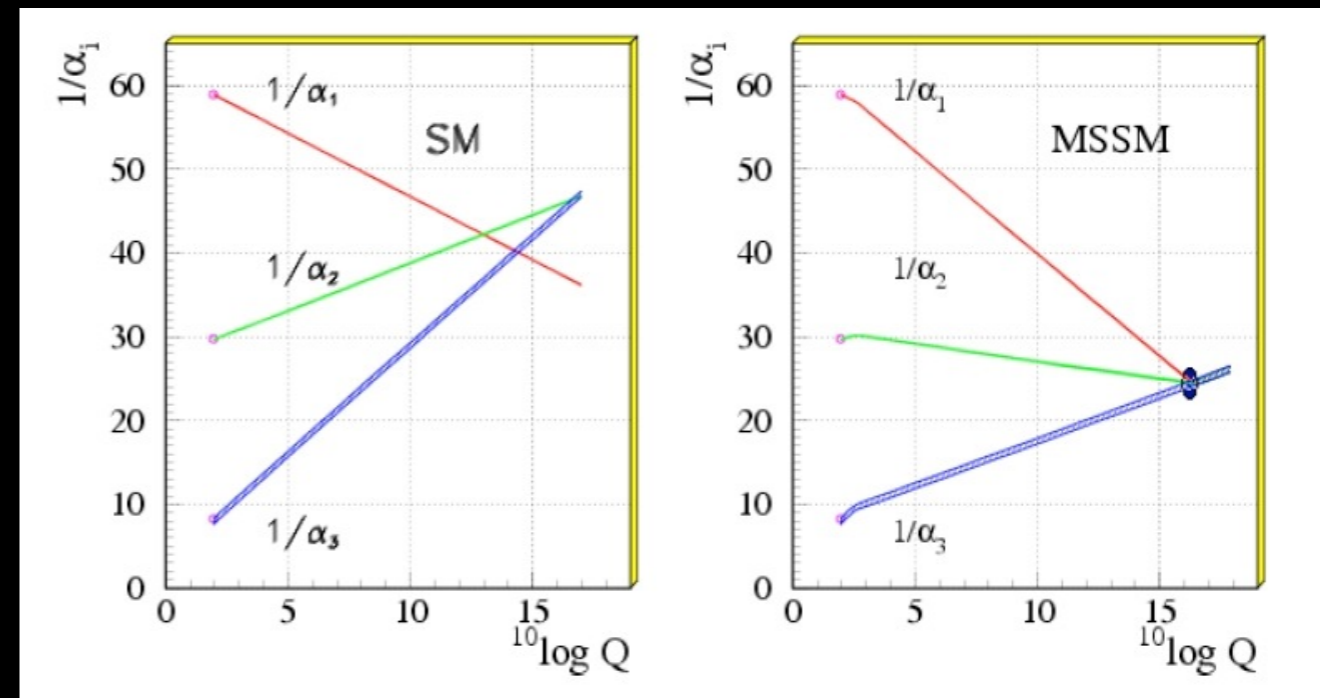
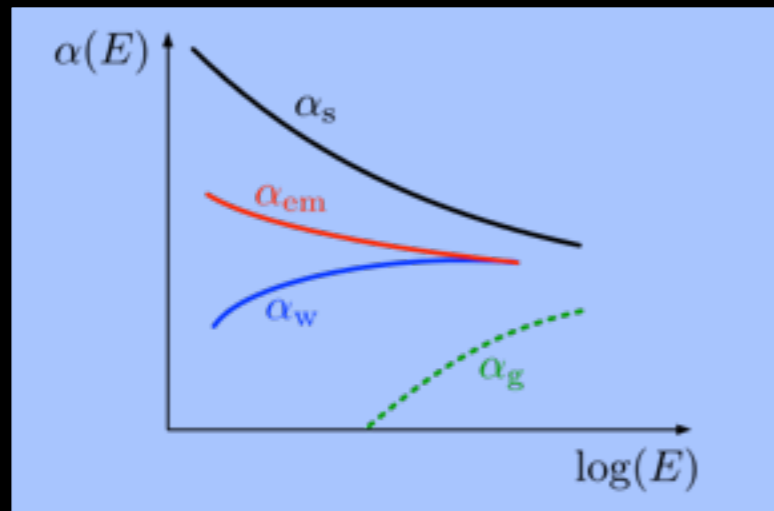


- „Komplettiert“ SM → alle Symmetrien ausgeschöpft
 - Neue Teilchen Beeinflussen das „laufen“ der Kopplungen
 - Große Vereinheitlichung möglich



- Neue Erhaltungsgröße: R-Parität (+1 für Teilchen, -1 für Superpartner)
 - Leichtestes Supersymmetrisches Teilchen kann nicht Zerfallen!
 - Kandidat für Dunkle Materie

- „Komplettiert“ SM → alle Symmetrien ausgeschöpft
- Neue Teilchen beeinflussen das „laufen“ der Kopplungen
 - Große Vereinheitlichung möglich



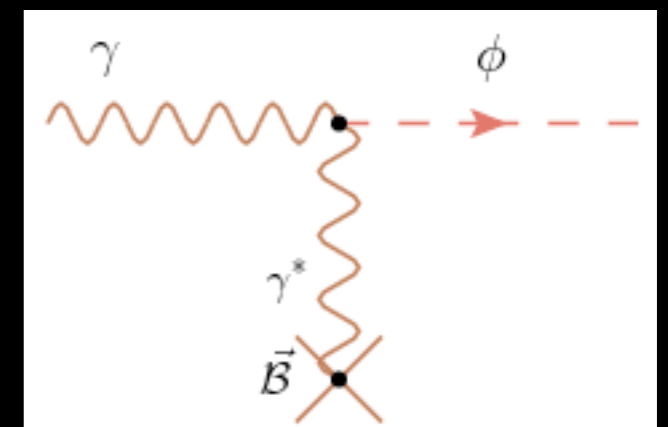
- Neue Erhaltungsgröße: R-Parität (+1 für Teilchen, -1 für Superpartner)
 - Leichtestes Supersymmetrisches Teilchen kann nicht Zerfallen!
 - Kandidat für Dunkle Materie

- Parameterraum für Supersymmetrie Riesig
 - Parameter bestimmen Teilchenmasse, sind (fast) beliebig
 - Nicht ausschließbar

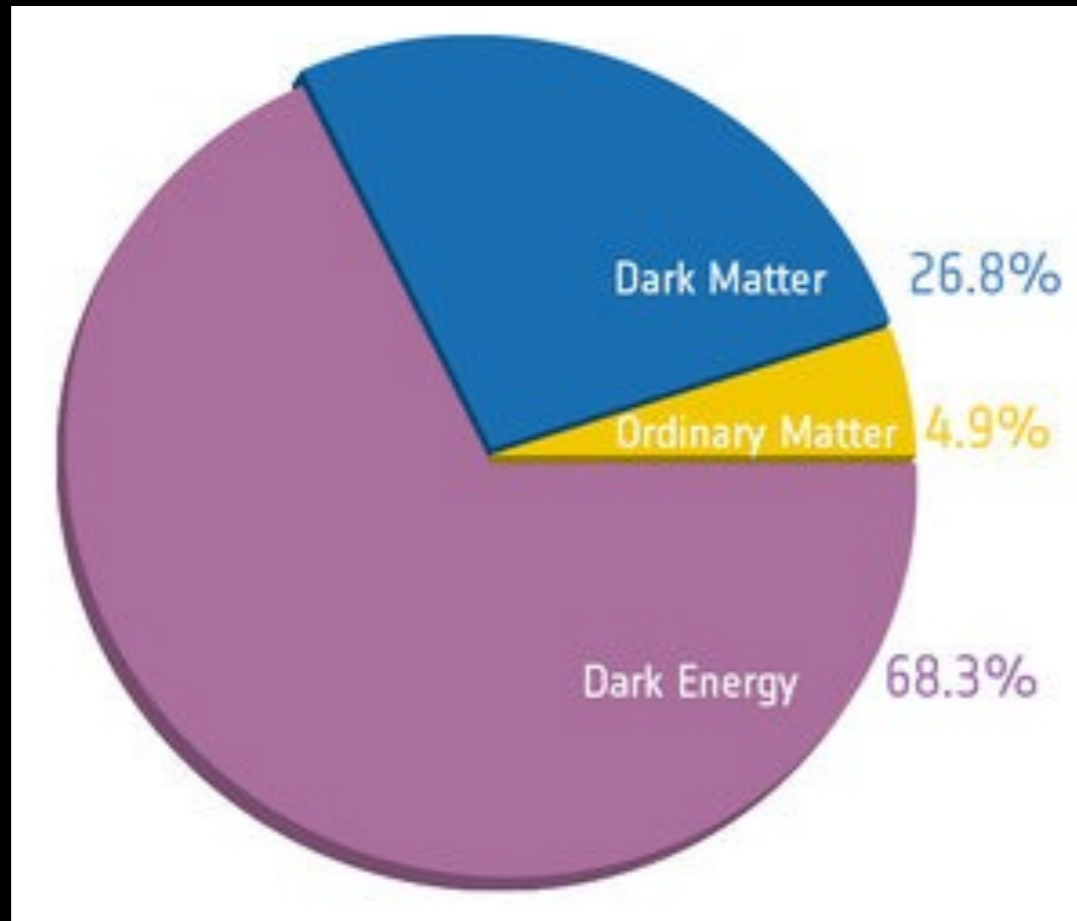
- Lösen das „starke CP Problem“
- QCD erlaubt CP verletzende Reaktionen. Stärke beschrieben durch Parameter θ
 - CP Verletzung \rightarrow Elektrisches Dipolmoment des Neutron
 - Experimentell: $\text{EDM}(n) < 10^{-25} \text{ e}\cdot\text{cm}$
 - Wieso? **Erscheint nicht „natürlich“ (fine tuning)**

- Lösen das „starke CP Problem“
- QCD erlaubt CP verletzende Reaktionen. Stärke beschrieben durch Parameter θ
 - CP Verletzung \rightarrow Elektrisches Dipolmoment des Neutron
 - Experimentell: $EDM(n) < 10^{-25} \text{ e}\cdot\text{cm}$
 - Wieso? **Erscheint nicht „natürlich“** (fine tuning)
- Einführung eines weiteren komplexen, skalaren Feldes
 - Mit Dazugehöriger **Symmetrie**, die **spontan gebrochen** ist (Analog zum Higgs Mechanismus)
 - θ wird ‚dynamisch‘ exakt 0
 - Neues, massives Teilchen: **Axion**
 - Kandidat für dunkle Materie

Peccei, Quinn:
1977



Primakov Effekt



Dunkle Materie ?

Baryonen

Dunkle Energie ???

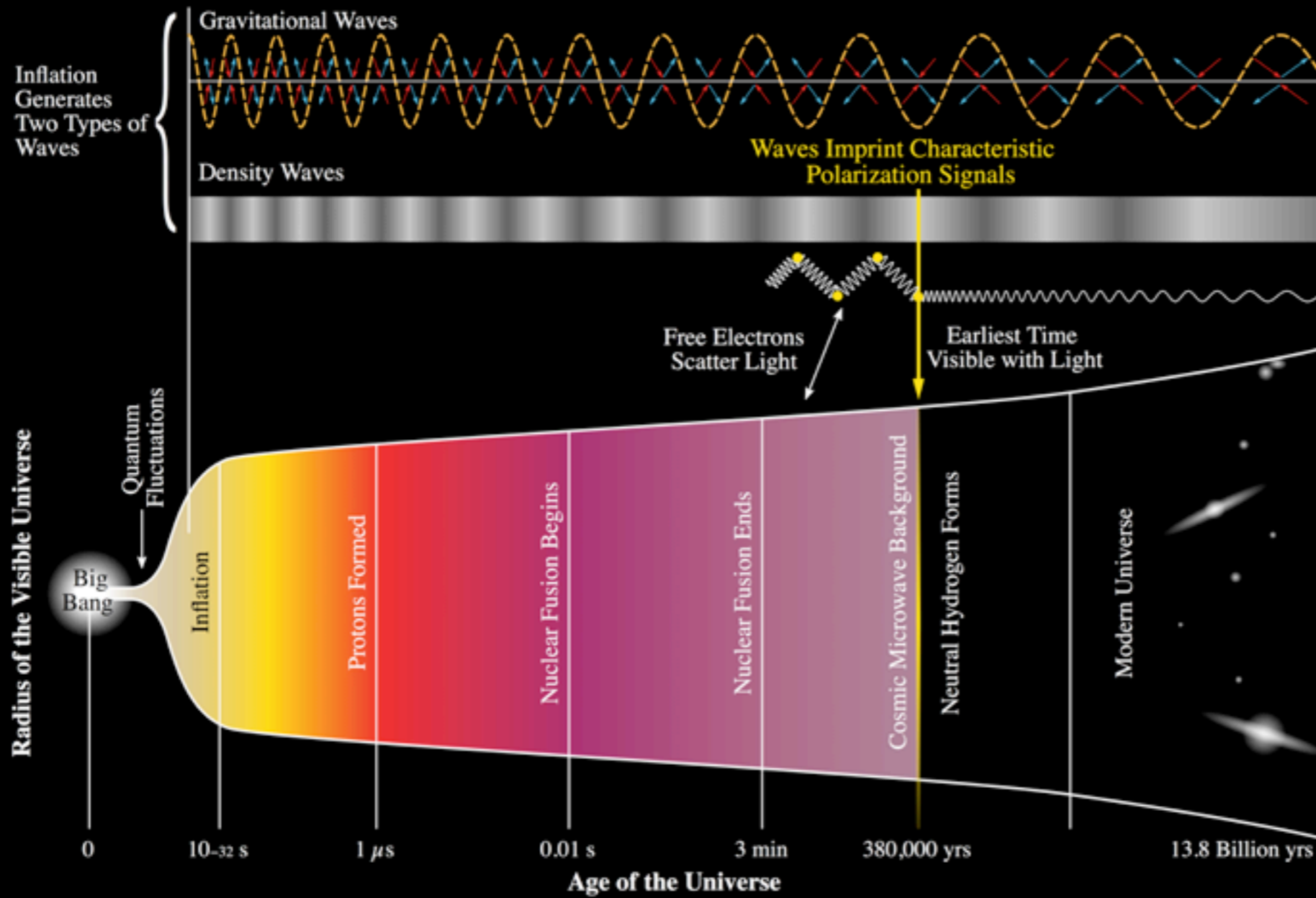
- Dunkle Energie ist völlig Unerklärt
 - Zusammenhang mit Inflation?
 - Vakuumfluktuationen?
 - Quintessenz ?

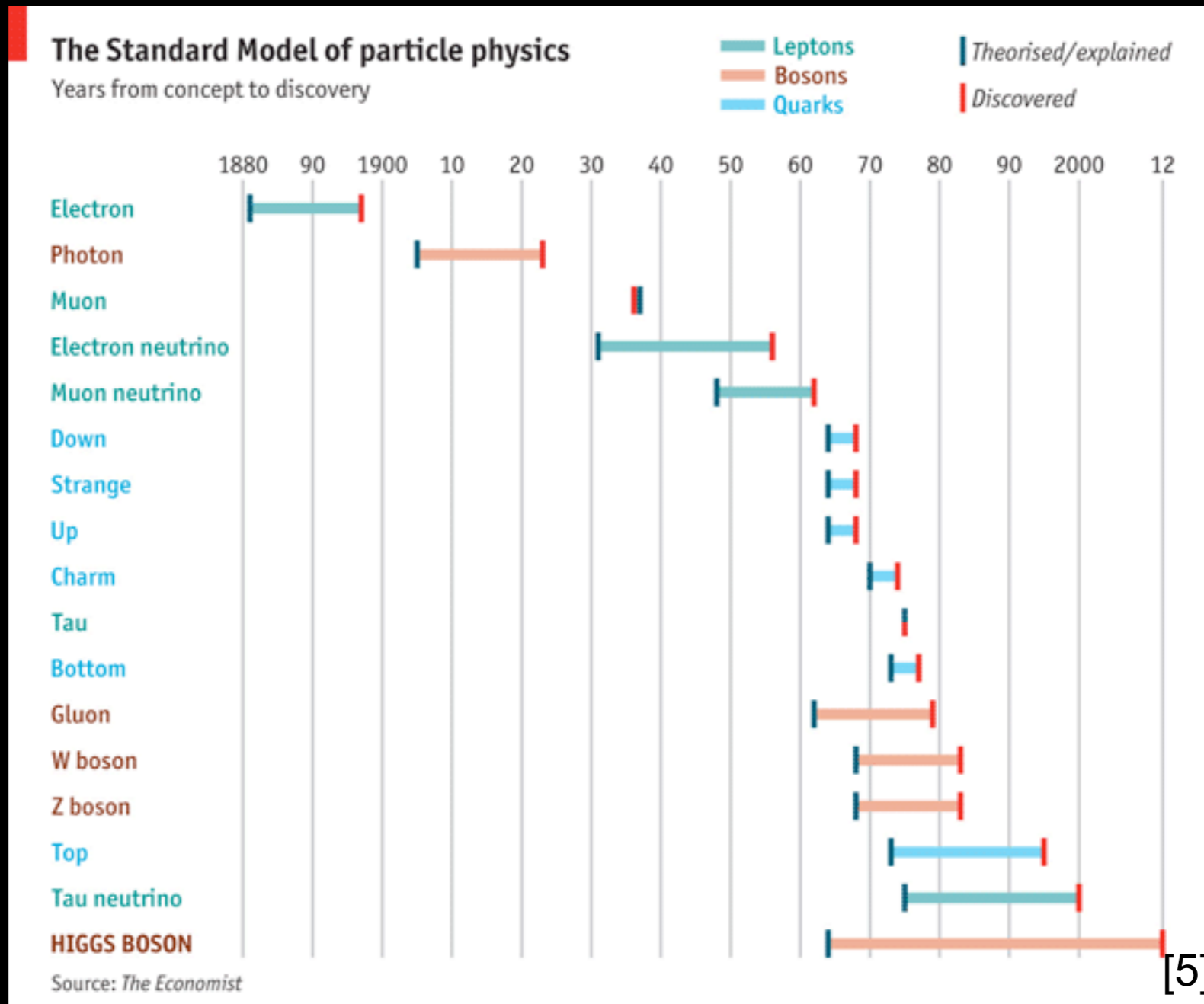
- Gravitation lässt sich nicht innerhalb des SM beschreiben
 - Wieso ist Gravitation so schwach?
- Wieso gibt es keine Antimaterie im Universum?
- Der Dunkle Sektor? (Dunkle Materie, Dunkle Energie)
- Was ist die Natur der Neutrinos?
- Wieso gibt es 3 Familien?
- Wieso haben Teilchen unterschiedliche Masse?
-
-
-

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unsolved_problems_in_physics

The End

History of the Universe





- [2] Rainer Müller - Eigene Grafik, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8742784>
- [3] Von Kurzon - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32422326>
- [4] By Sch (Own work) [CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>) or GFDL (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>)], via Wikimedia Commons
- [5] Economist: <http://www.economist.com/blogs/graphicdetail/2012/07/daily-chart-1>
- [6] CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=75046>
- [7] <http://www.orbitals.com/orb/>
- [8] C. Anderson, PhysRev.43.491, <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.43.491>
- [9] Own work by uploader Emokderivative work: WikiMichi (talk) - Casimir plates.svg, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8900709>
- [10] <http://www.cosmiq.de/qa/show/934946/wie-funktionieren-austauschteilchen/>
- [11] Determination of the energy measurement accuracy for charged particles by their range in nuclear photoemulsion A.S. Barabash (Moscow, ITEP) et al.. Nov 2012. 8 pp. Phys.Inst. 39 (2012) 300-304 <http://arxiv.org/abs/1211.1471v2>
- [12] ATLAS-CONF-2013-041, <https://atlas.web.cern.ch/Atlas/GROUPS/PHYSICS/CONFNOTES/ATLAS-CONF-2013-041/>
- [13] M. Breidenbach, J. I. Friedman, H. W. Kendall, et. al. Phys. Rev. Lett. 23, 935
- [14] Von MissMJderivative work: Polluks (talk) - Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11307906>
- [15] D. Perkins: Introduction to high energy physics