

Teilchen

Felder

Universum

Technologien

1895

e^-

Elektromagnetismus

Schwache WW

Starke WW

Detektor

Beschleuniger

1900

Brownsche Bewegung

Photon

Radioaktivität

1905

Atom

Spezielle Relativität

1910

Kern

1920

p^+

Quantenmechanik
Welle-Teilchen Dualismus
Spin/Fermion-Boson

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1930

e^+

n

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa
 π Austausch

Galaxien;
Ausdehnung des Universums

Zyklotron

1940

μ^-

Dunkle Materie

Kernfusion 9

1950

τ^-

p^-

π
Teilchen-zoo

QED

P, C, CP Verletzung

Big Bang Nukleosynthese

Synchrotron

1960

ν_e

ν_μ

u d s

Higgs

W Bosons

Kosmische Hintergrundstrahlung

Blasenkammer

e^+e^- Ring

1970

τ^-

STANDARD MODE 7

c

b

GUT

EW Vereinigung

QCD

Farbladung

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

1975

τ^-

STANDARD MODE 7

c

b

SUSY

W

Z

g

Inflation

Prozessrechner

p^+p^- Ring

1980

Superstrings

3 Teilchenfamilien

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Moderne Detektoren

WWW

1990

ν_τ

ν Masse

Dunkle Energie

GRID

2010

Gerade war das Standard-Modell mit zwei Familien von Leptonen und Quarks etabliert ...

...da fand man am SLAC ein drittes Lepton!

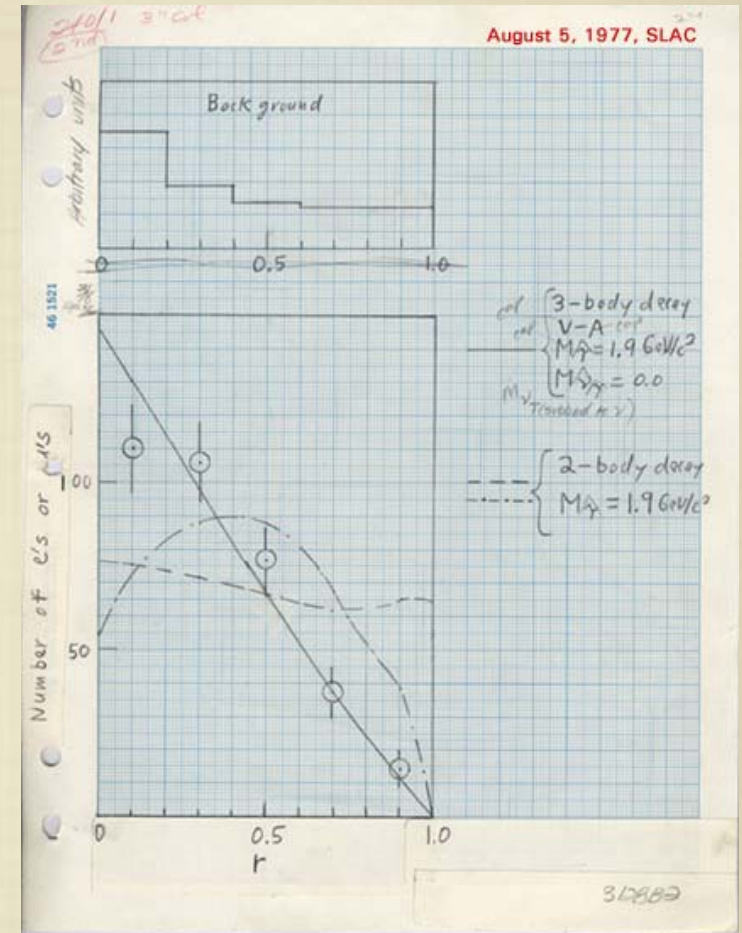
Ein neues 'schweres Elektron' mit $M = 3500 m_e$

... und wer hatte das bestellt?



MIT DER NEUEN LOGIK DER LEPTON-QUARK SYMMETRIE

ein weiteres Neutrino (the 'tau neutrino'),
und zwei weitere Quarks ('top' and 'bottom').



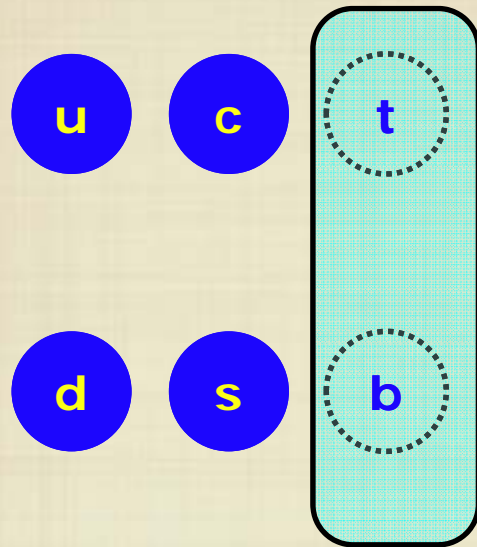
Marty Perl's Logbook

TEILCHENSPEKTRUM

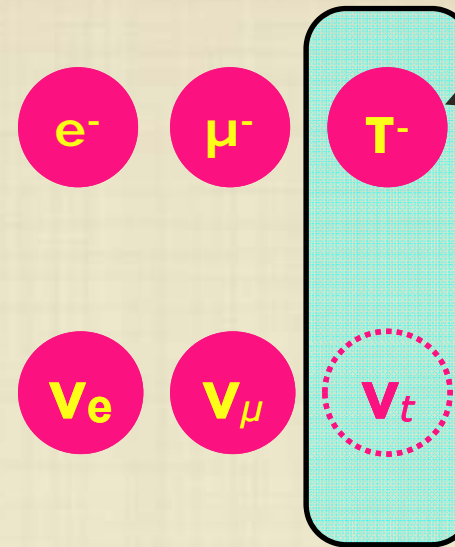
Quarks

1975

Die Suche nach den fehlenden Familienmitgliedern begann ...

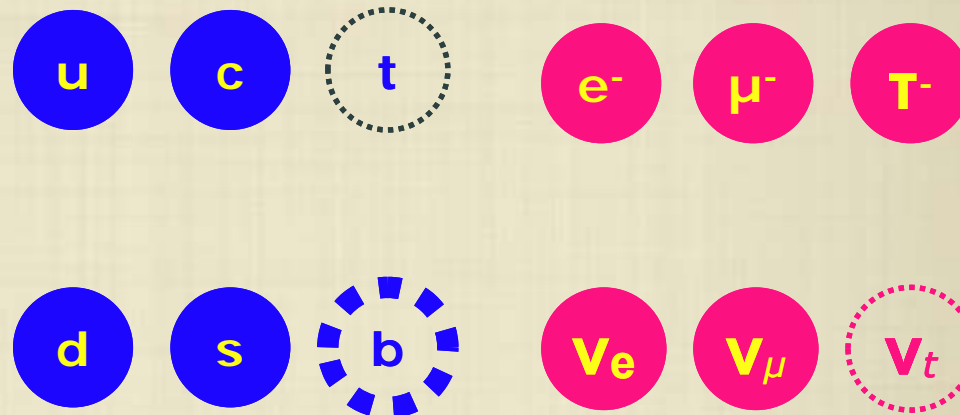
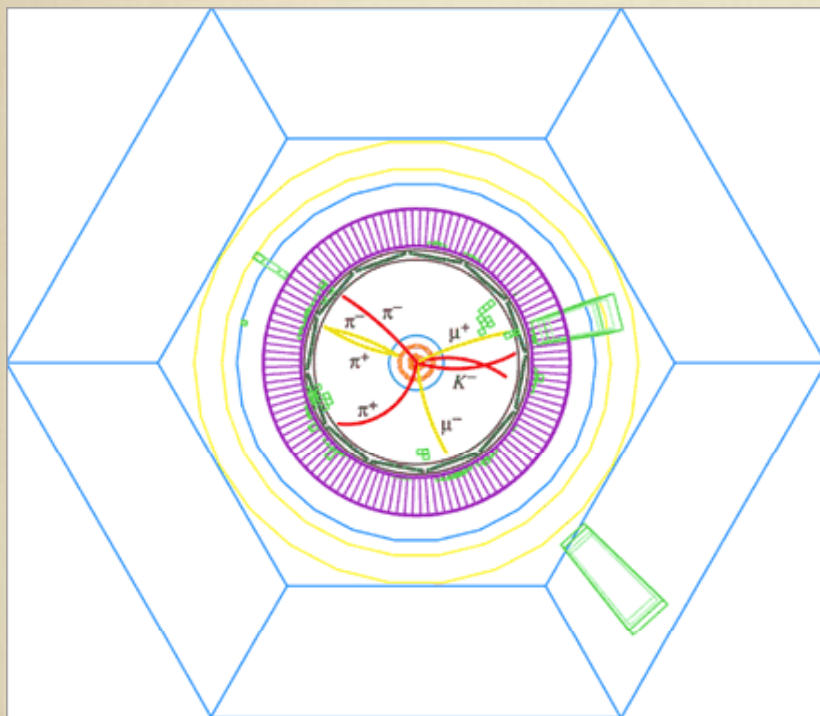


Quarks



Leptons

Entdeckung des 'Bottom' Quark (Fermilab)



Quarks

Leptons

1977 entdeckten Physiker am Fermilab (nahe Chicago) ein neues Meson (genannt 'Upsilon')

Seine Eigenschaften passten auf den 'Steckbrief' eines Mesons, das aus einem bottom/anti-bottom Quark Paar bestand.

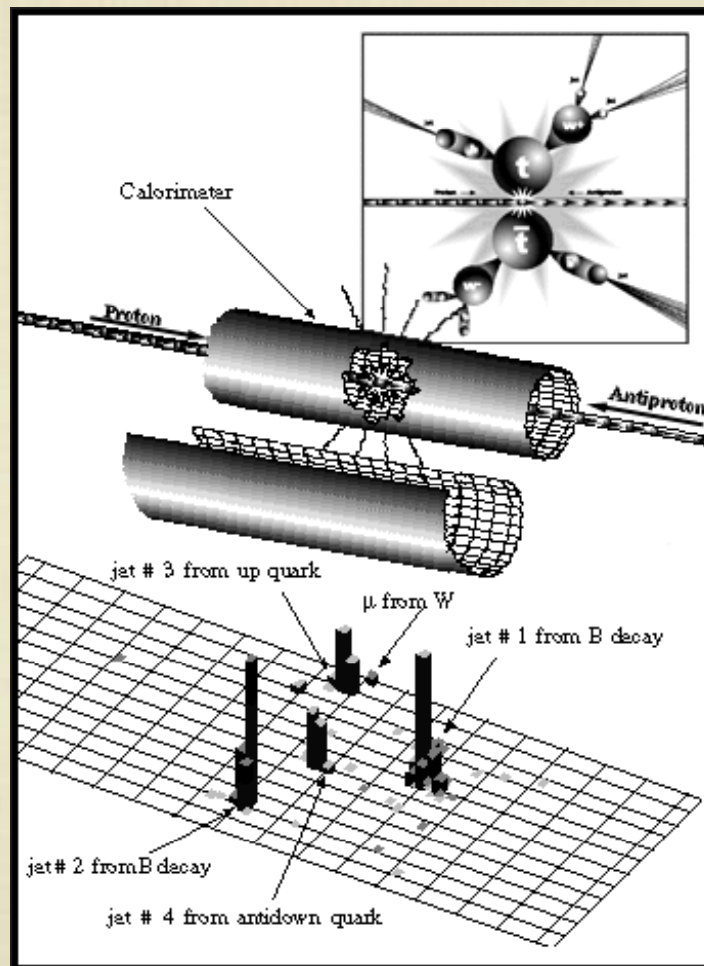
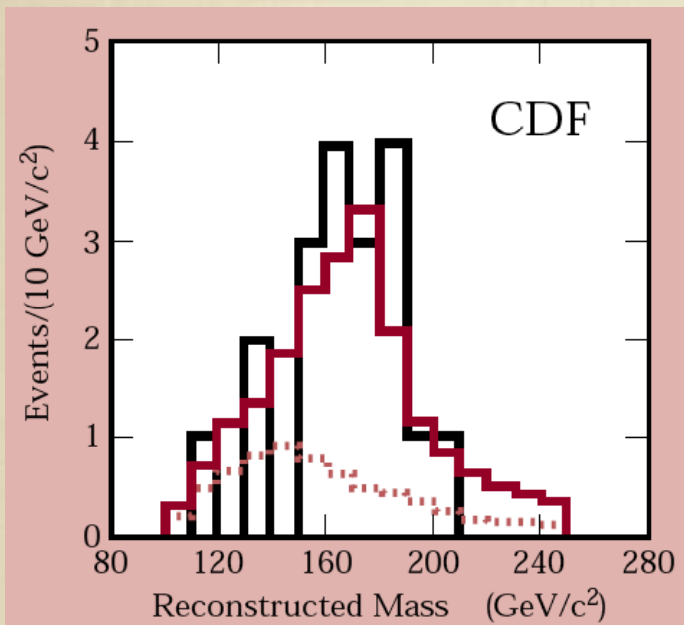
Daraus folgte dass das Bottom quark die elektrische Ladung $-1/3$ und eine Masse von ca. 5 GeV hatte.

TEILCHENSPEKTRUM

Quarks

1995

Entdeckung des 'Top' Quark (Fermilab)



Quarks

Kinetische Gastheorie

Boltzmann

Maxwell

Elektromagnetismus

Newton

Teilchen

Felder

Universum

Technologien

1895

e^-

1900

Brownsche Bewegung

Elektromagnetismus

Schwache WW

Starke WW

Photon

Radioaktivität

1905

Atom

Spezielle Relativität

1910

Kern

Quantenmechanik
Welle-Teilchen Dualismus
Spin/Fermion-Boson

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Geiger

Wolken

1920

p^+

1930

e^+

n

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa π Austausch

Galaxien; Ausdehnung des Universums

Zyklotron

1940

μ^-

Neutrino trail

Dunkle Materie

Kernfusion

1950

τ^-

ν_e

Teilchenzoo

QED

P, C, CP Verletzung

Big Bang Nukleosynthese

Blasenkammer

Synchrotron

1960

ν_μ

u d s

Higgs

W Bosons

Kosmische Hintergrundstrahlung

Vieldrahtkammer

e^+e^- Ring

1970

c

GUT

EW Vereinigung

QCD Farbladung

Prozessrechner

Strahlkühlung

1975

τ^+

STANDARD MODEL

SUSY

Inflation

1980

b

Superstrings

W

Z

g

Inhomogenität der Hintergrundstrahlung (COBE, WMAP)

Moderne Detektoren

p^+p^- Ring

1990

t

3 Teilchenfamilien

2000

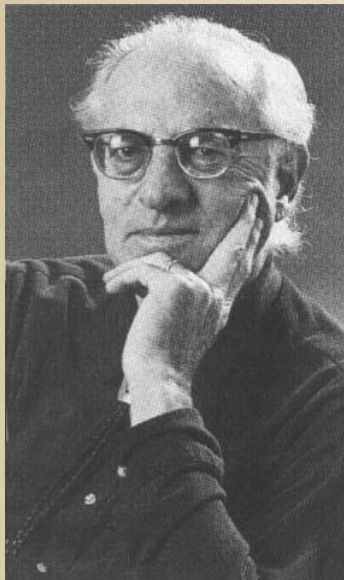
ν_τ

ν Masse

Dunkle Energie

GRID

2010



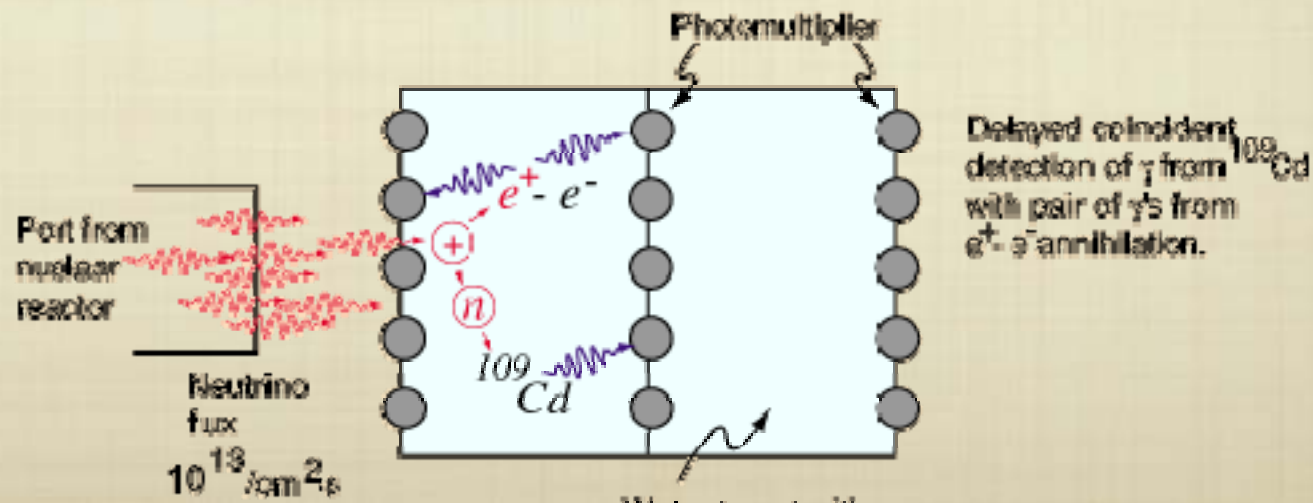
Fred Reines

Die Geschichte der Neutrinos

Entdeckung des (Elektron) Neutrinos



Kernreaktoren (n-Zerfall) sind eine starke Anti-Neutrino-Quelle
 Koinzidenz-Signal von Positron-Annihilation und Neutroneneinfang





Jack Steinberger, 1962

"Muon" Neutrino

Leptonenerhaltungssatz: es muss auch ein 'Muon'-Neutrino geben

OBSERVATION OF HIGH-ENERGY NEUTRINO REACTIONS AND THE EXISTENCE OF TWO KINDS OF NEUTRINOS*

G. Danby, J.-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz,[†] and J. Steinberger[†]

Columbia University, New York, New York and Brookhaven National Laboratory, Upton, New York

(Received June 15, 1962)

In the course of an experiment at the Brookhaven AGS, we have observed the interaction of high-energy neutrinos with matter. These neutrinos were produced primarily as the result of the decay of the pion:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + (\nu/\bar{\nu}). \quad (1)$$

It is the purpose of this Letter to report some of the results of this experiment including (1) demonstration that the neutrinos we have used pro-

duce μ mesons but do not produce electrons, and hence are very likely different from the neutrinos involved in β decay and (2) approximate cross sections.

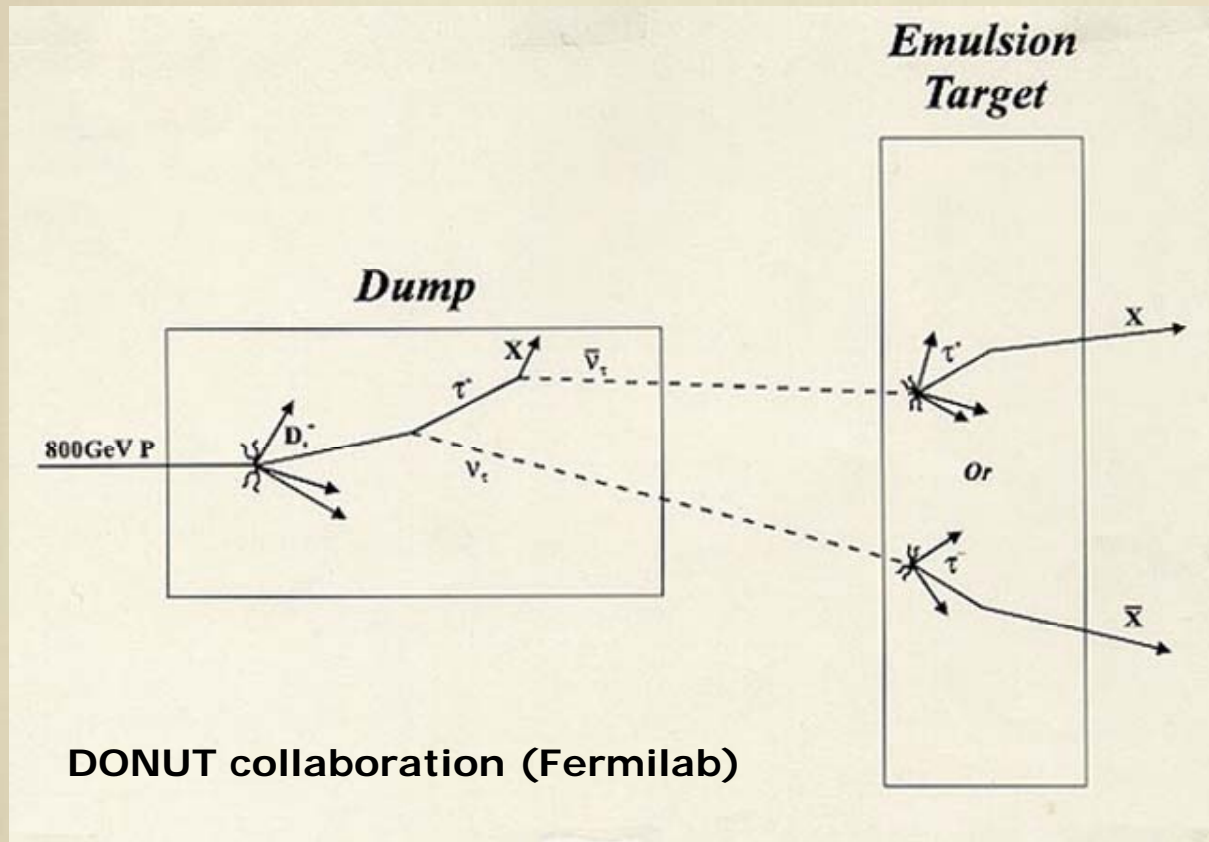
Behavior of cross section as a function of energy. The Fermi theory of weak interactions which works well at low energies implies a cross section for weak interactions which increases as phase space. Calculation indicates that weak interacting cross sections should be in the neigh-



Jack Steinberger, HST 2002

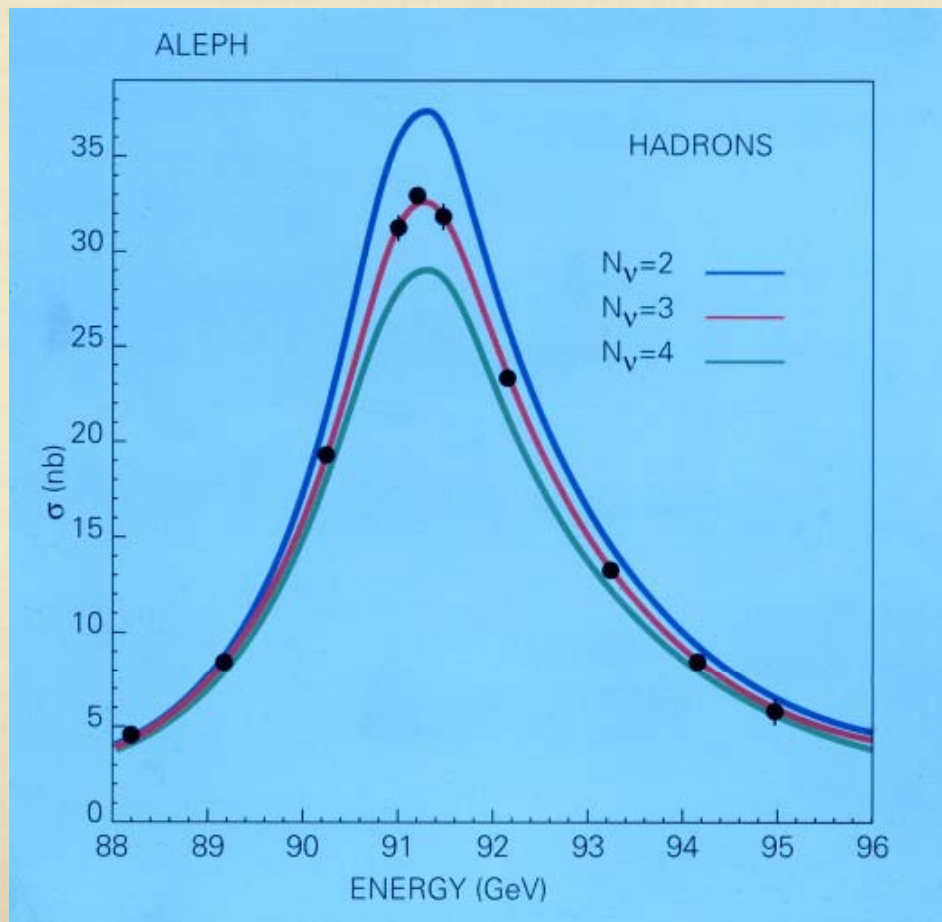
Haben Neutrinos eine Masse? Können sie ihre 'Flavour' wechseln ('Oszillationen') ?

Entdeckung des Tau-Neutrinos (2000)



Es gibt genau 3 Familien von Neutrinos (mit $M < 45$ GeV)

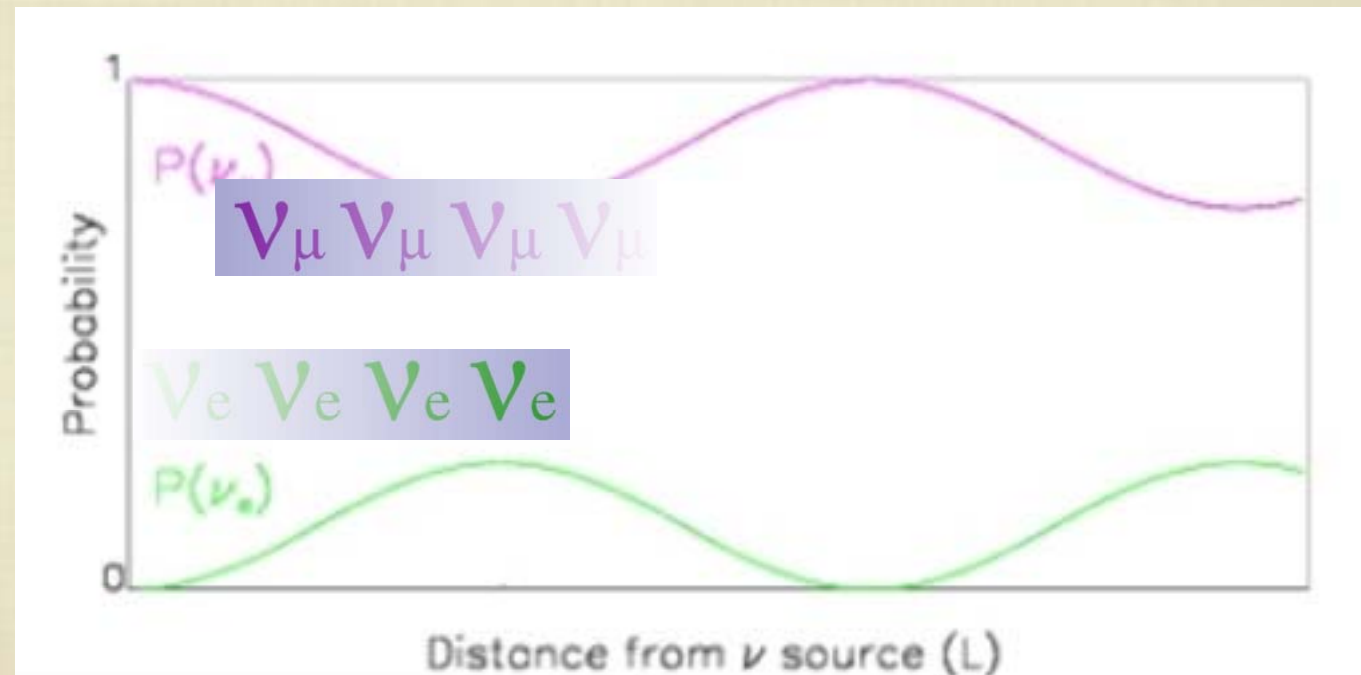
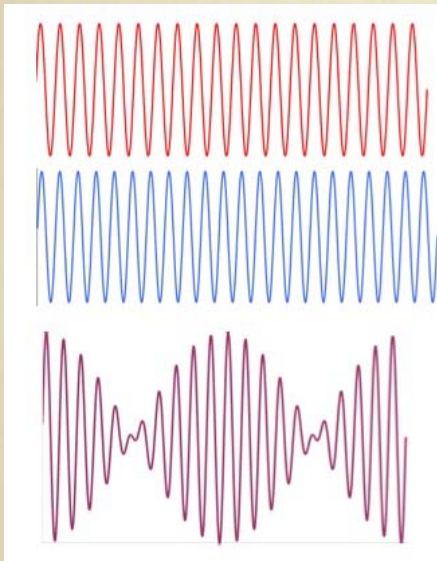
Am LEP wurde die Zerfallsbreite des Z^0 gemessen



Haben Neutrinos eine Ruhemasse ?



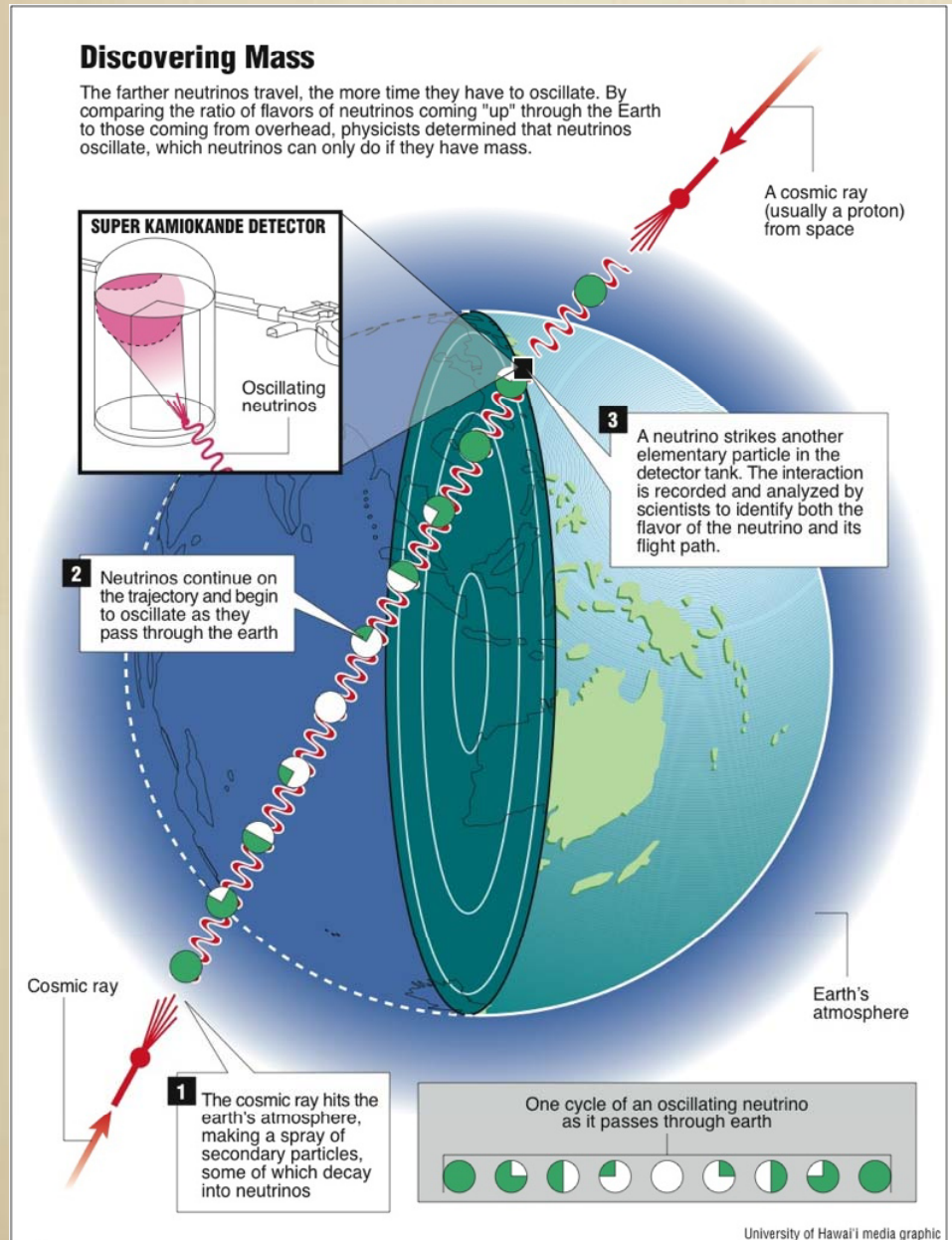
Neutrino-Oszillationen



Teilchen werden durch Wellen (mit definierter Frequenz) beschrieben

Wenn die Frequenz ähnlich ist, dann können zwei Teilchenwellen 'Schwebungen' erzeugen ---> Neutrino-Oszillationen

Entdeckung von Neutrino-Oszillationen



Muon-Neutrinos werden von kosmischen Strahlen in der oberen Atmosphäre und nachfolgendem Pion- und Muon-Zerfall erzeugt.

Beobachtung:

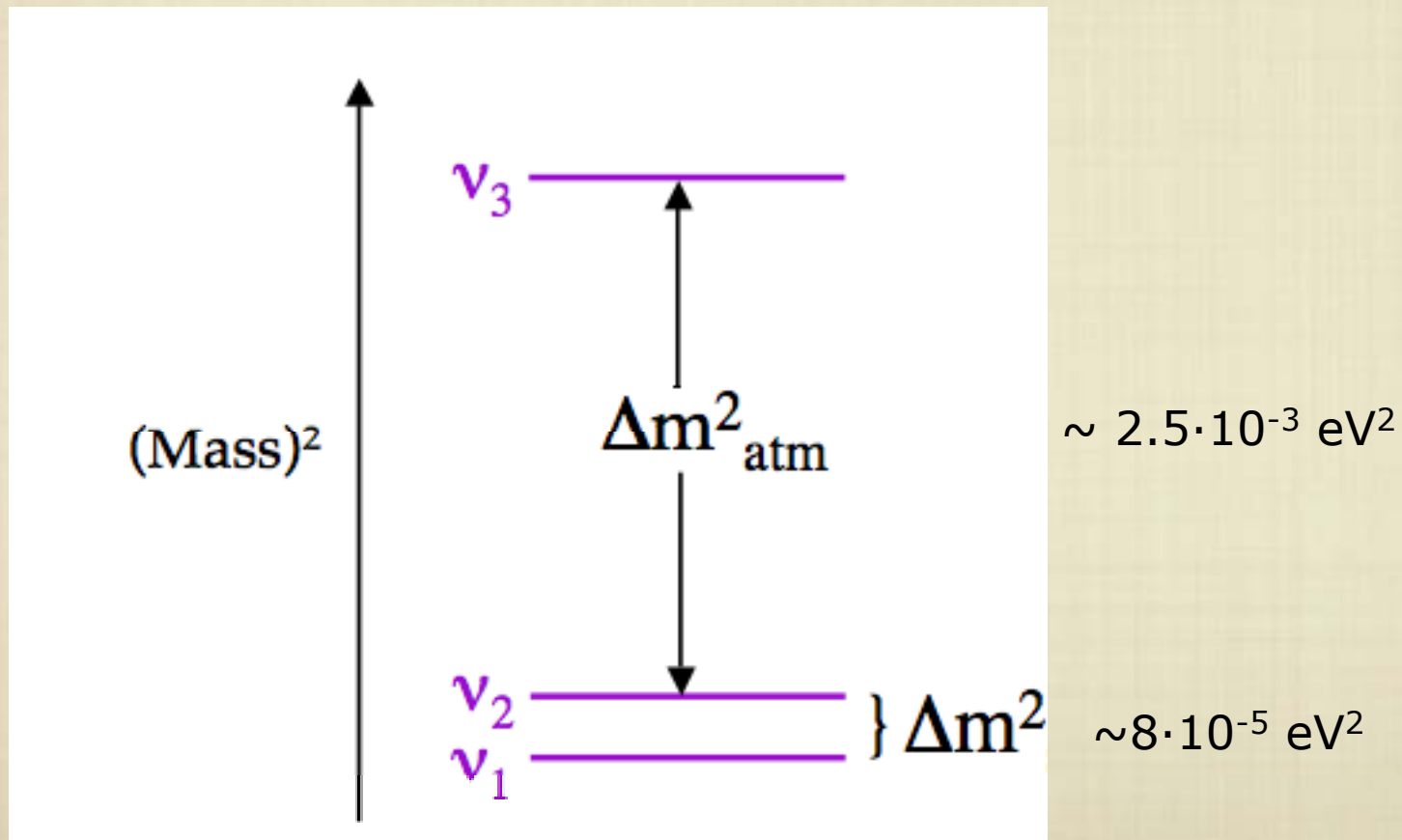
ein Defizit von etwa 50% dieser Muon-Neutrinos, die von "unten" kommen sollten (Erddurchquerer)

Erklärung:

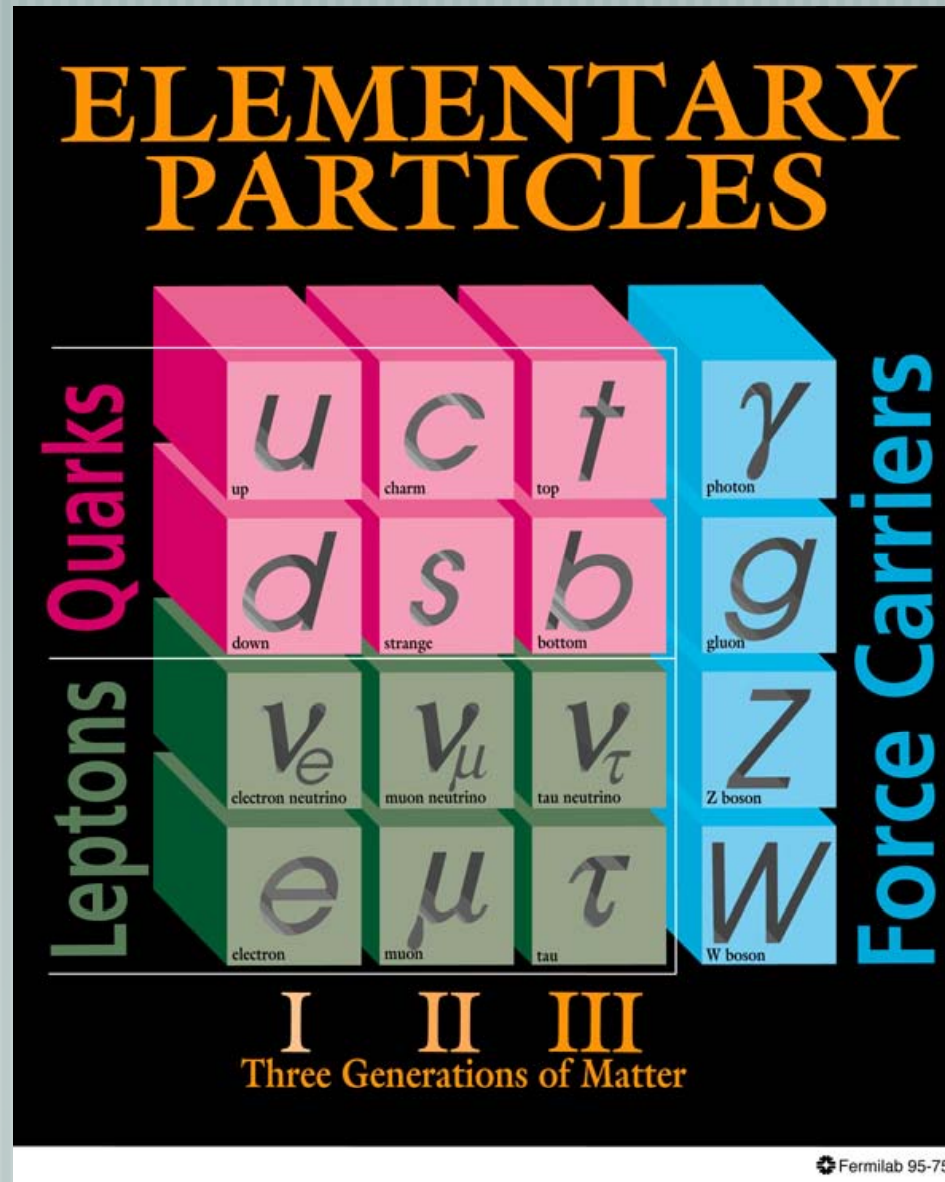
diese Muon-Neutrinos oszillieren in einen anderen Neutrino-Typ (z.B. Tau-Neutrinos)

Neutrinos besitzen eine Masse

Man kennt zwar ihre absolute Masse nicht (der Limit für das Elektron-Neutrino ist ca. 3 eV), aber man kennt die Massendifferenzen.



DAS STANDARD MODEL (2006)



Kinetic theory,
Thermodynamics

Boltzmann

Maxwell

Newton

Particles

Fields

Universe

Technologies

Electromagnetic Weak Strong

Detector Accelerator

1895

e^-

Brownian motion

Photon

Radio-activity

1900

1905

Atom

Special relativity

1910

Nucleus

Quantum mechanics
Wave / particle
Fermions / Bosons

1920

p^+

1930

e^+

n

Dirac
Antimatter

Fermi Beta-Decay

Yukawa
 π exchange

Cosmic rays

General relativity

Geiger

Cloud

Galaxies; expanding universe

Cyclotron

1940

μ^-

Dark Matter

Nuclear fusion

Big Bang Nucleosynthesis

Cosmic Microwave Background

Inflation

CMB Inhomogeneities (COBE, WMAP)

Dark Energy (?)

1950

τ^-

p^-

π
Particle zoo

QED

P, C, CP violation

Synchrotron

1960

ν_e

u d s

Higgs

W bosons

Cosmic Microwave Background

Bubble

e^+e^- collider

1970

ν_μ

c

GUT

EW unification

QCD Colour

Wire chamber

Beam cooling

1975

τ^-

STANDARD MODEL

SUSY

Superstrings

W

Z

g

Online computers

p^+p^- collider

1980

ν_τ

b

3 generations

Inflation

Modern detectors

1990

t

CMB Inhomogeneities (COBE, WMAP)

WWW

2000

ν mass

Dark Energy (?)

GRID

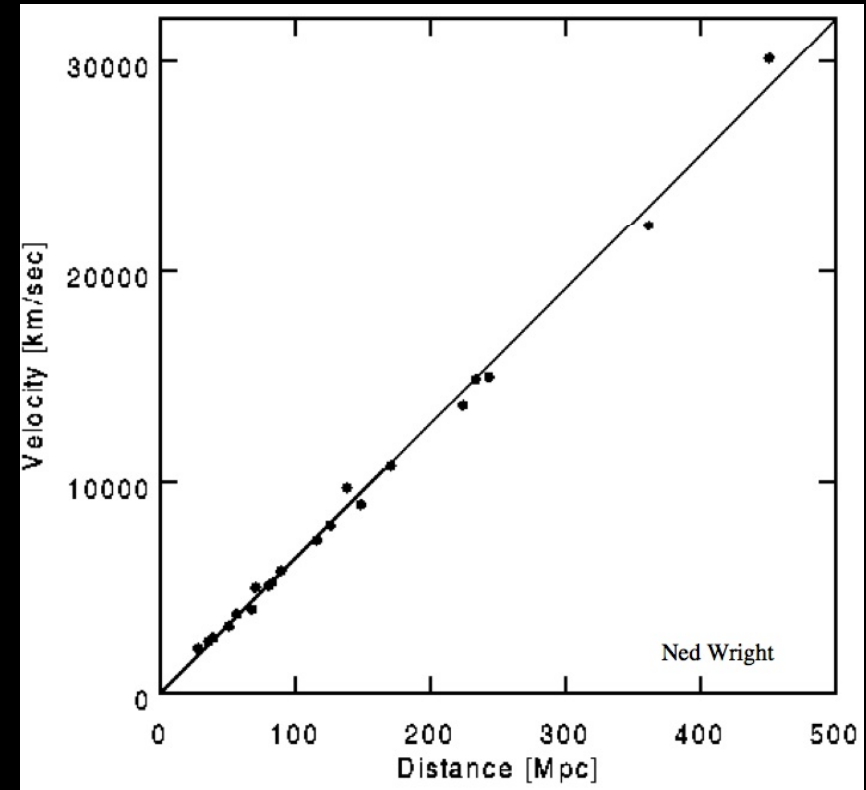
2010

Universe (1960)

Age of cosmic objects
less than ~ 12 - 13 billion yr
Sun ~ 4.7 billion yr

Universal Ratio H:He $\sim 3:1$
Snapshot at $t \sim 3$ min

Cosmic Microwave Background ?
Predicted (Gamov), ~ 5 K

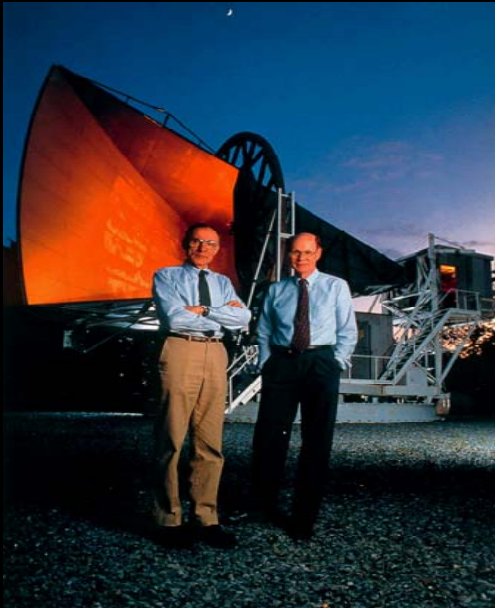


Today: $H = 70 \pm 3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

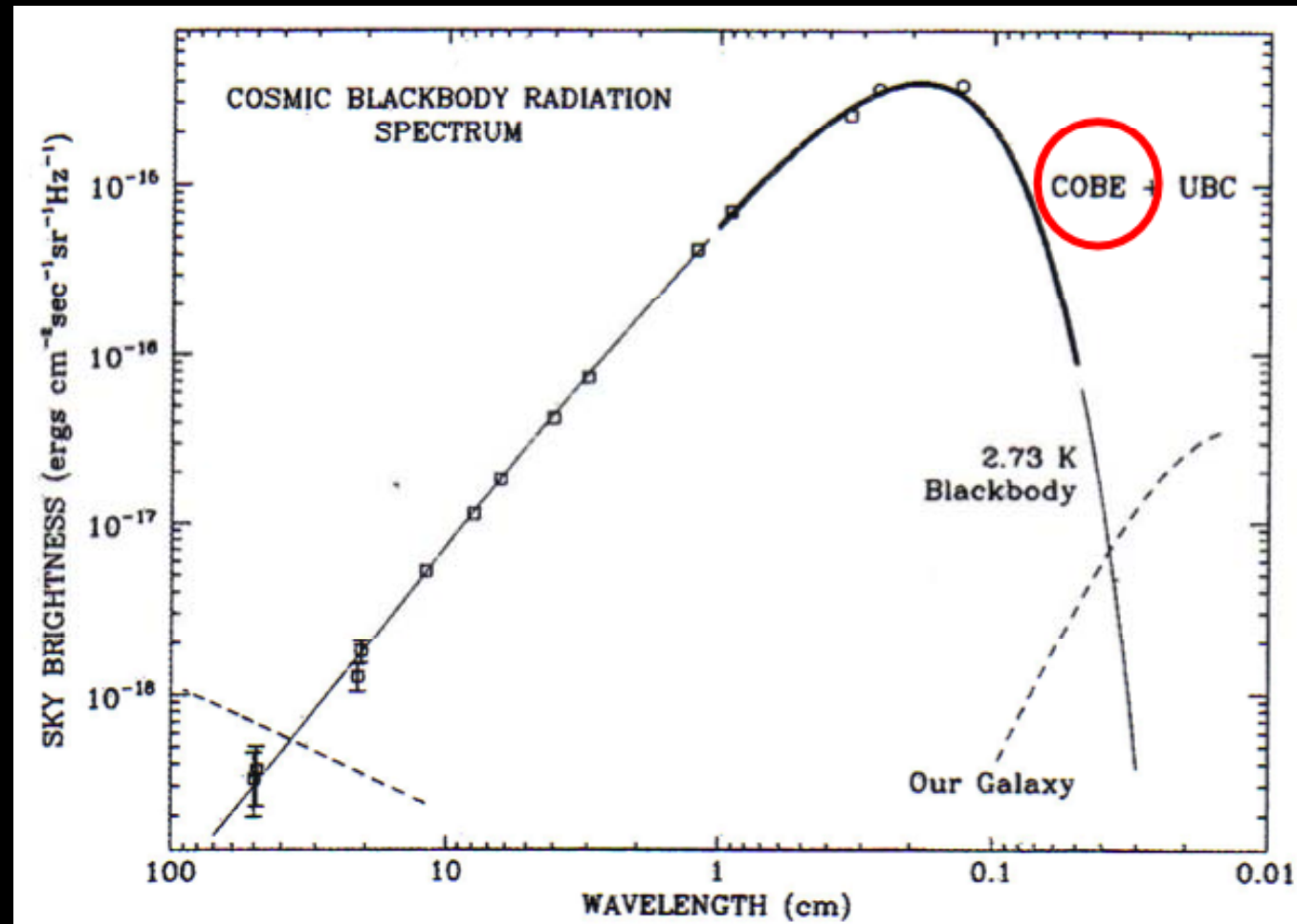
Hubble age (H^{-1}) ~ 13.4 billion years

Universe

The discovery of the 'Cosmic Microwave Background' (1963)



Penzias and Wilson



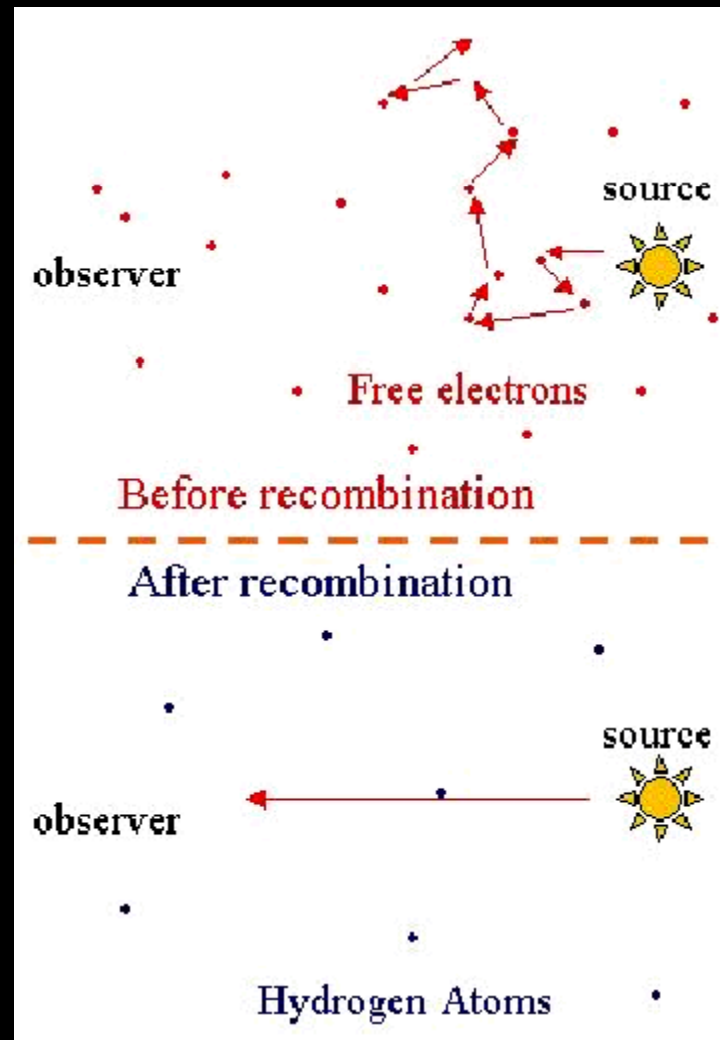
The Universe is a perfect 'black body' with $T = 2.73 \text{ K}$

Universe

How was the cosmic background radiation produced?

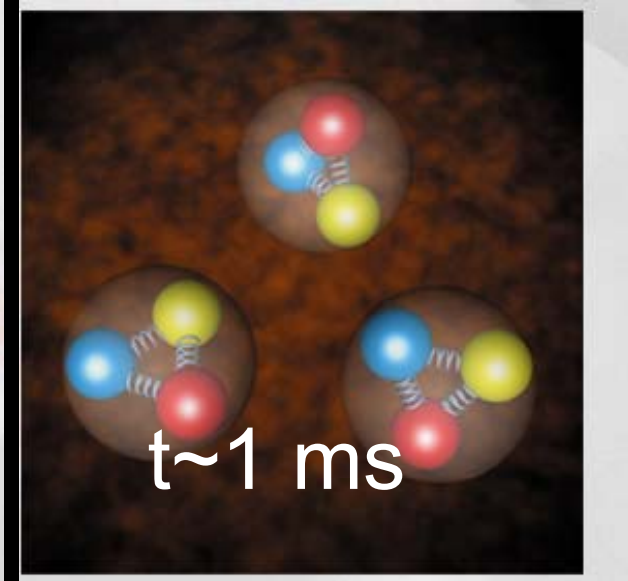
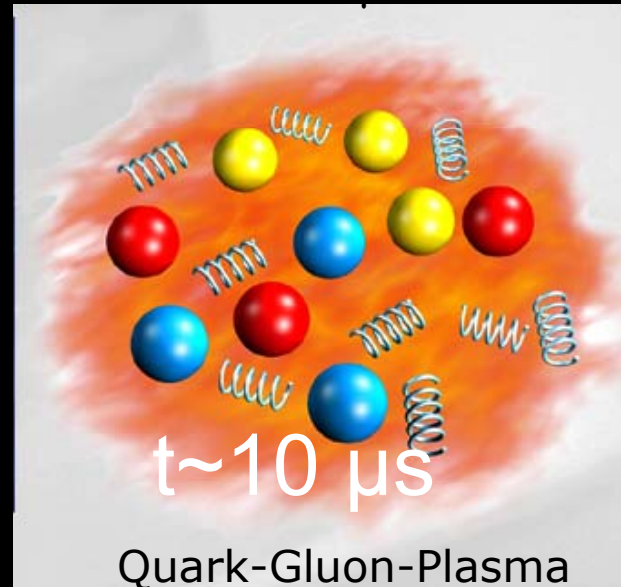
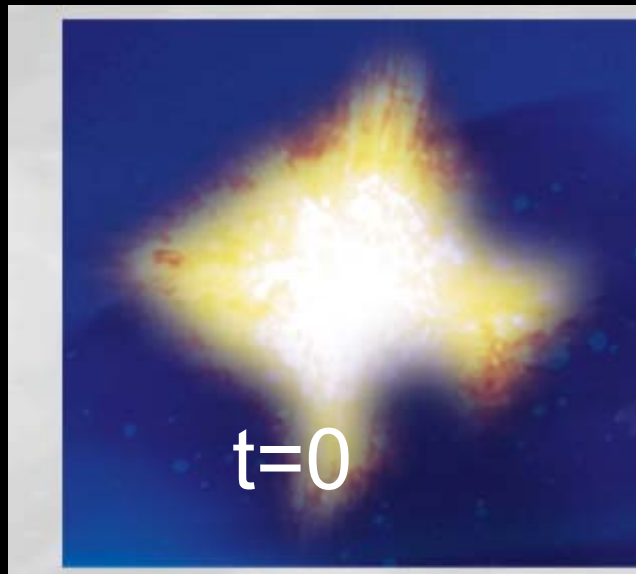
By the recombination of free electrons and nuclei

(this was possible when the average energy per photon was smaller than the binding energy)



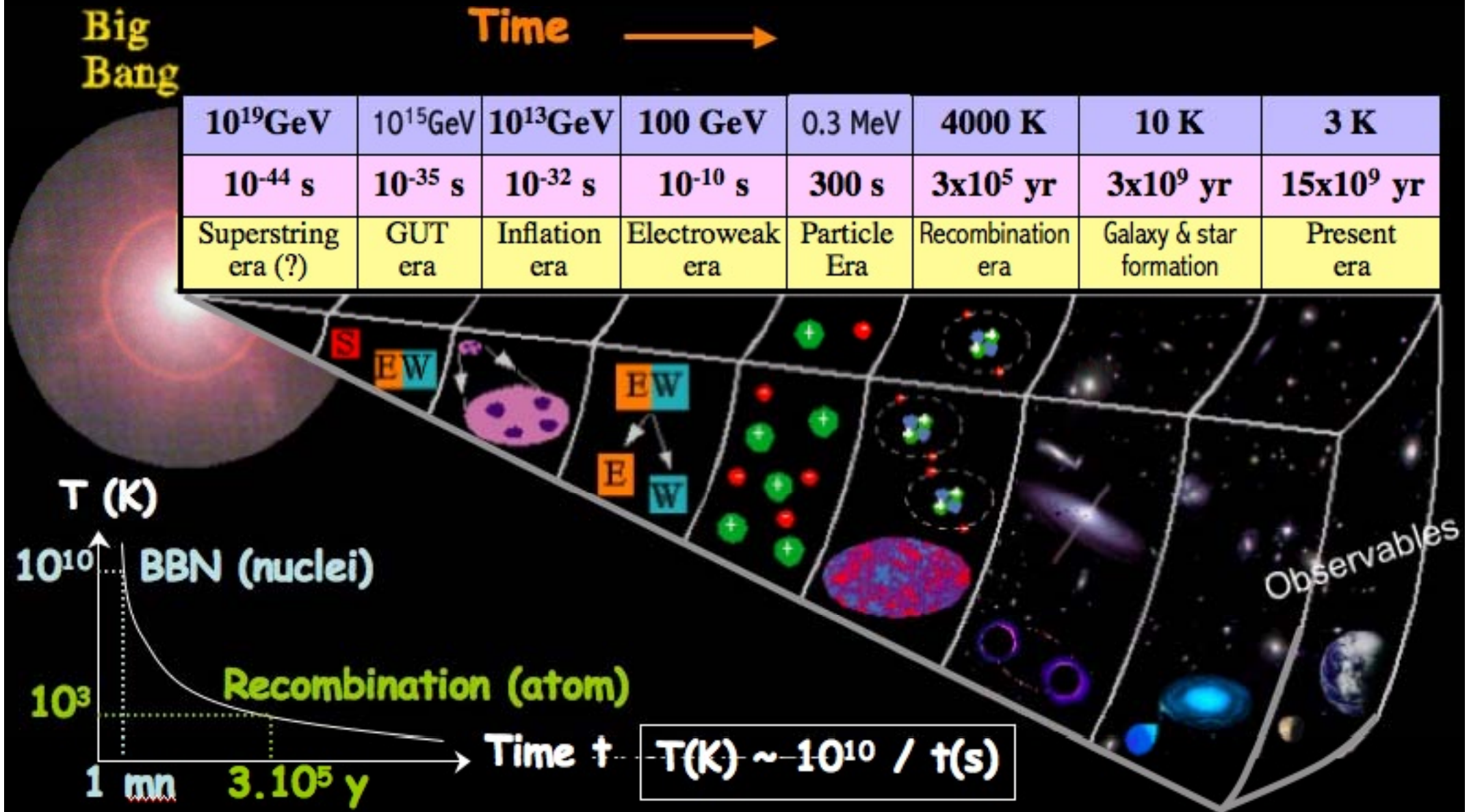
Universe

Particle Physics pushes the limit of knowledge towards shorter times



Universe

The reconstruction of the History of the Universe



Universe

Big Bang evolution

Time (sec)	Temperature (eV/K)	Phase
10^{-43} s	10^{19} GeV	Grand Unified Theory ?
10^{-35} s	10^{15} GeV	Inflation (GUT breaking) ?
10^{-10} s	10^2 GeV	Electroweak symmetry breaking (W/Z mass)
10^{-5} s	300 MeV	Quarks form hadrons (neutrons, protons, etc)
1-3 min	0.3 MeV	Nucleosynthesis (H, He, Li)
10^5 yrs	0.4 eV = 4000 K	Recombination of nuclei and electrons (transparent!)
10^9 yrs	10 K	Stars, Galaxies; Supernovae produce heavy elements
10^{10} yrs	3 K	Today

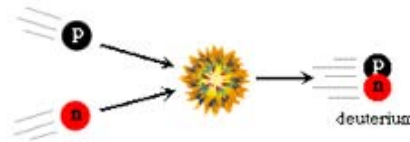
Universe

Big Bang Nucleosynthesis

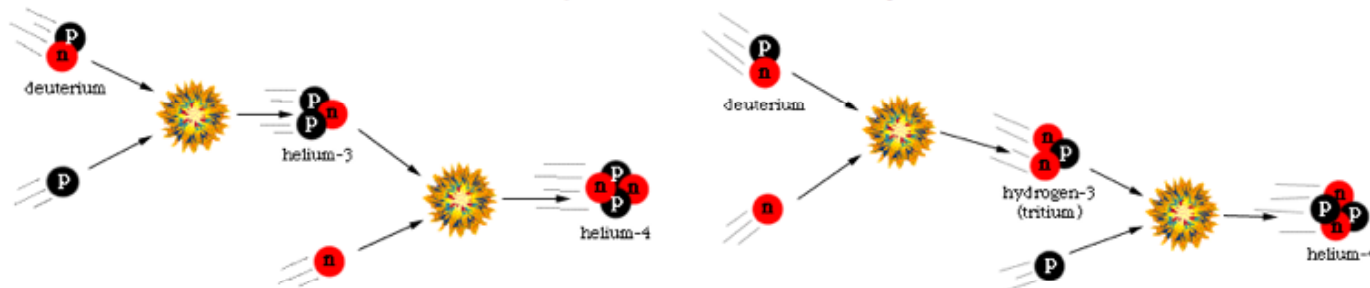
$t=1-3$ mn, $T=0.3-0.1$ MeV

- neutron decay: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} \Rightarrow n/p \sim 1/7$

- Deuterium (all n):



- Helium (all D ie all n + equal number of p):



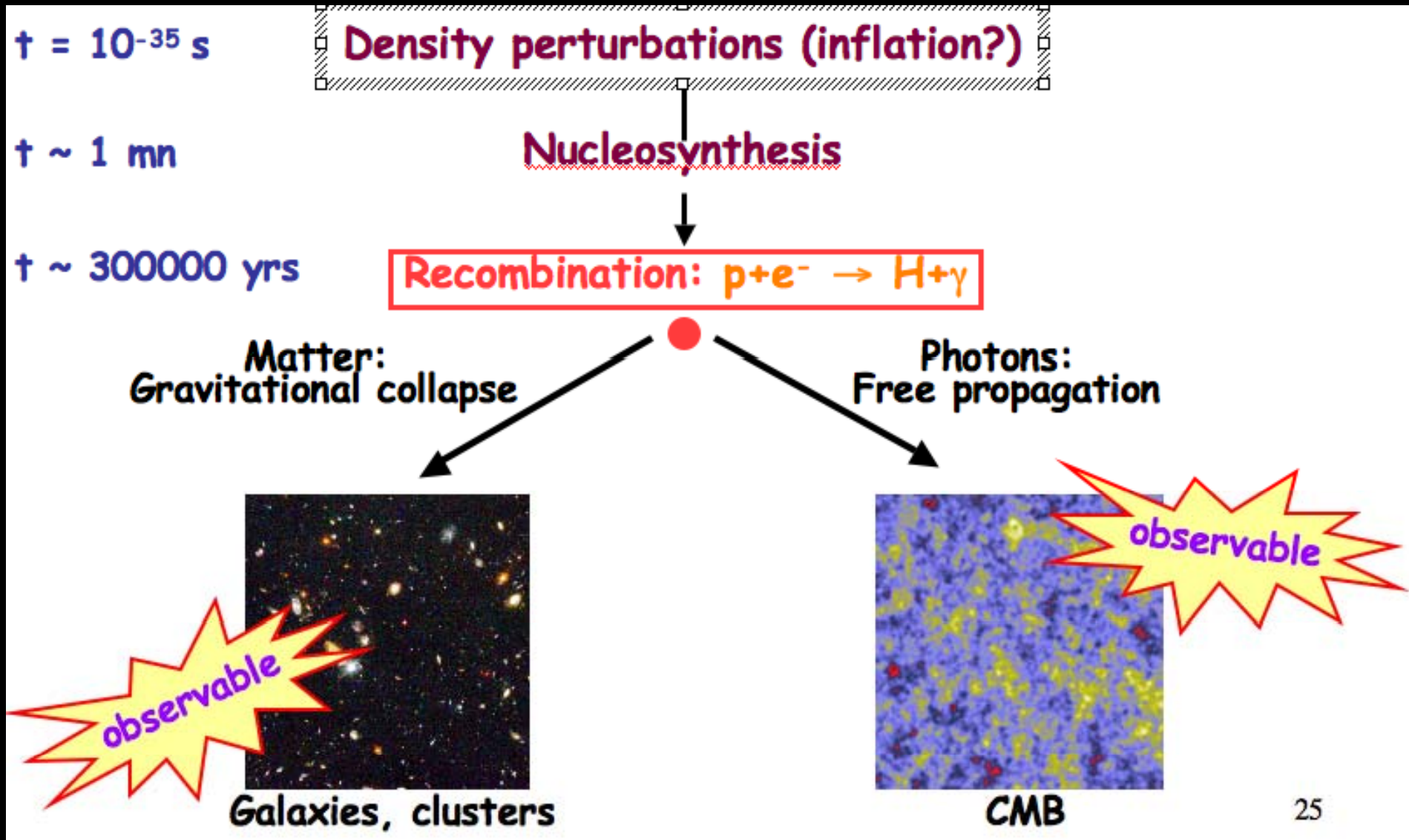
Helium abundance $\sim \frac{2n}{n+p} \sim 0.25$

H abundance ~ 0.75

$\eta = n_p/n_n \mid \Rightarrow$ D bottleneck lasts less $\Rightarrow n/p \mid \Rightarrow \text{He}^4$

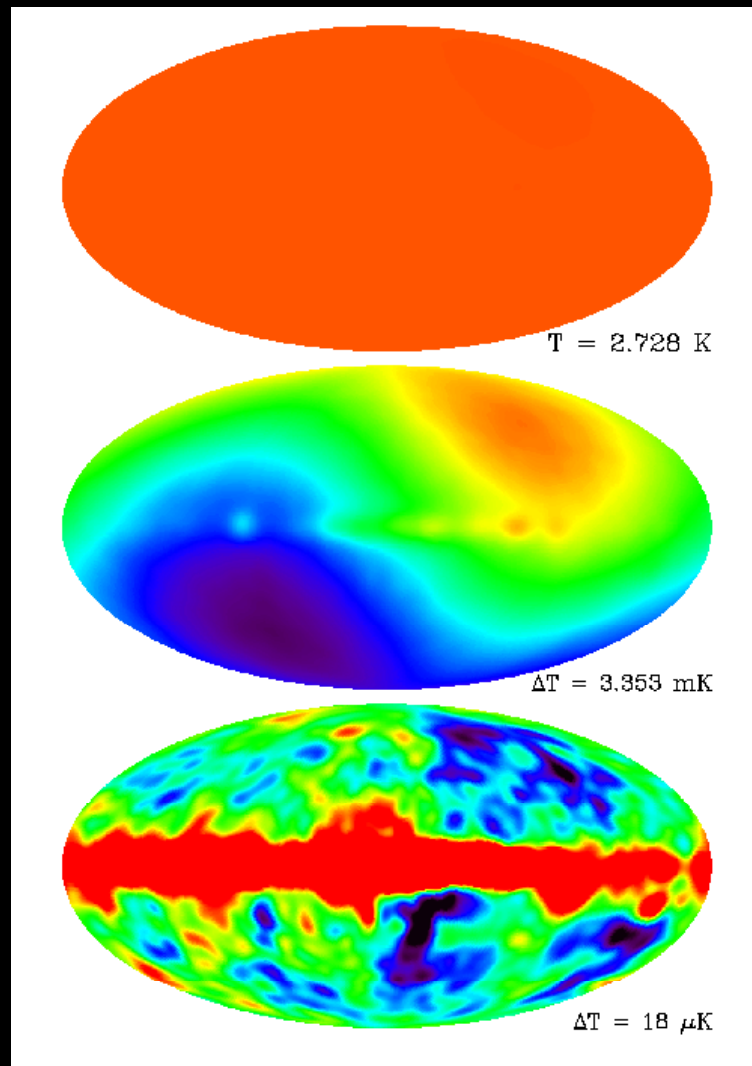
Universe

Back to the Beginning



Universe

Study of the Cosmic Microwave Background (COBE) (Nobel prize 2006)



$$T = 2.7 \text{ K}$$

$$\Delta \epsilon_{\lambda\tau\alpha} - T = 3.3 \text{ mK}$$

(after subtraction of constant emission)

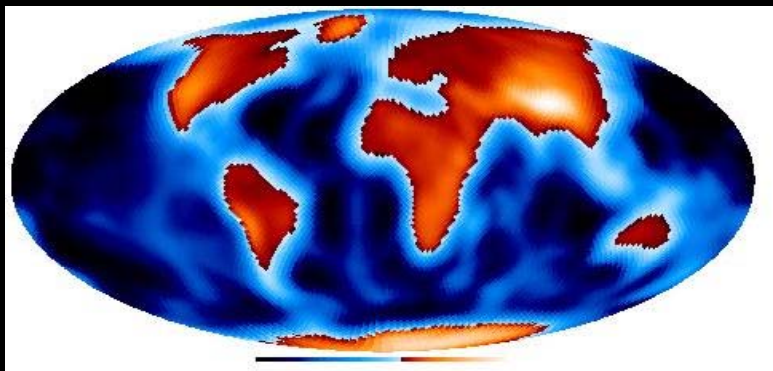
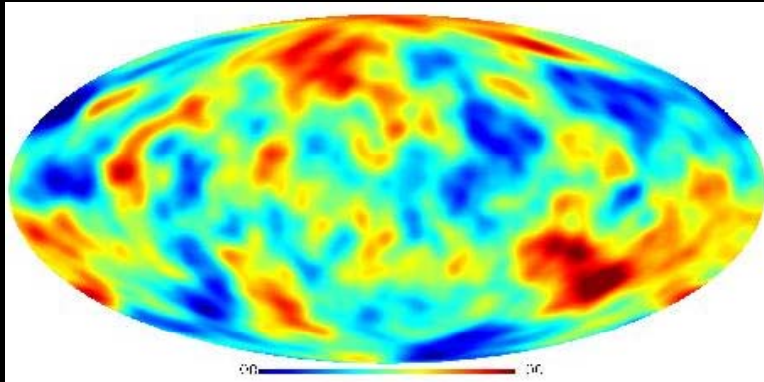
$$\Delta \epsilon_{\lambda\tau\alpha} - T = 18 \mu\text{K}$$

(after correcting for motion of Earth)

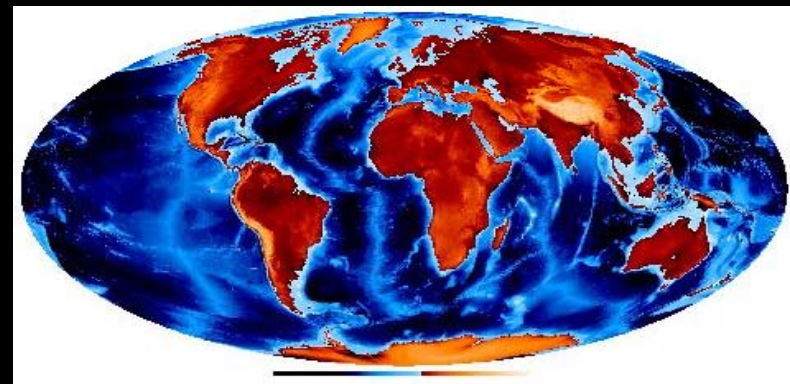
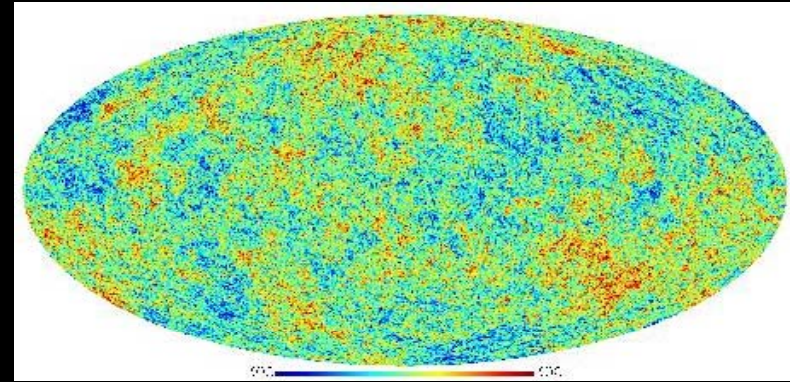
Universe

The most precise observation today (WMAP)

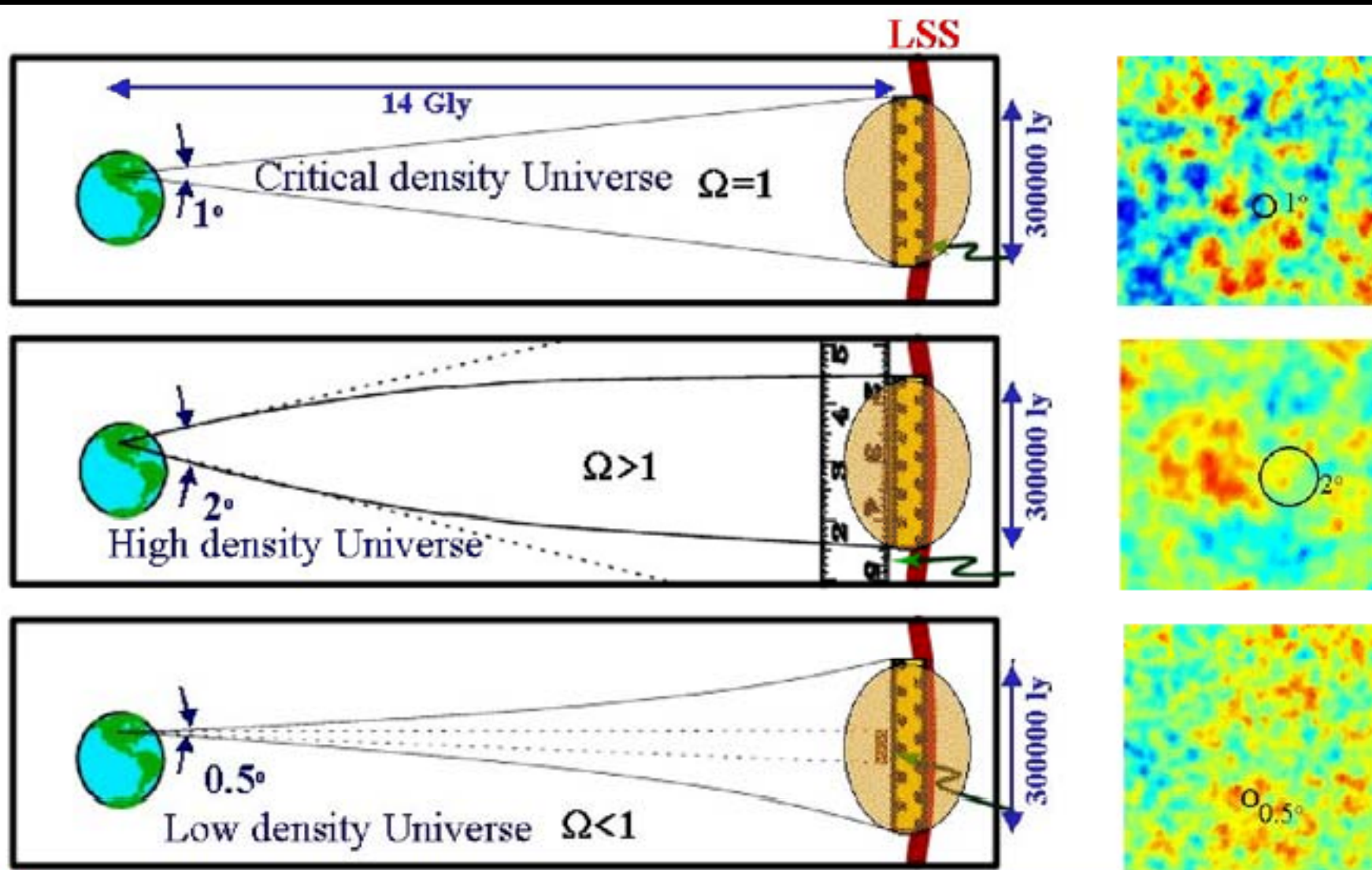
COBE
(7 degree resolution)



WMAP
(0.25 degree resolution)



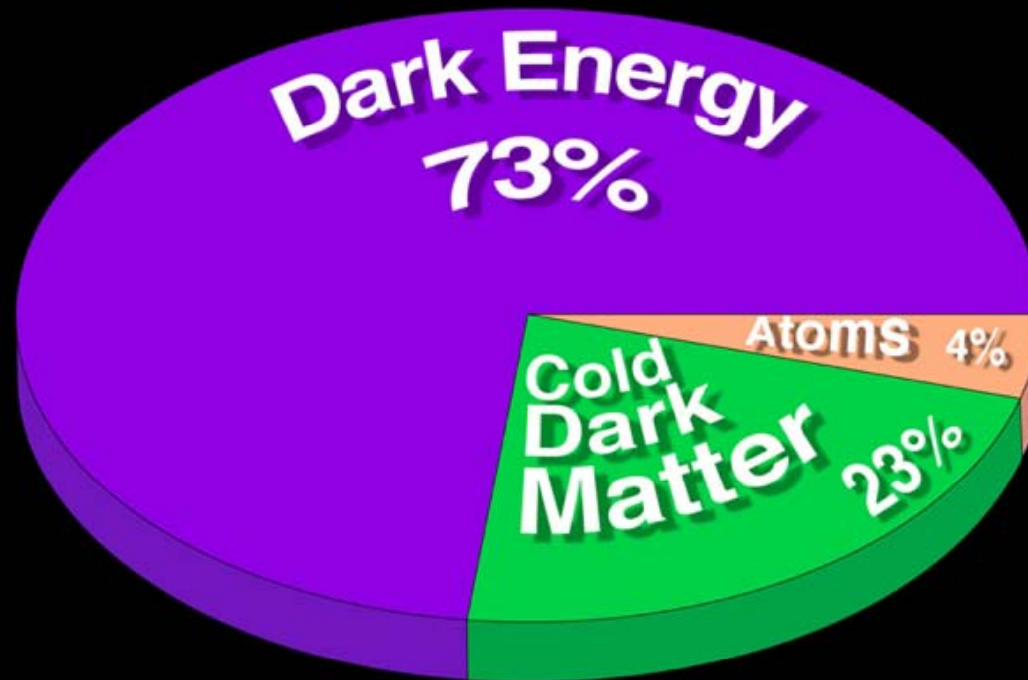
Analysis of inhomogeneities reveals the composition of the Universe



⇒ Max scale relates to total content of Universe Ω_{tot}

Universe

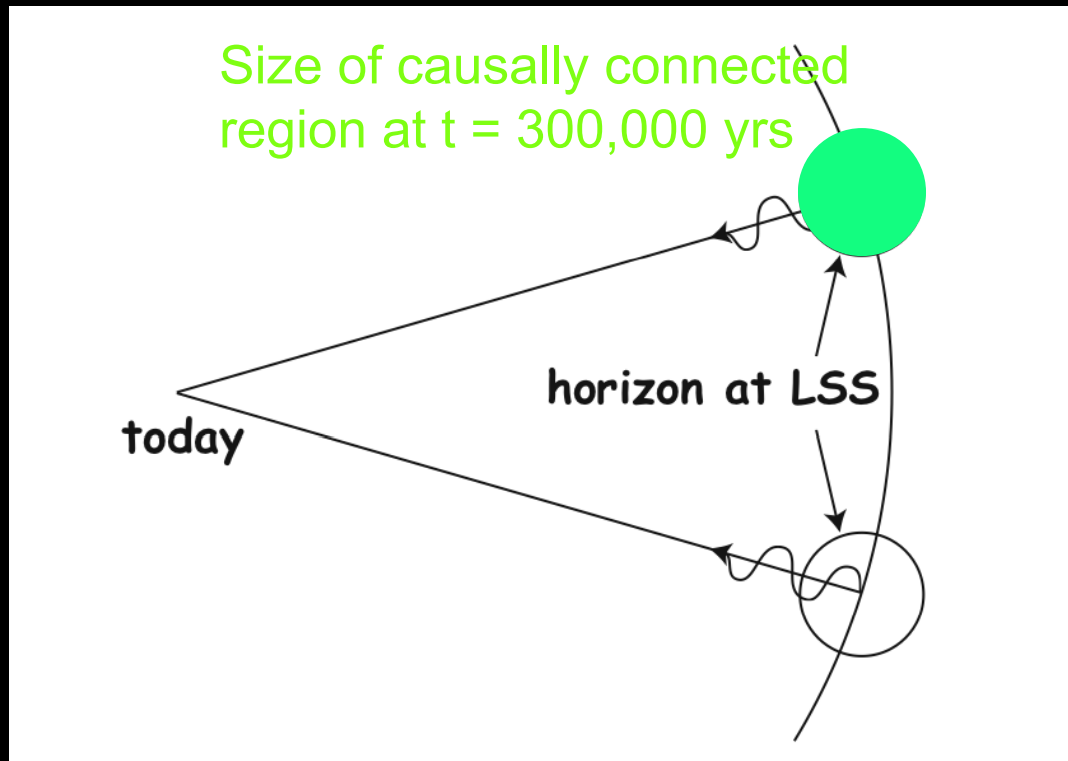
The strange composition of the Universe



Universe

The horizon problem :

How can the CMB radiation be so homogeneous when there are 10^{88} regions which have never been causally connected ?

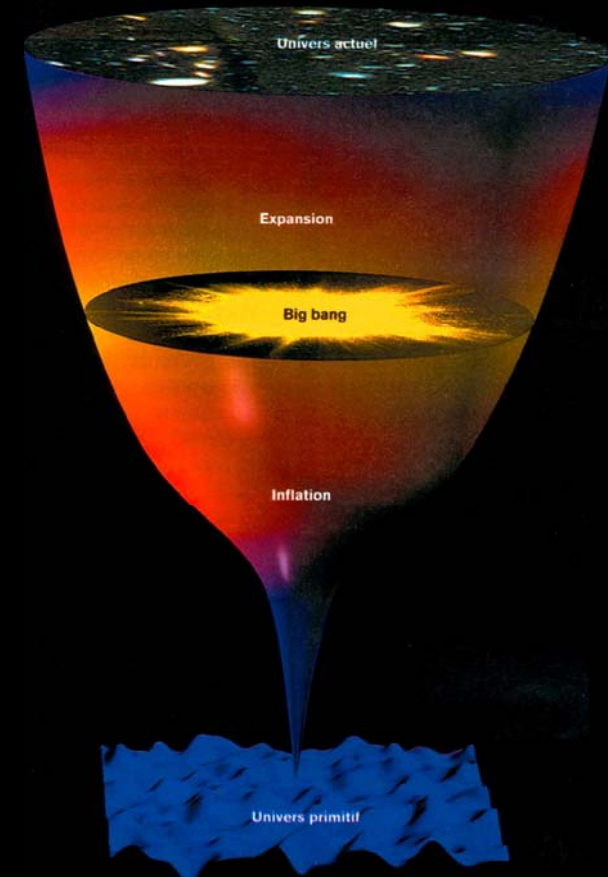
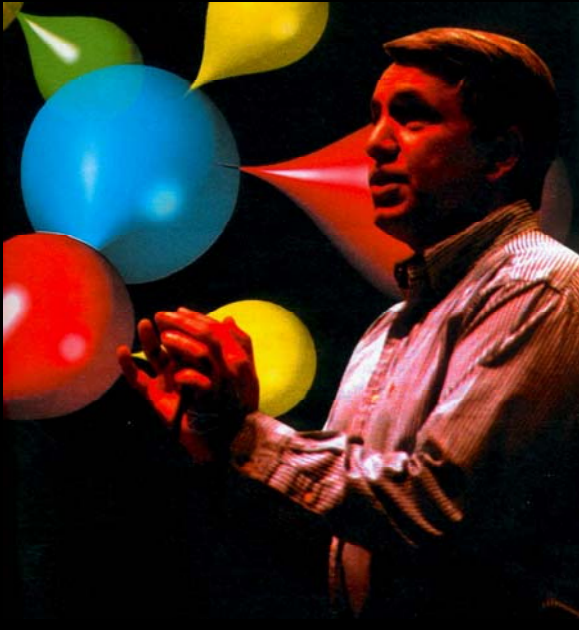


$$\text{Angle} \sim \frac{10^3 \times 3 \cdot 10^5}{14 \cdot 10^9} \text{ rad} \sim 1^\circ$$

Guth/Linde (1980)

Universe

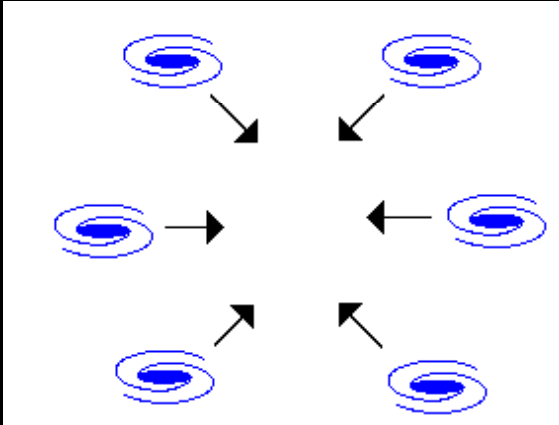
The Universe went through a phase of superluminal expansion, driven by an 'inflaton' field



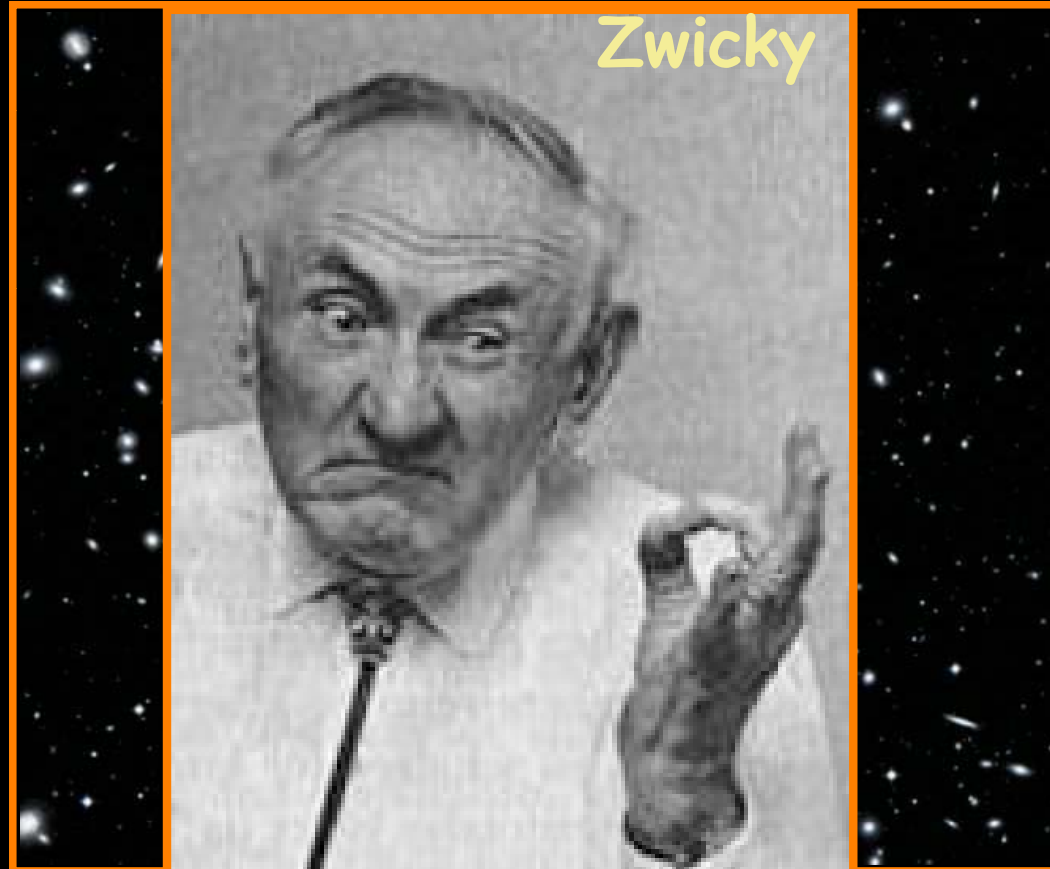
solves two big problems:
1) the flatness of the Universe
2) the horizon problem

Universe

Evidence for Dark Matter (1933)



Mass of luminous matter
=
10%
Gravitational mass

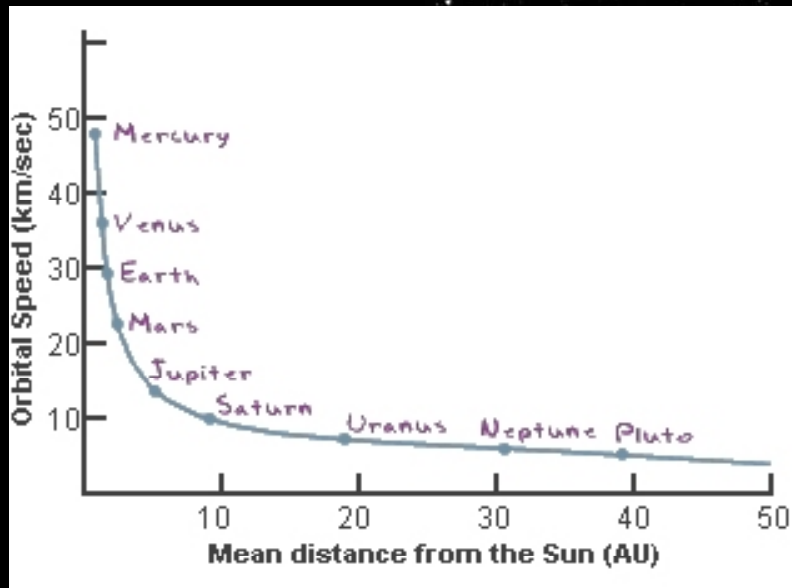


Universe

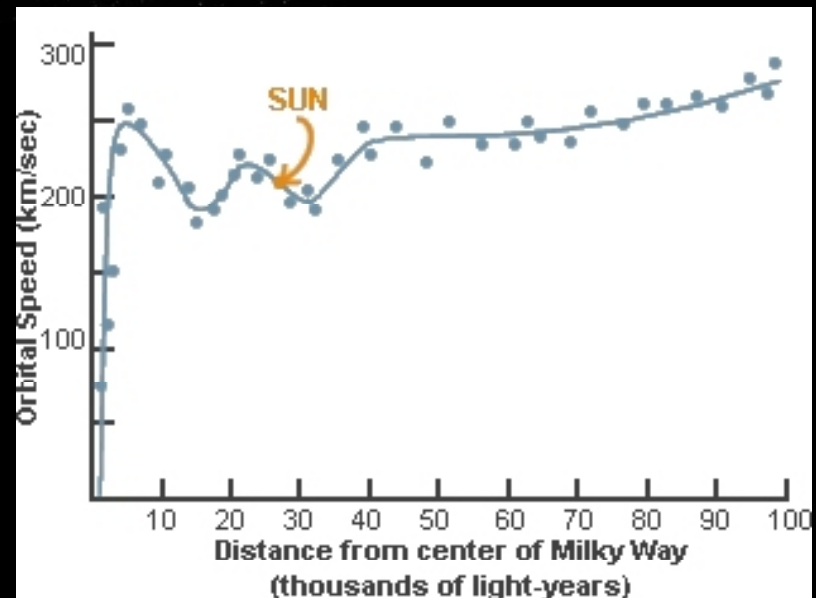
MORE EVIDENCE FOR “DARK MATTER”



Orbital speed vs Distance from center
(Kepler - expect $r^{-1/2}$ dependence)



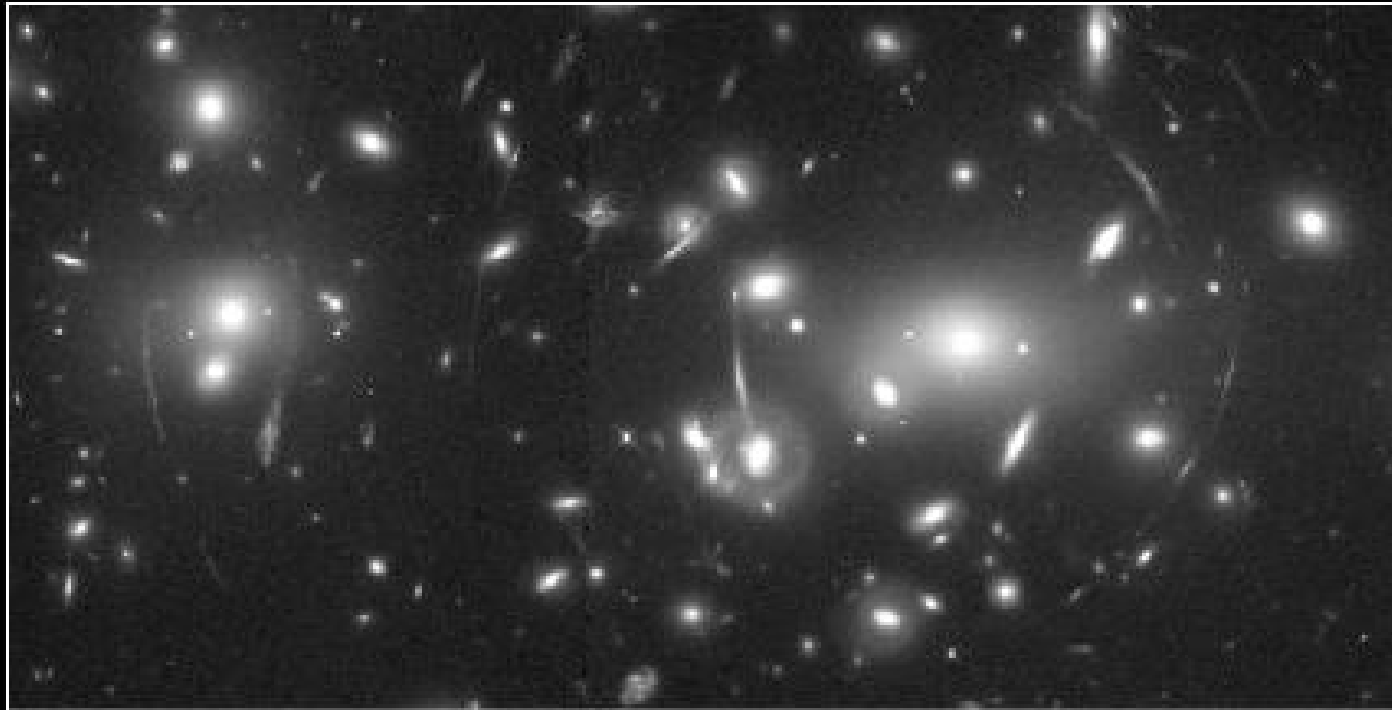
One central mass (Sun)



Milky Way

Universe

AND EVEN MORE EVIDENCE FOR “DARK MATTER”



Gravitational Lens in Abell 2218

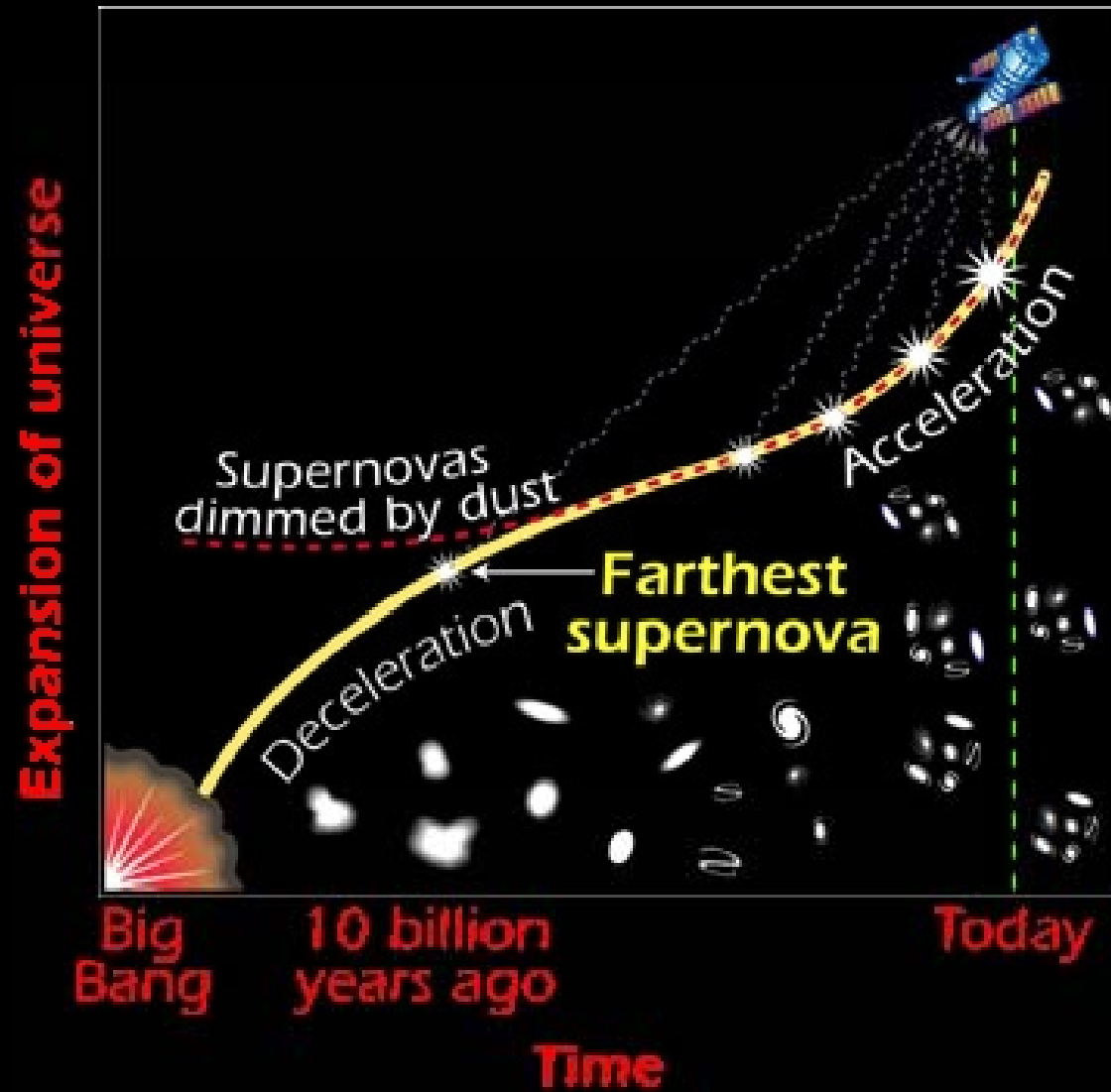
HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

GRAVITATIONAL LENSING

Universe

Evidence for Dark Energy



DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

1) Wie kommen Teilchen zu ihrer Masse - durch das "Higgs" Feld ?

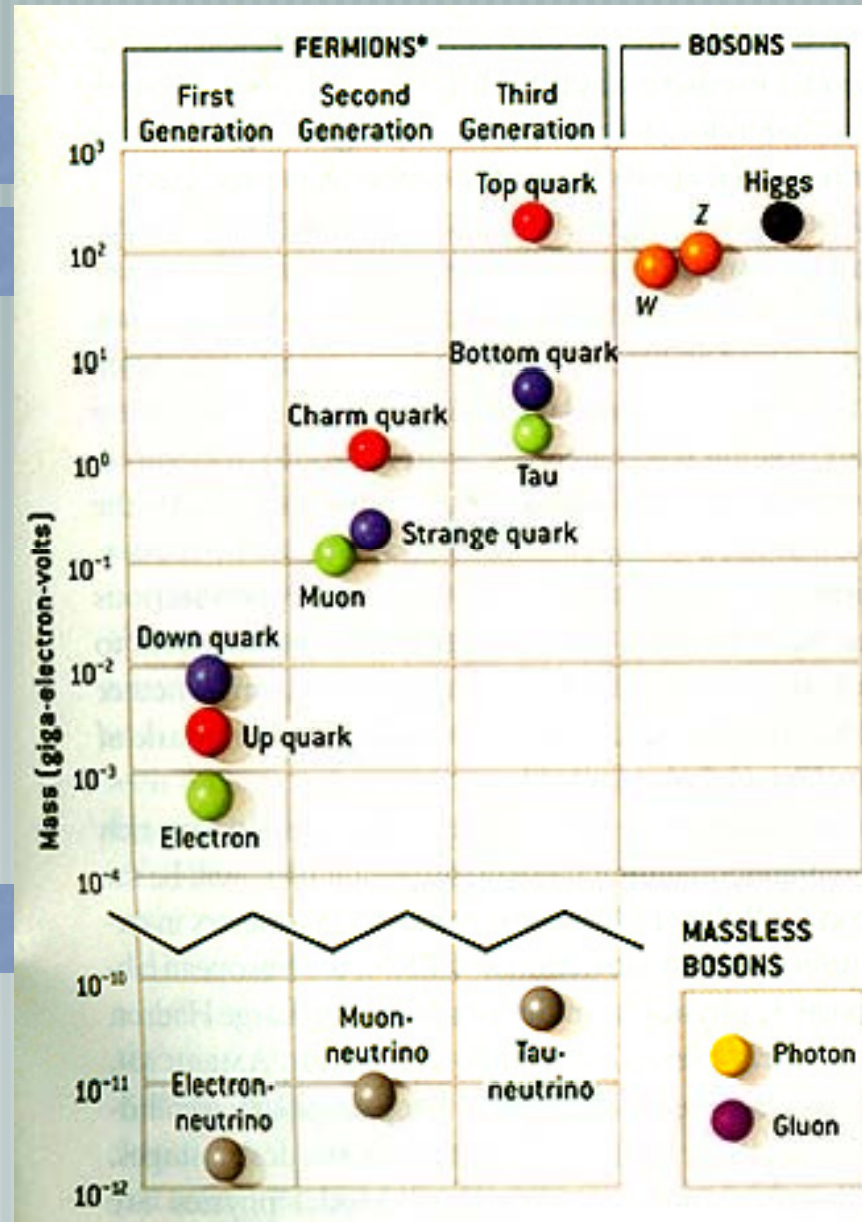
1 TeV →

100 GeV →

1 GeV →

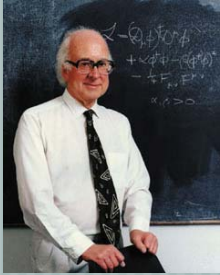
1 MeV →

0.01 eV →



DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

Was ist so besonders am Higgs-Feld?



Es füllt das gesamte Universum gleichmässig (seit dem Big Bang)

Es gibt jedem Teilchen (auch den neu entstehenden) seine exakte Masse

Es ist wie eine 'kosmische DNS' (die 'Erbinformation' des Universums)

Sir Peter Higgs

QuickTime™ and a
GIF decompressor
are needed to see this picture.

QuickTime™ and a
GIF decompressor
are needed to see this picture.

QuickTime™ and a
GIF decompressor
are needed to see this picture.

Eine Party-Gesellschaft ...

.. ein berühmter Gast will den
Raum durchqueren...

.. wird aber von den Gästen
umringt und kommt nur
schwer voran...

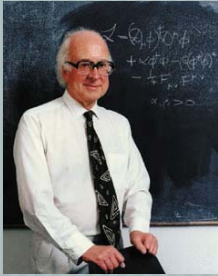
Das Higgs-Feld ...

*... ein neues Teilchen wird
erzeugt ...*

*... das Higgs-Feld macht das
Teilchen 'schwer' ...*

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

Das Higgs-Teilchen



Sir Peter Higgs

QuickTime™ and a
GIF decompressor
are needed to see this picture.

QuickTime™ and a
GIF decompressor
are needed to see this picture.

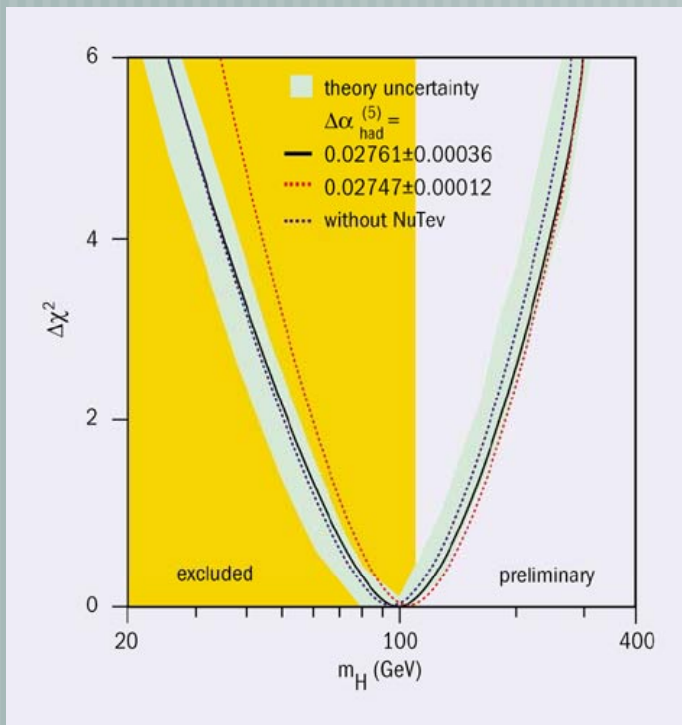
Ein Gerücht wird in die
Party-Gesellschaft gerufen ...

.. alle kommen zusammen und
tuscheln über die Nachricht...

Das Higgs-Feld ...

*... erzeugt seine erste Anregung,
das Higgs-Teilchen ...*

Aus früheren Messungen wird vorhergesagt,
dass die Masse des Higgs-Teilchens zwischen 120-200 GeV liegen sollte.



DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

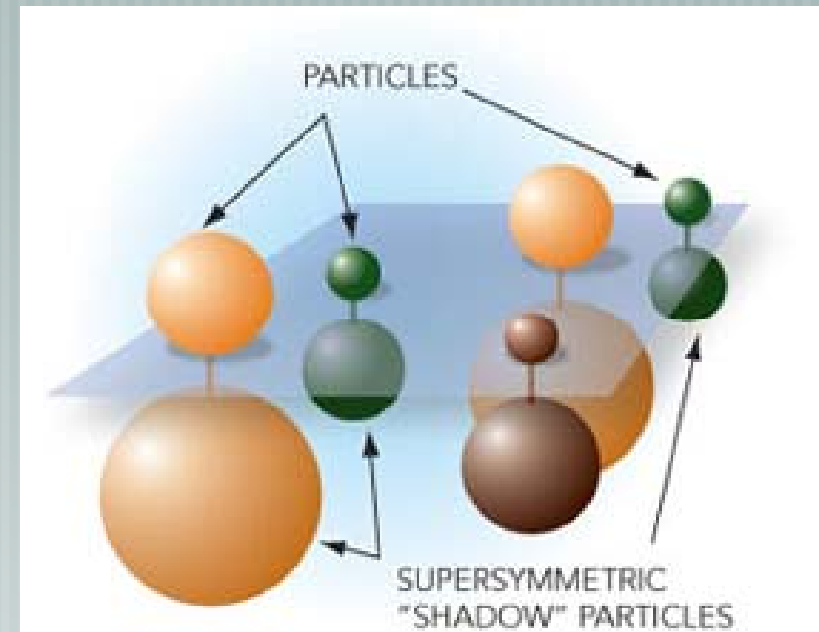
2) Gibt es eine Verbindung von Teilchen und Feldern - Supersymmetrie ?

'Materie'teilchen (Spin $1/2$ =Fermion) wechselwirken durch den Austausch von 'Feld'teilchen (Spin 1 =boson):

Supersymmetrie:

Jedes Feldteilchen hat einen 'Materie'partner
Jedes Materieteilchen hat einen 'Feld'partner

Spin $1/2$	Spin 1
electron	selectron
quark	squark
photino	photon
gluino	gluon



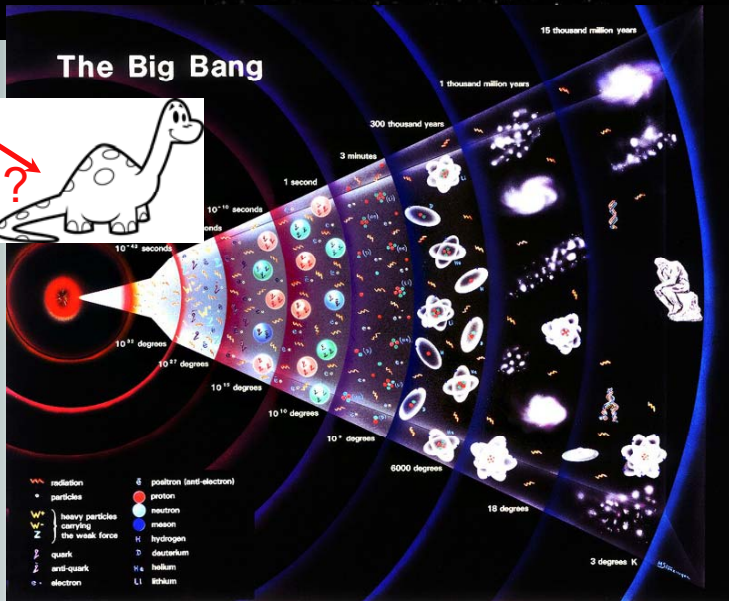
Falls diese 'Super'-Partner existieren, müssen sie sehr massiv sein (> 200 GeV)

Im Big Bang produziert, könnte das leichteste 'SUSY' Teilchen immer noch reichlich im Universum vorhanden sein (dunkle Materie?)

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS



Wir+Planeten+Sterne



SUSY = Dunkle Materie-Teilchen?
Überbleibsel vom Big Bang?

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

Was sind Teilchen?



Superstrings in 10 Dimensionen?

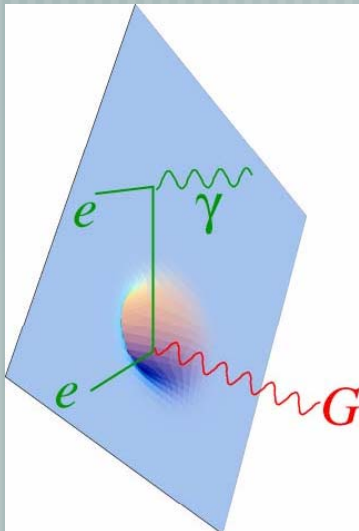
Sind Teilchen kleine 'Strings' die im 10-dimensionalen Raum vibrieren?
Länge $\sim 10^{-35}$ m (Planck Länge)
Verschiedene Schwingungsmoden entsprechen verschiedenen Teilchen
Graviton ist im Spektrum enthalten!

Schwierigkeiten:

Es gibt keine Voraussage, warum und wie die zusätzlichen Dimensionen verschwunden sind.

Es gibt keine Möglichkeit, die Eigenschaften der Teilchen vorherzusagen.

Quanten-Gravitation ?



'Sieht' ein Graviton **mehr als 3 Raumdimensionen?**

Die Gravitation könnte deshalb so schwach sein weil sich die Gravitation in 4 oder mehr Raum-Dimensionen ausbreitet und damit aus unserem 3-dimensionalen Universum entkommt.

Kollisionen im LHC könnten dann mikroskopische schwarze Löcher erzeugen.

Ein Blick in die Zukunft

1900 - 2000: Phantastischer Fortschritt im Verständnis von Materie und Universum

Wir wissen heute woraus die Materie besteht.

Wir kennen auch die wichtigsten Etappen in der Entstehung des Universums

Heute stellen sich neue, tiefere Fragen:

Was sind Teilchen? Sind Quarks und Leptonen wirklich elementar?

Wo liegt die Verbindung zwischen Quarks und Leptonen (identische Ladung!!)

Was ist die dunkle Materie?

Gibt es neue Kräfte in der Natur?

Was macht die 'Teilchenfamilien' aus? Warum gibt es genau drei?

Was ist der Ursprung der Naturkonstanten? Was bestimmt ihre relative Grösse?

Ist das Leben im Universum ein Zufall?

Wie ist die Antimaterie verschwunden?

Was hat die kosmische Inflation ausgelöst?

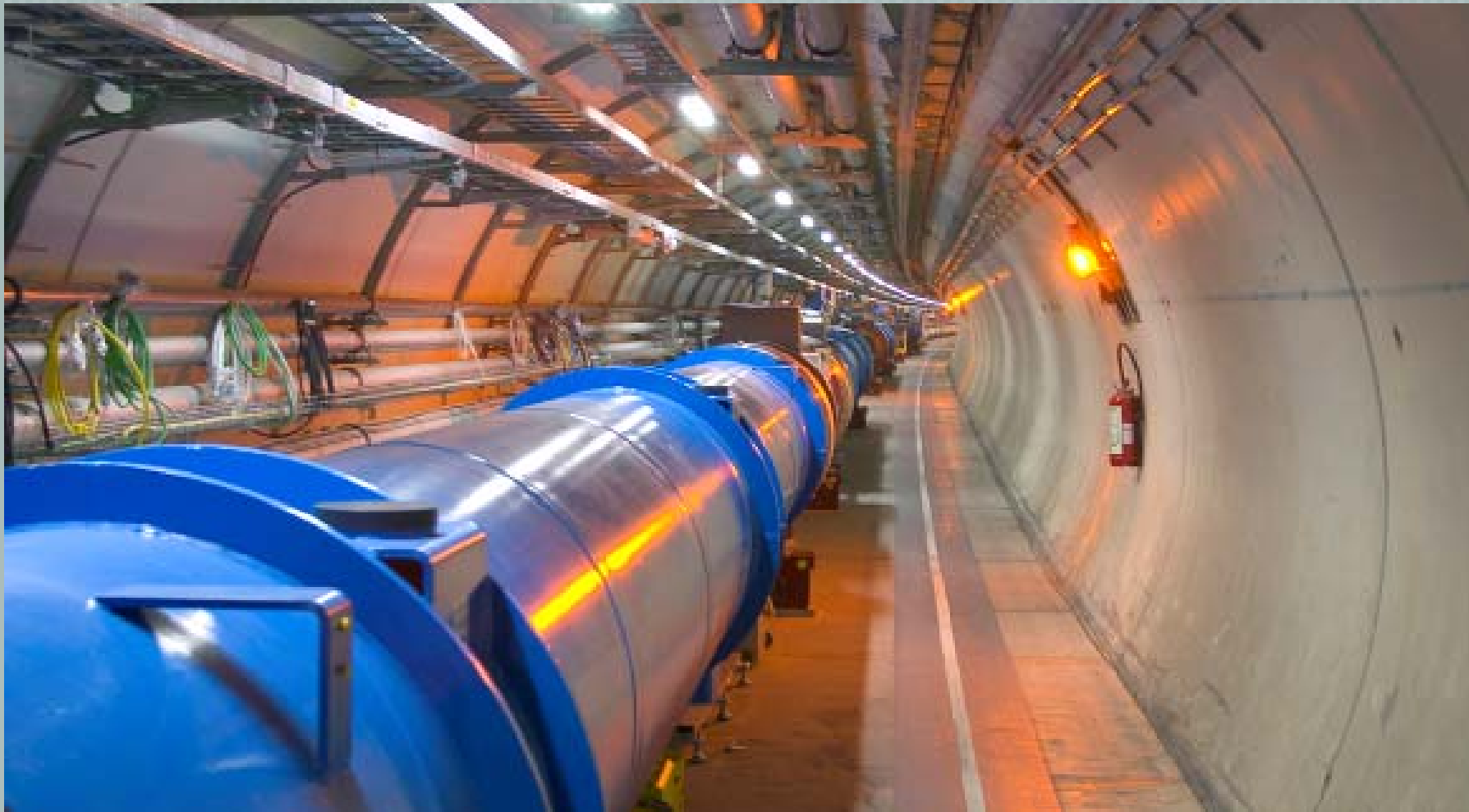
Kann die Natur durch ein einziges Gesetz beschrieben werden?

Warum hat das Vakuum eine so geringe Energie?

Die Physik des 21. Jahrhunderts ...

DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

LHC START IM JAHR 2008



Neue Entdeckungen !