

Teilchen

Felder

Universum

Technologien

Detektor

Beschleuniger

Elektromagnetismus

Schwache WW

Starke WW

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1975

1980

1990

2000

2010

$e^-$

Atom

Kern

$p^+$

$n$

$e^+$

$\mu^-$

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\tau^-$

$\nu_\tau$

$\nu$  Masse

Brownsche Bewegung

Spezielle Relativität

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa  
 $\pi$  Austausch

QED

P, C, CP  
Verletzung

Higgs

W Bosons

EW Vereinigung

GUT

SUSY

Superstrings

W

Z

Farbladung

3 Teilchenfamilien

Photon

Radioaktivität

Höhenstrahlung

Allgemeine Relativität

Galaxien;  
Ausdehnung des Universums

Dunkle Materie

Kernfusion

Big Bang  
Nukleosynthese

Kosmische  
Hintergrundstrahlung

Inflation

Inhomogenität der  
Hintergrundstrahlung(COBE, WMAP)

Dunkle Energie

Teilchenzoo

STANDARD MODEL 7

Farbladung 8

Geiger

Wolken

Zyklotron

Synchrotron

Blasenkammer

$e^-e^-$  Ring

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

Prozessrechner

$p^+p^+$  Ring

Moderne Detektoren

WWW

GRID



# TEILCHENSPEKTRUM

Leptons

1975

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

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

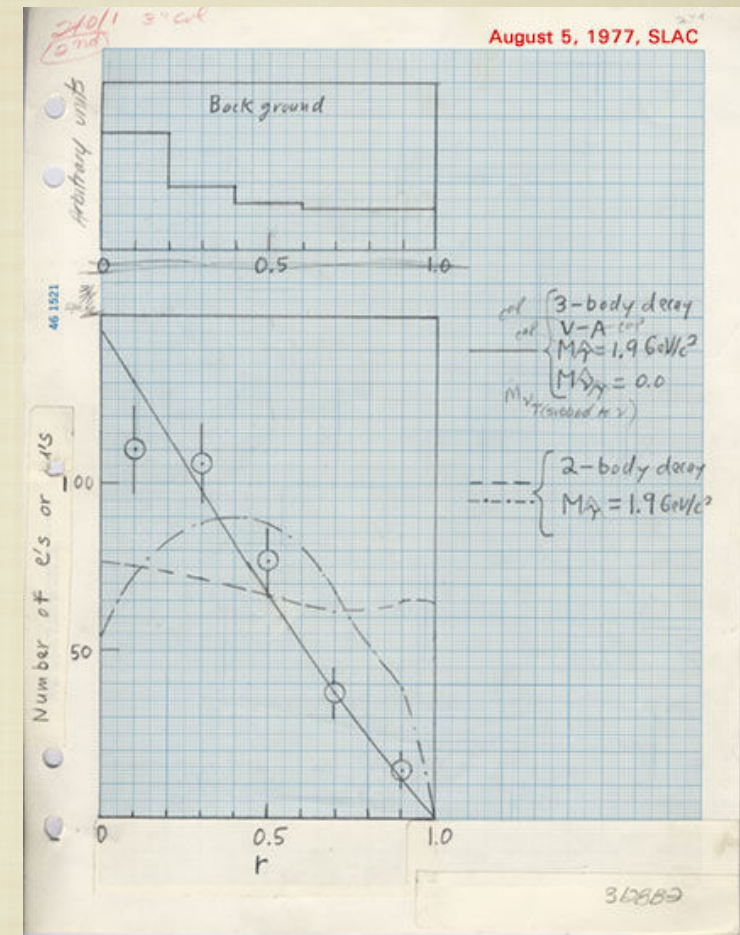
Ein neues 'schweres Elektron' mit  $M = 3500 m_e$

... 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').



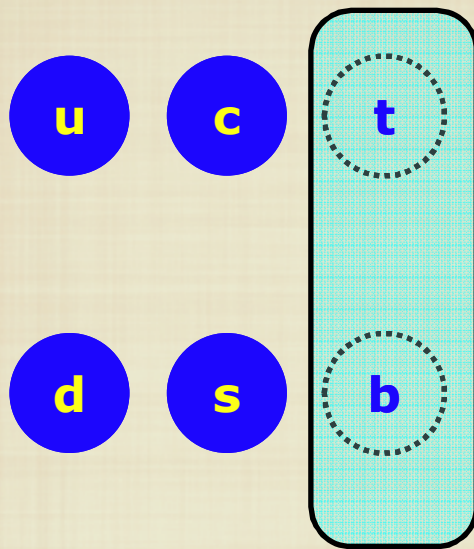
Marty Perl's Logbook

# TEILCHENSPEKTRUM

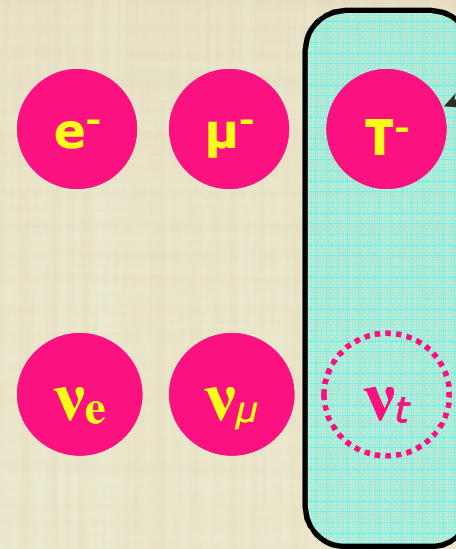
Quarks

1975

Die Suche nach den fehlenden Familienmitgliedern begann ...



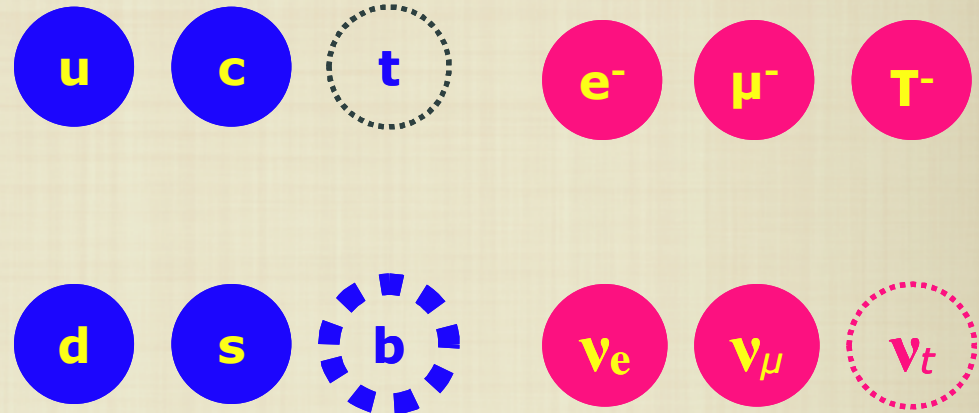
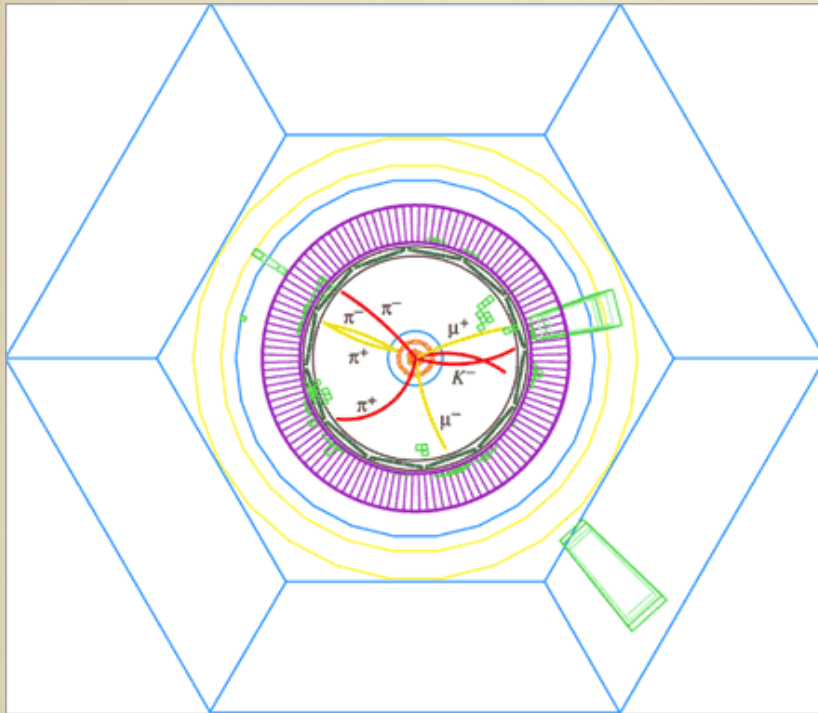
Quarks



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.

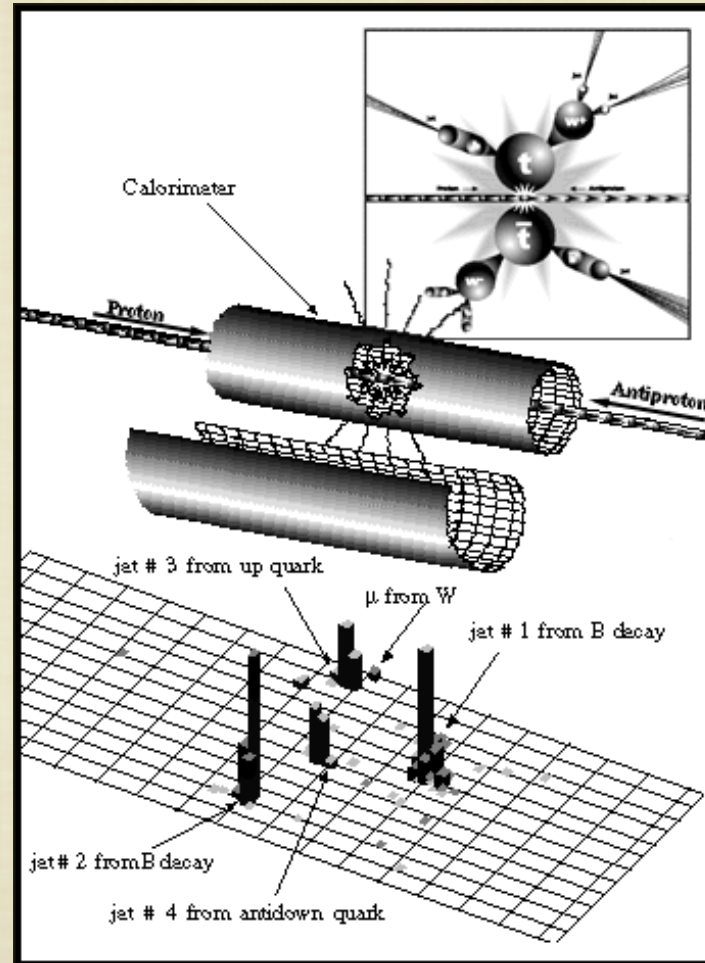
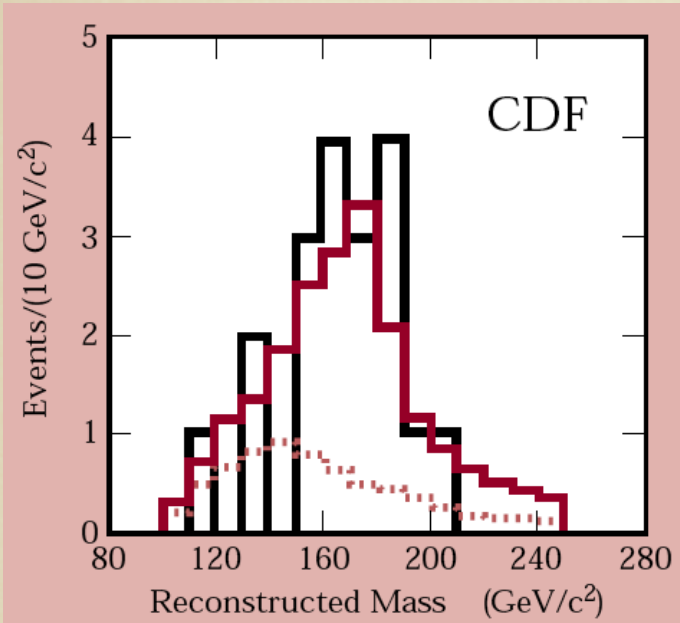
Daraus folgte dass das Bottom quark die elektrische Ladung  $-1/3$  und eine Masse von ca. 5 GeV hatte.

# TEILCHENSPEKTRUM

Quarks

1995

## Entdeckung des 'Top' Quark (Fermilab)



Quarks



Teilchen

Felder

Universum

Technologien

Detektor

Beschleuniger

1895

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1975

1980

1990

2000

2010

$e^-$

Atom

Kern

$p^+$

$n$

$\mu^-$

$e^+$

$\tau^-$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$u$   $d$   $s$

$c$

$b$

$t$

$\nu$  Masse

Brownsche Bewegung

Spezielle Relativität

Quantenmechanik  
Welle-Teilchen Dualismus  
Spin/Fermion-Boson

Antimaterie

Fermi Theorie

Yukawa  
 $\pi$  Austausch

QED

P, C, CP  
Verletzung

Higgs

W Bosons

EW Vereinigung

GUT

SUSY

Superstrings

QCD

Farbladung

3 Teilchenfamilien

Elektro-  
magnetismus

Schwache  
WW

Starke  
WW

Photon

Radio-  
aktivität

Höhen-  
strahlung

Allgemeine  
Relativität

Galaxien;  
Ausdehnung des  
Universums

Dunkle Materie

Kernfusion

Big Bang  
Nukleosynthese

Kosmische  
Hintergrundstrahlung

Inhomogenität der  
Hintergrundstrahlung(C  
OBE, WMAP)

Dunkle Energie

Geiger

Wolken

Zyklotron

Synchrotron

Blasenkammer

$e^+e^-$  Ring

Vieldrahtkammer

Strahlkühlung

Prozessrechner

$p^+p^-$  Ring

Moderne  
Detektoren

WWW

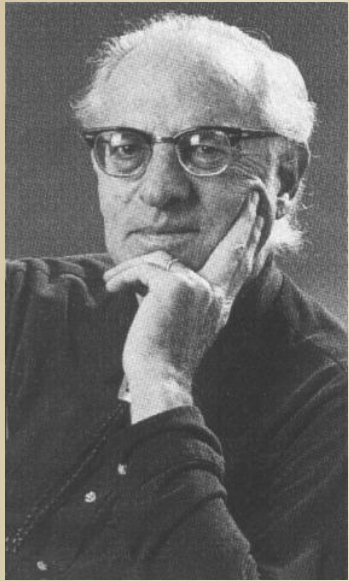
GRID

Teilchen-  
zoo

STANDARD MODEL

Neutrino trail





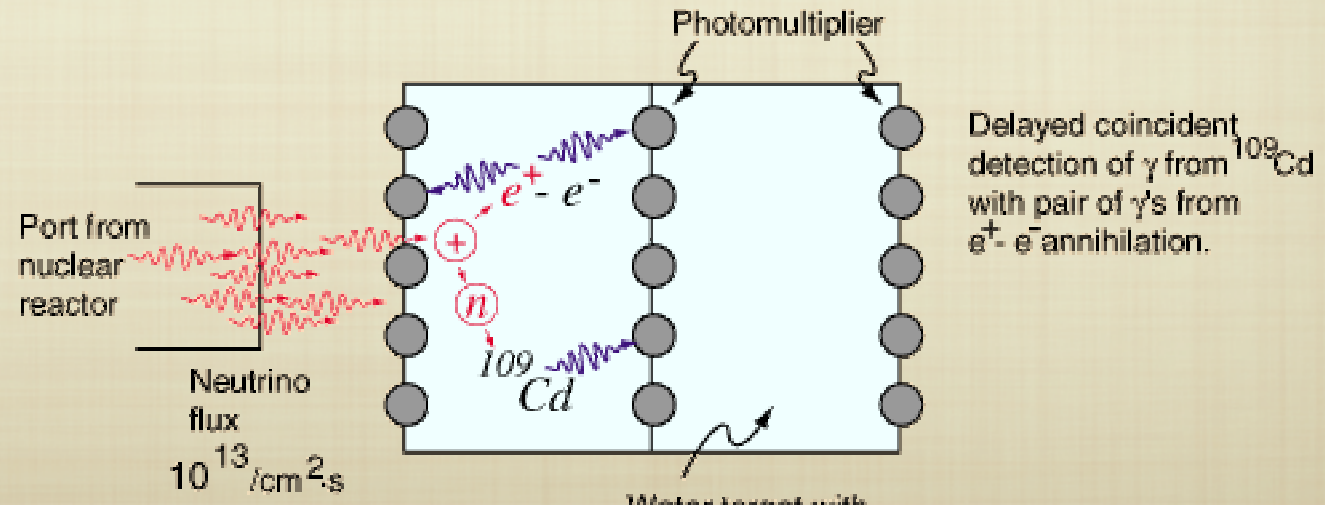
## Die Geschichte der Neutrinos

### Entdeckung des (Elektron) Neutrinos



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

Fred Reines





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,<sup>†</sup> and J. Steinberger<sup>†</sup>

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  $\mu$  mesons but do not produce electrons, and hence are very likely different from the neutrinos involved in  $\beta$  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-

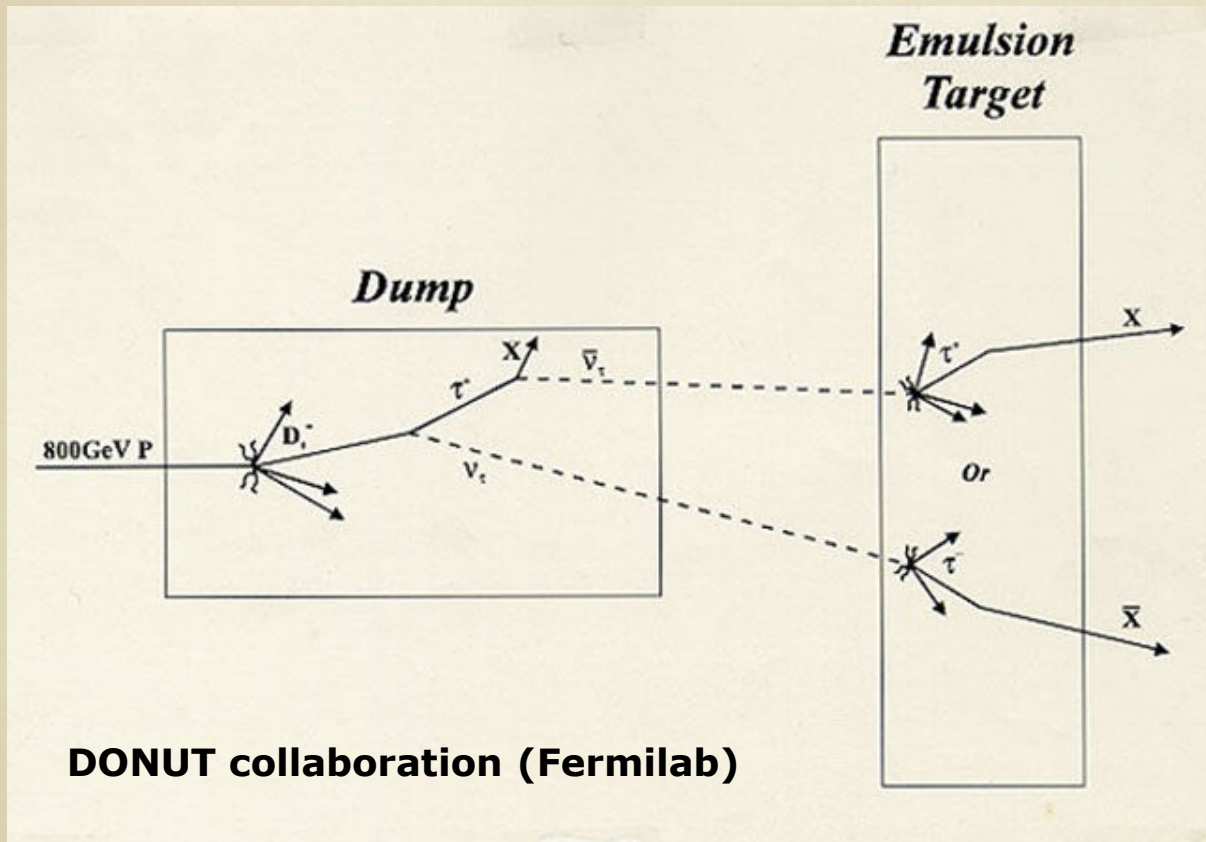


Jack Steinberger, HST 2002

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



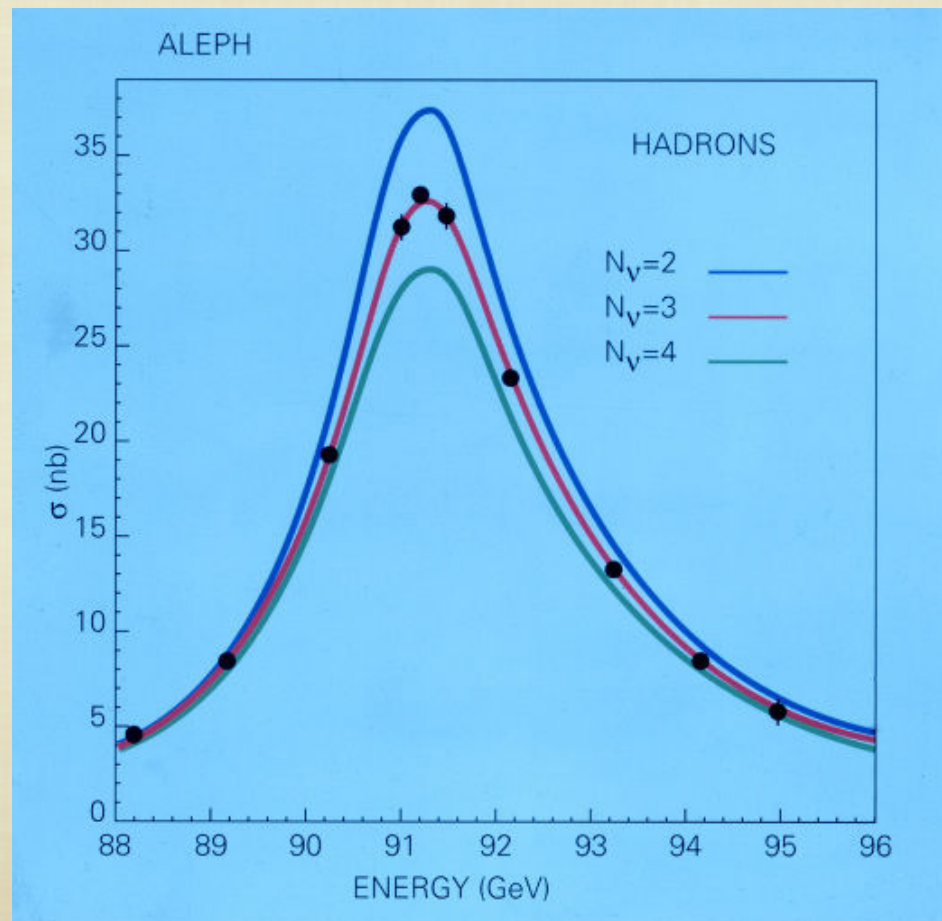
## Entdeckung des Tau-Neutrinos (2000)





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

Am LEP wurde die Zerfallsbreite des  $Z^0$  gemessen

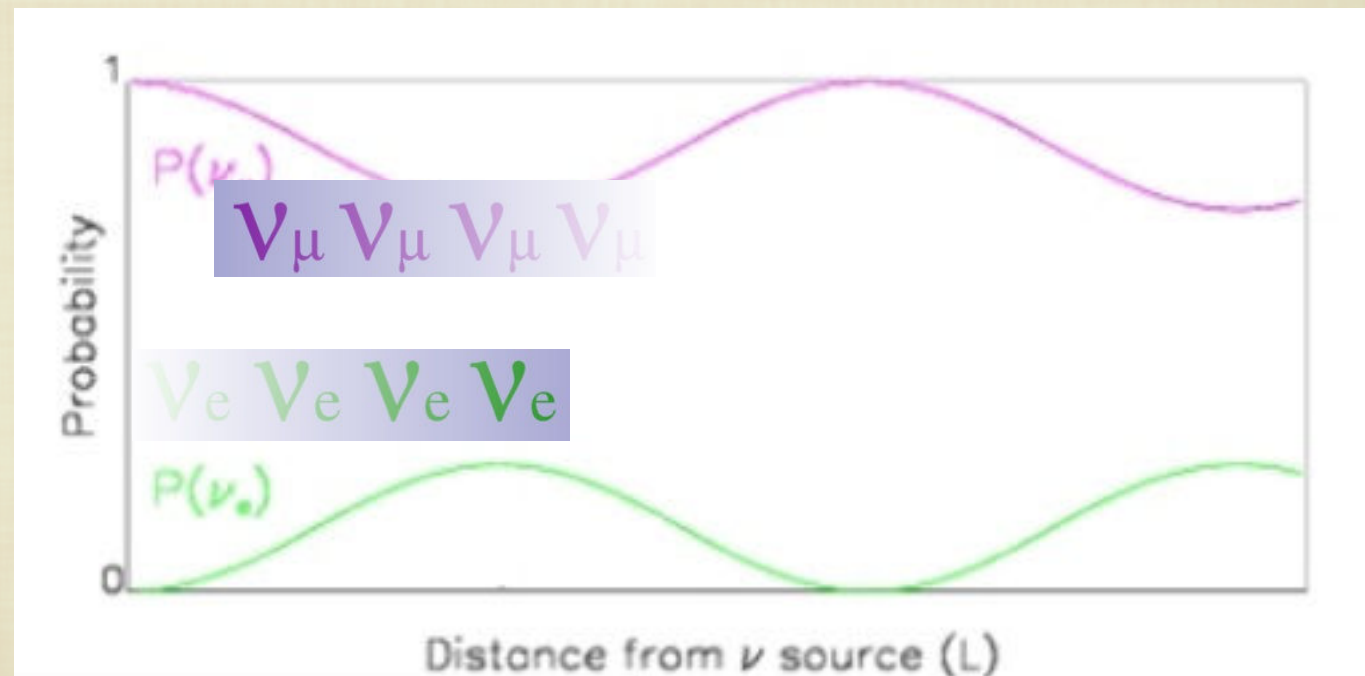
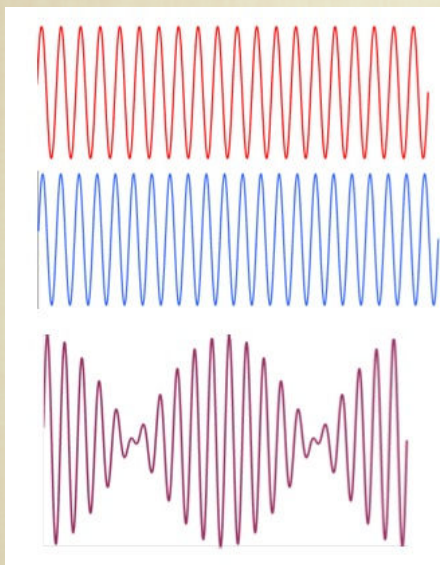




## Haben Neutrinos eine Ruhemasse ?



## Neutrino-Oszillationen

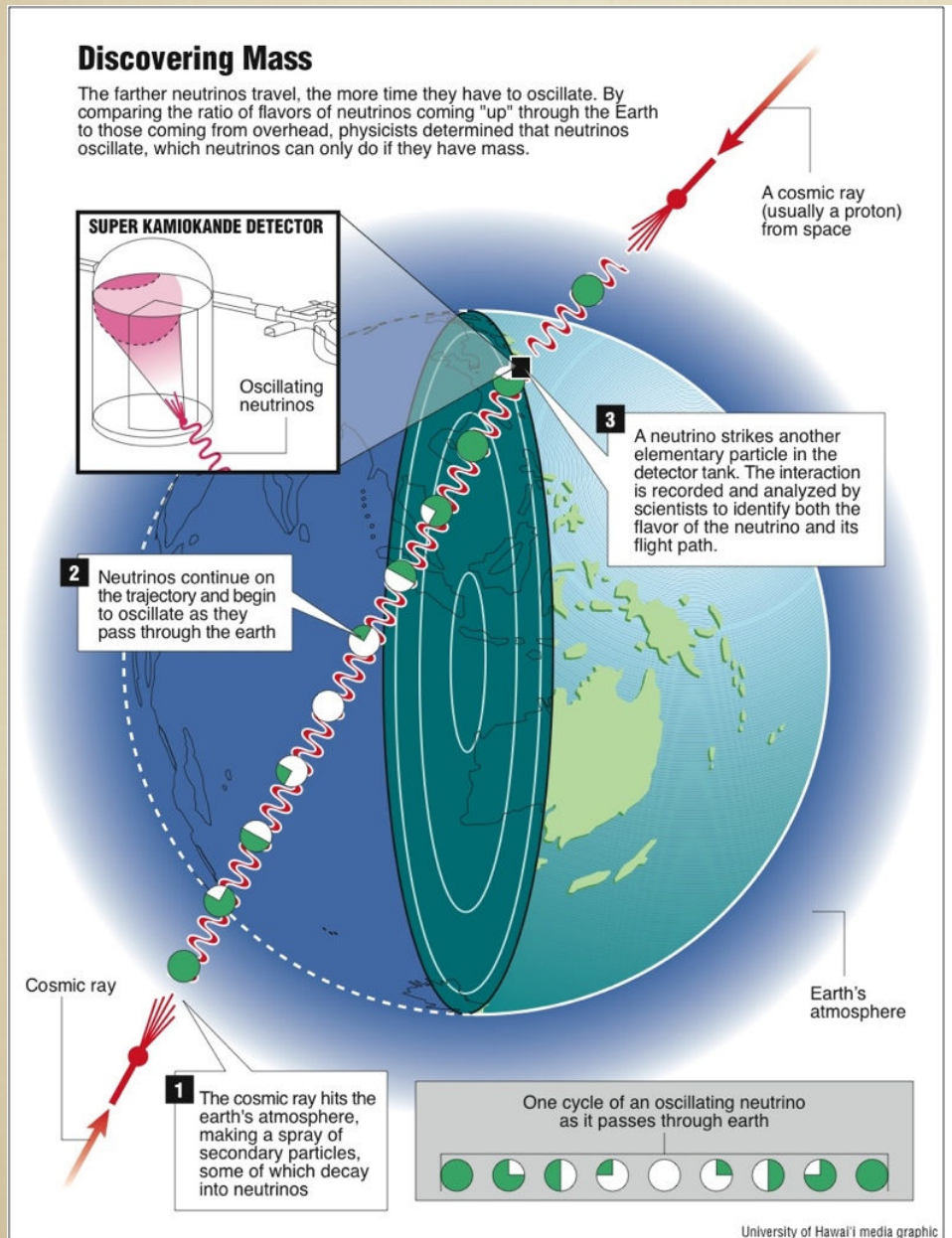


Teilchen werden durch Wellen (mit definierter Frequenz) beschrieben

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)

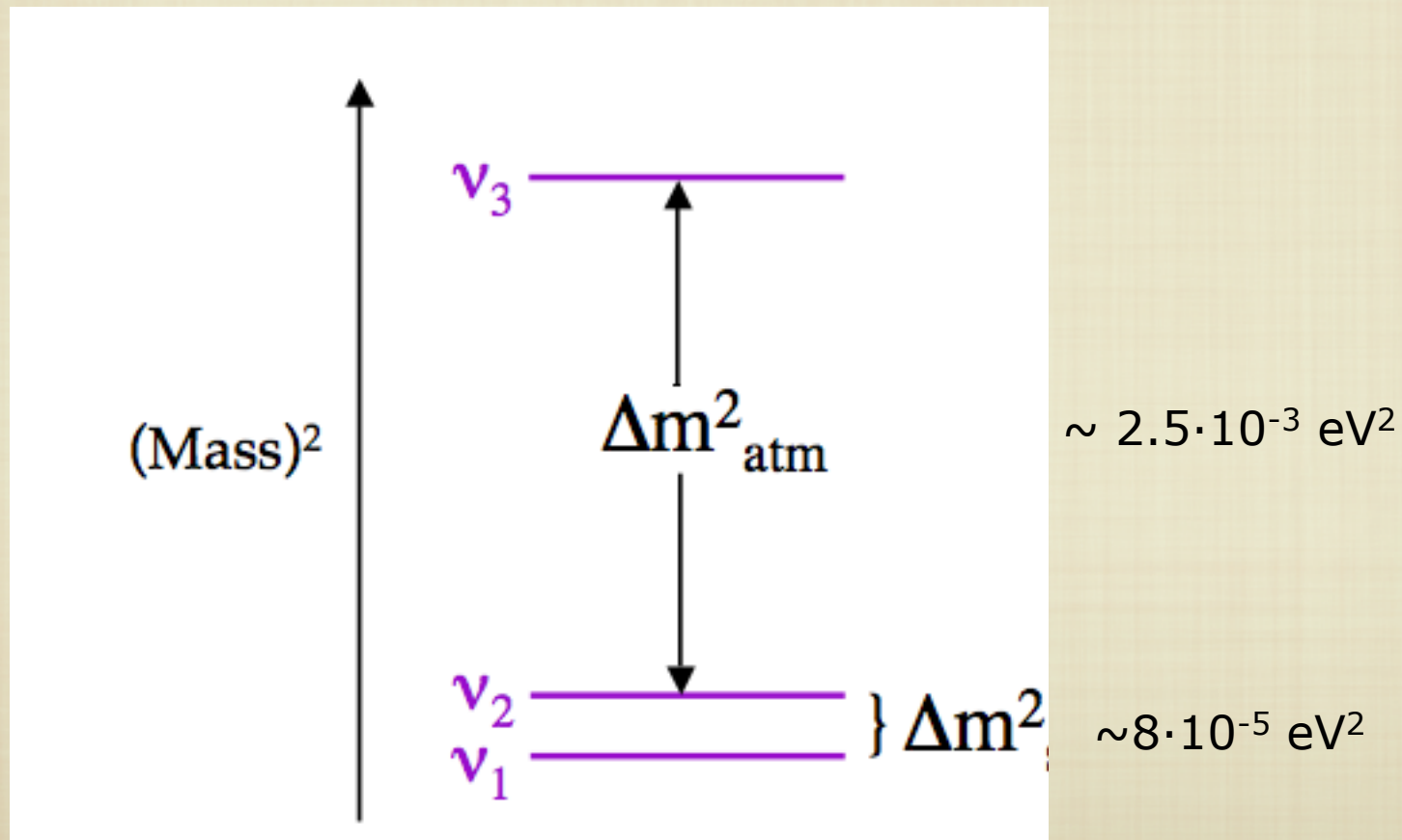
### Erklärung:

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



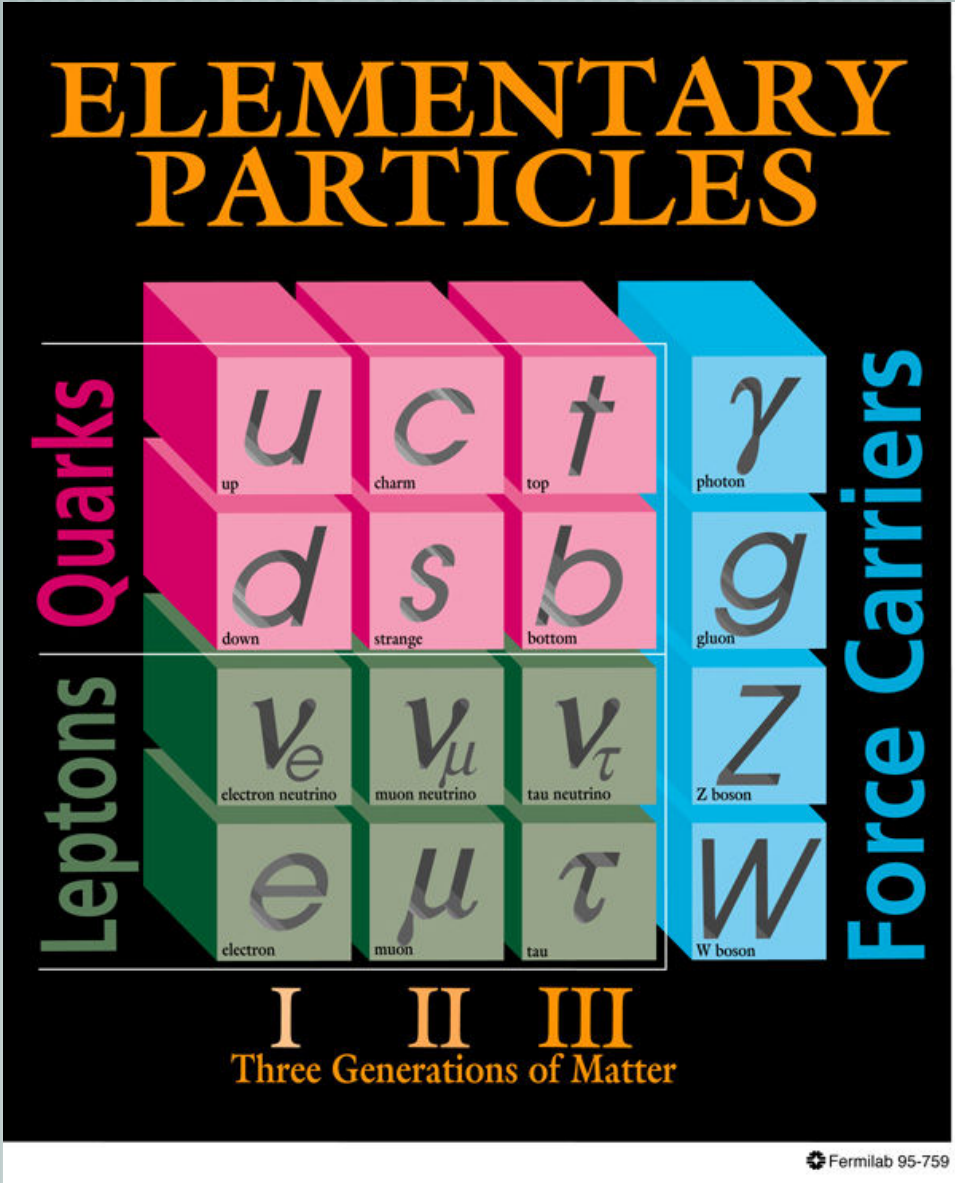
## Neutrinos besitzen eine Masse

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

1900

1905

1910

1920

1930

1940

1950

1960

1970

1975

1980

1990

2000

2010

$e^-$

Atom

Nucleus

$p^+$

$n$

$e^+$

$\mu^-$

$\pi$   
**Particle zoo**

$\tau^-$

$p^-$

$\nu_e$

$u$   $d$   $s$

$\nu_\mu$

$c$

$\tau^-$

$b$

$\nu_\tau$

Brownian motion

Photon

Radio-activity

Special relativity

Quantum mechanics  
Wave / particle  
Fermions / Bosons

Dirac  
Antimatter

Fermi Beta-Decay

Yukawa  
 $\pi$  exchange

QED

P, C, CP violation

W bosons

Higgs

EW unification

GUT

SUSY

Superstrings

QCD Colour

W

Z

g

3 generations

$\nu$  mass

Cosmic rays

General relativity

Galaxies; expanding universe

Dark Matter

Nuclear fusion

Big Bang Nucleosynthesis

Cosmic Microwave Background

Inflation

CMB Inhomogeneities (COBE, WMAP)

Dark Energy (?)

Geiger

Cloud

Cyclotron

Synchrotron

Bubble

$e^+e^-$  collider

Wire chamber

Beam cooling

Online computers

$p^+p^-$  collider

Modern detectors

WWW

GRID



# Universe (1960)

## Age of cosmic objects

less than  $\sim 12$ -13 billion yr

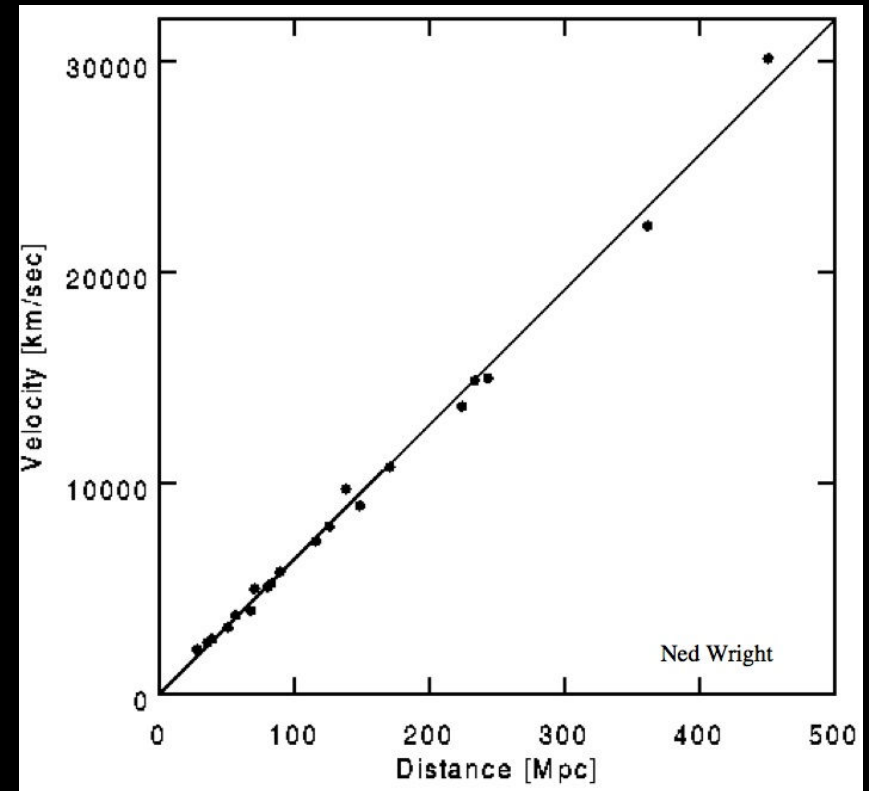
Sun  $\sim 4.7$  billion yr

## Universal Ratio H:He $\sim 3:1$

Snapshot at  $t \sim 3$  min

## Cosmic Microwave Background ?

Predicted (Gamov),  $\sim 5$  K



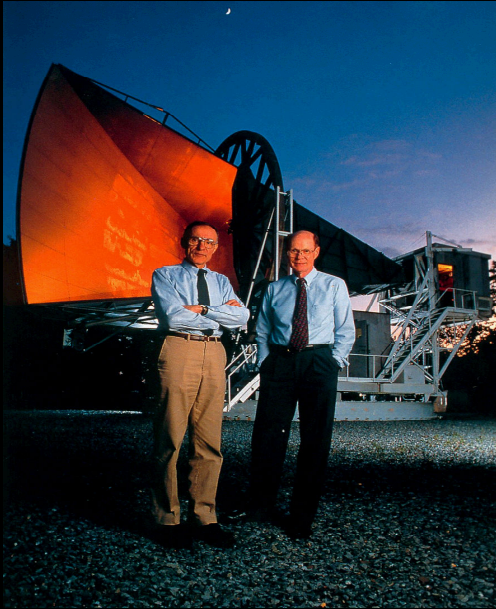
Today:  $H = 70 \pm 3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Hubble age ( $H^{-1}$ )  $\sim 13.4$  billion years

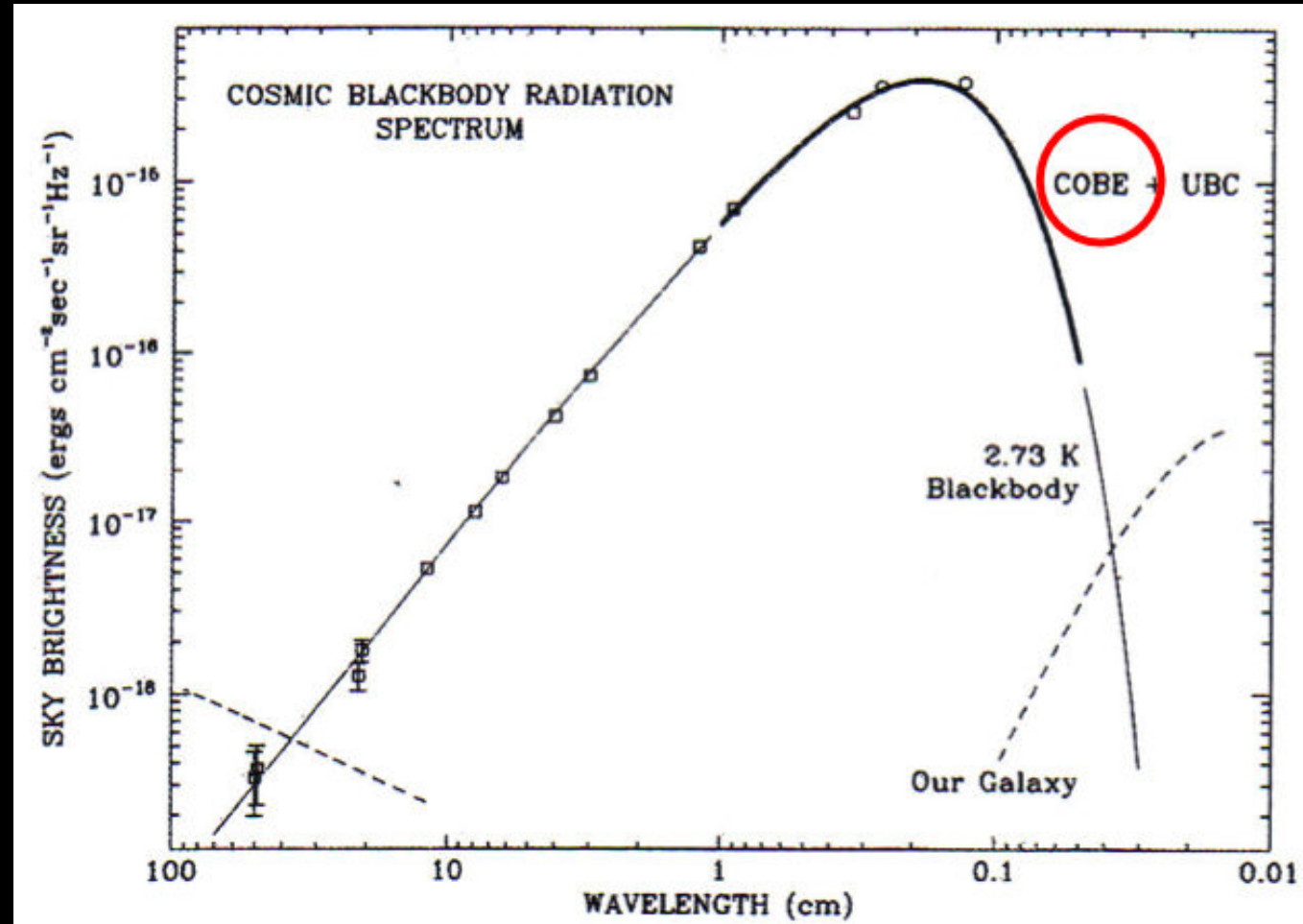


# Universe

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



Penzias and Wilson



The Universe is a perfect 'black body' with  $T = 2.73$  K

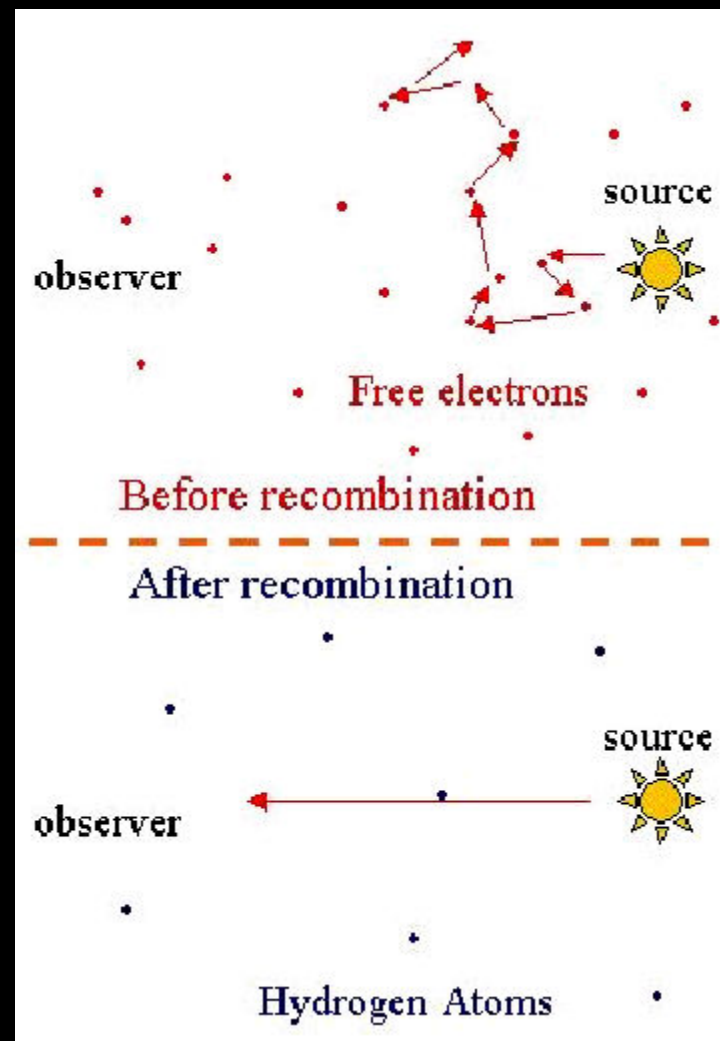


# Universe

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)

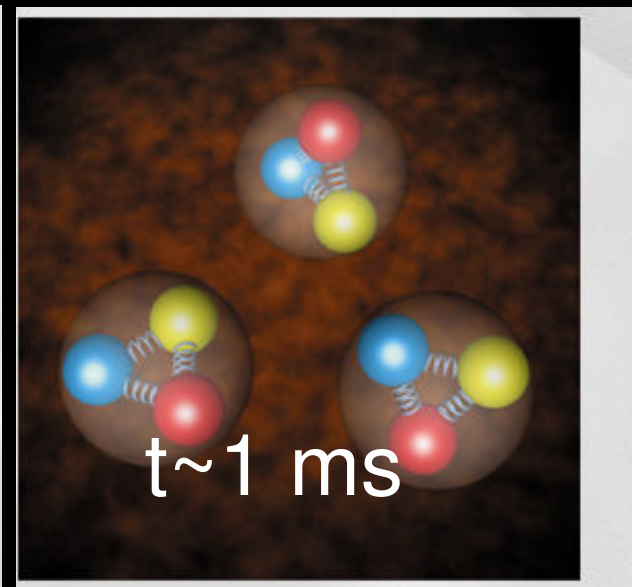
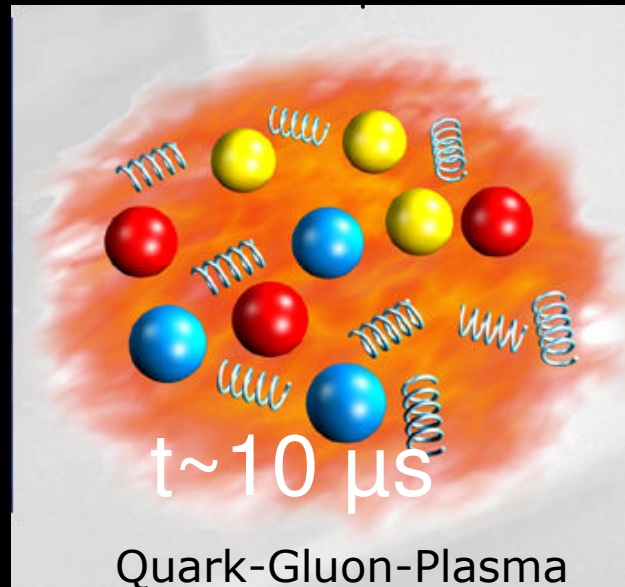
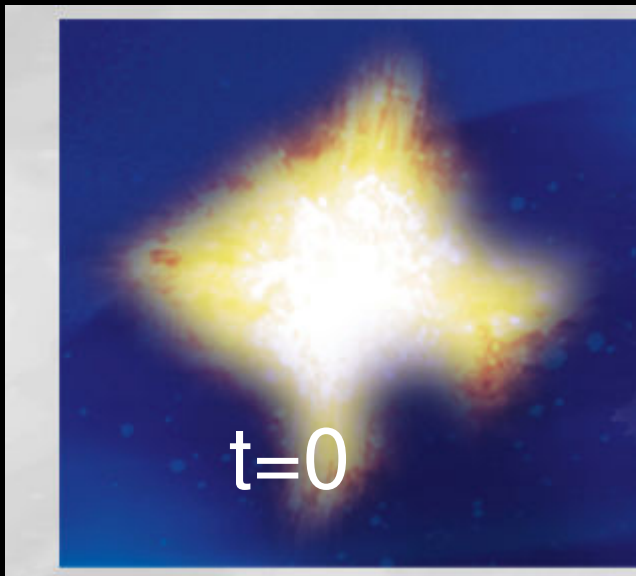






# Universe

Particle Physics pushes the limit of knowledge towards shorter times



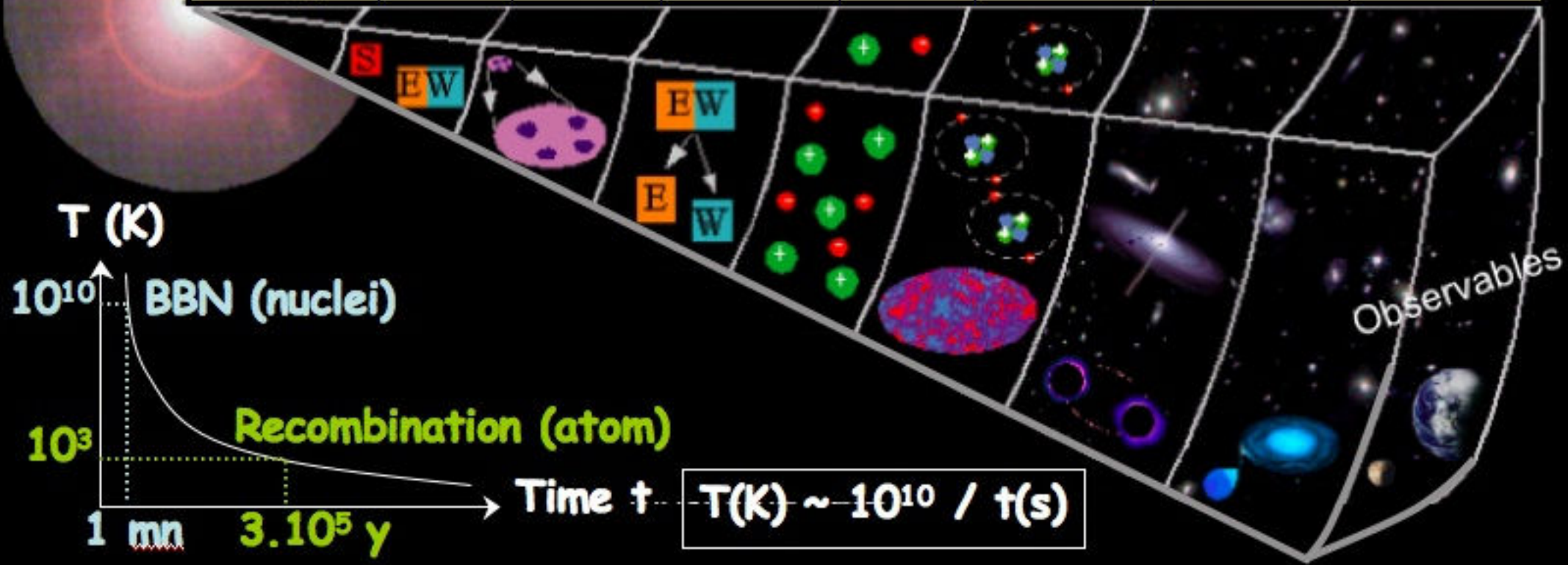
# Universe

The reconstruction of the History of the Universe

Big Bang

Time →

$10^{19}$ GeV	$10^{15}$ GeV	$10^{13}$ GeV	100 GeV	0.3 MeV	4000 K	10 K	3 K
$10^{-44}$ s	$10^{-35}$ s	$10^{-32}$ s	$10^{-10}$ s	300 s	$3 \times 10^5$ yr	$3 \times 10^9$ yr	$15 \times 10^9$ yr
Superstring era (?)	GUT era	Inflation era	Electroweak era	Particle Era	Recombination era	Galaxy & star formation	Present era





# 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

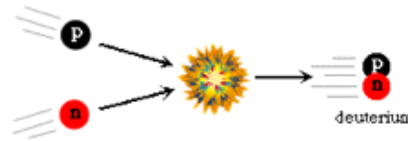
# Universe

## Big Bang Nucleosynthesis

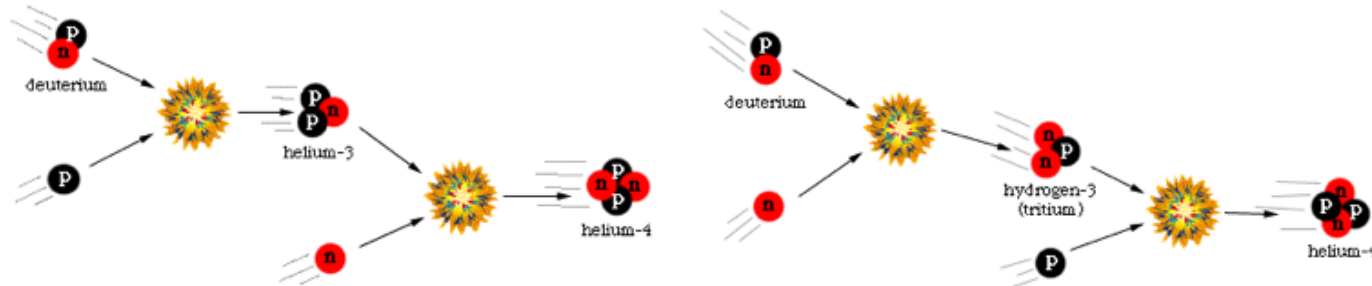
**$t=1-3$  mn,  $T=0.3-0.1$  MeV**

- 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  $\sim \frac{2n}{n+p} \sim 0.25$

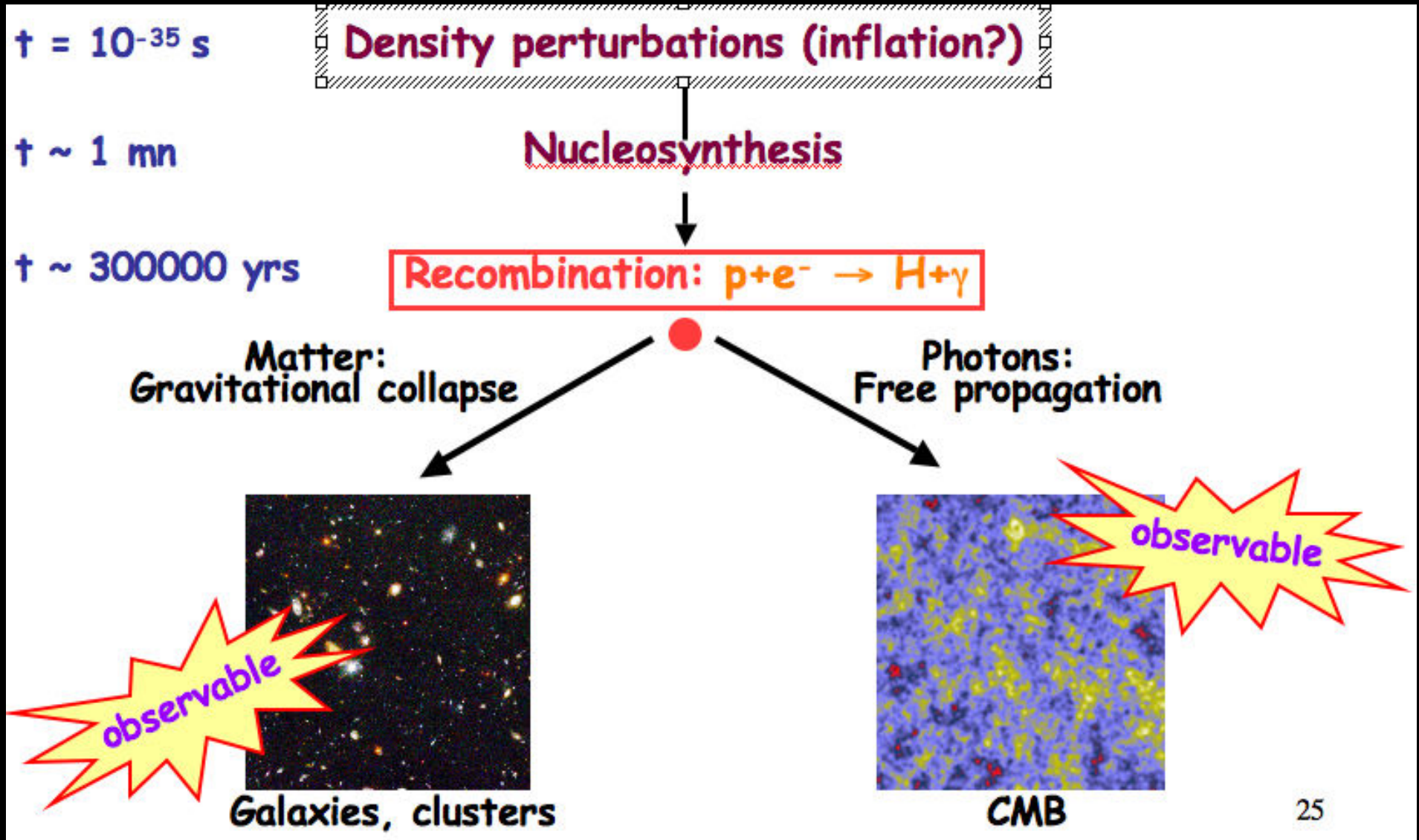
H abundance  $\sim 0.75$

$\eta = n_B/n_\gamma \Rightarrow$  D bottleneck lasts less  $\Rightarrow n/p \Rightarrow \text{He}^4$



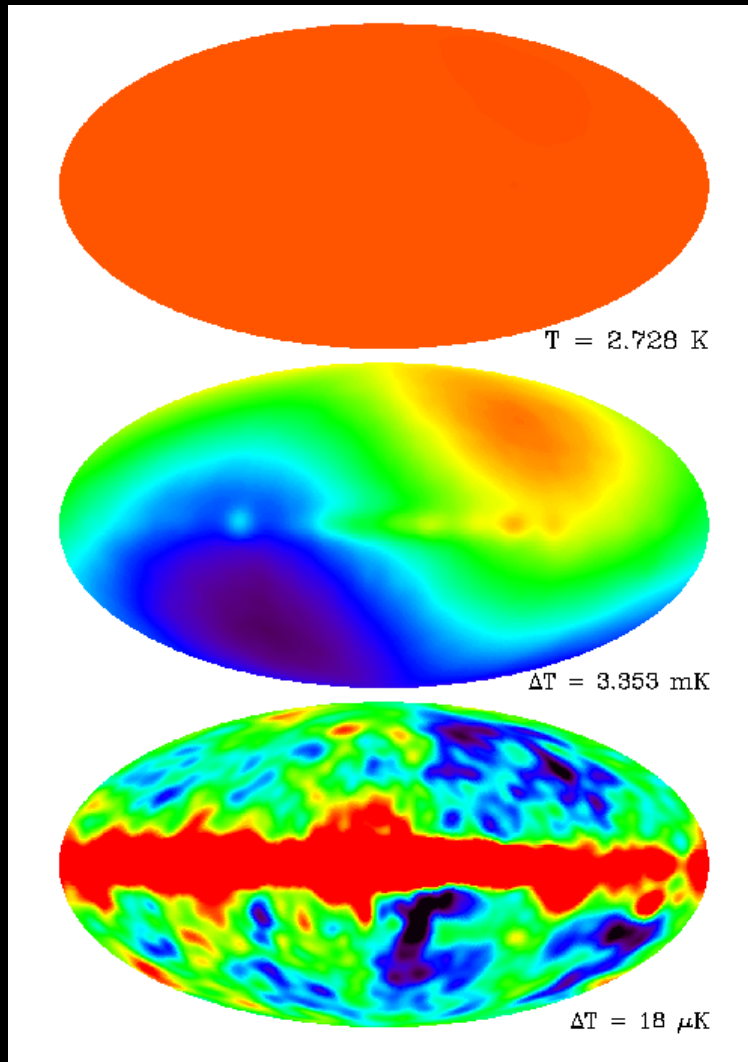
# Universe

## Back to the Beginning



# Universe

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



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

$$\Delta T = 3.3 \text{ mK}$$

(after subtraction of constant emission)

$$\Delta T = 18 \text{ } \mu\text{K}$$

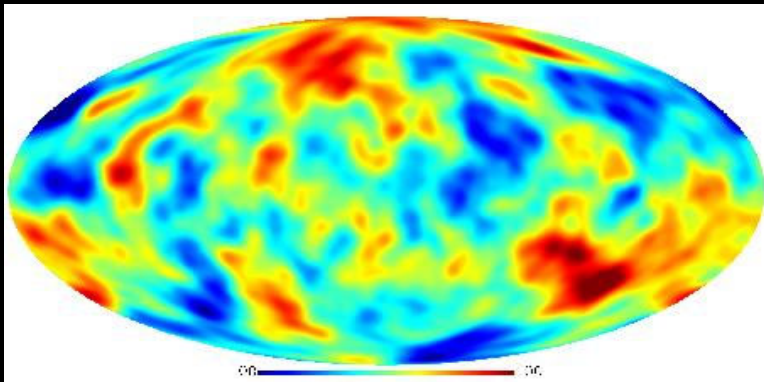
(after correcting for motion of Earth)



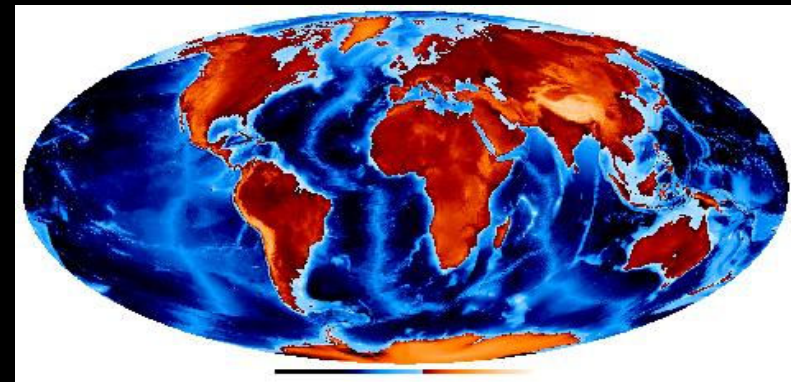
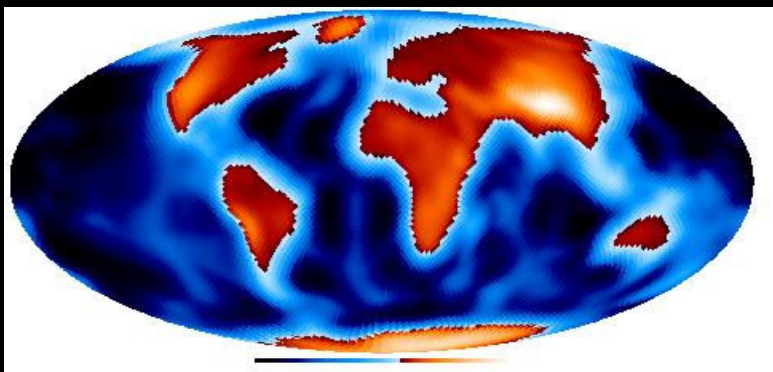
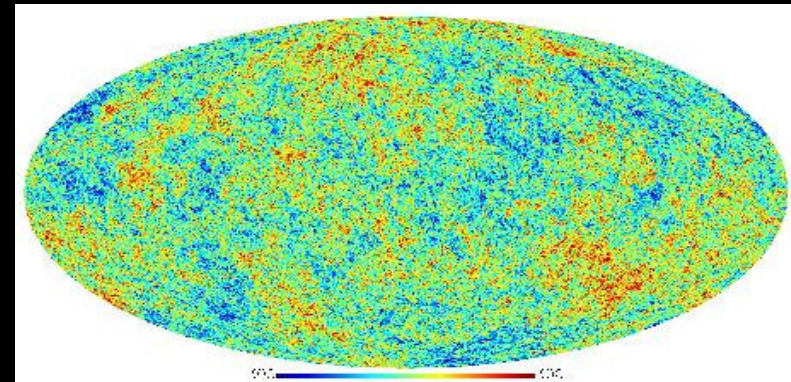
# Universe

The most precise observation today (WMAP)

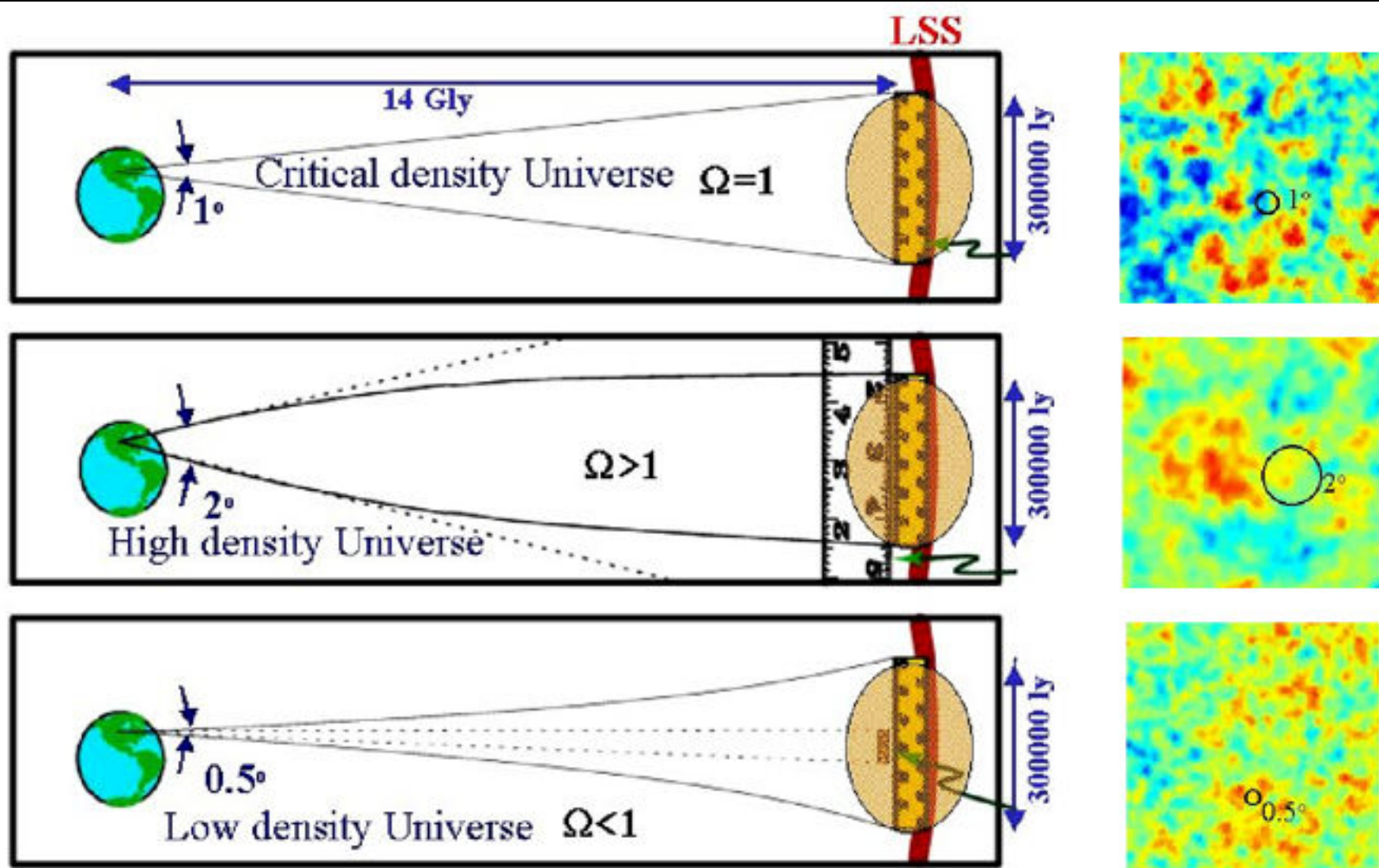
**COBE**  
(7 degree resolution)



**WMAP**  
(0.25 degree resolution)



# Analysis of inhomogeneities reveals the composition of the Universe

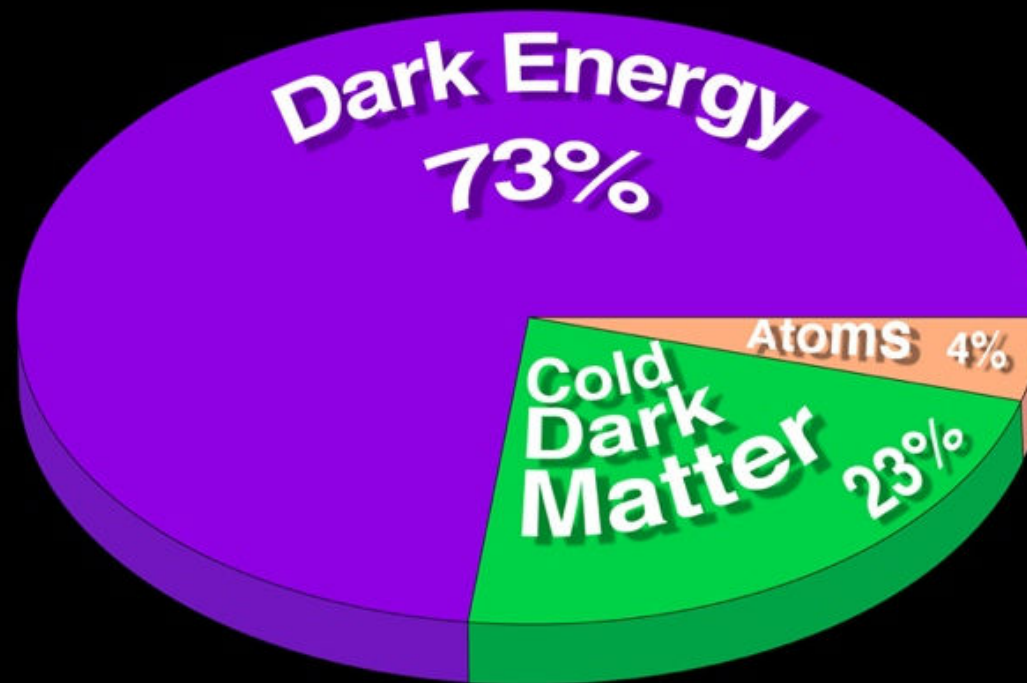


⇒ Max scale relates to total content of Universe  $\Omega_{tot}$



# Universe

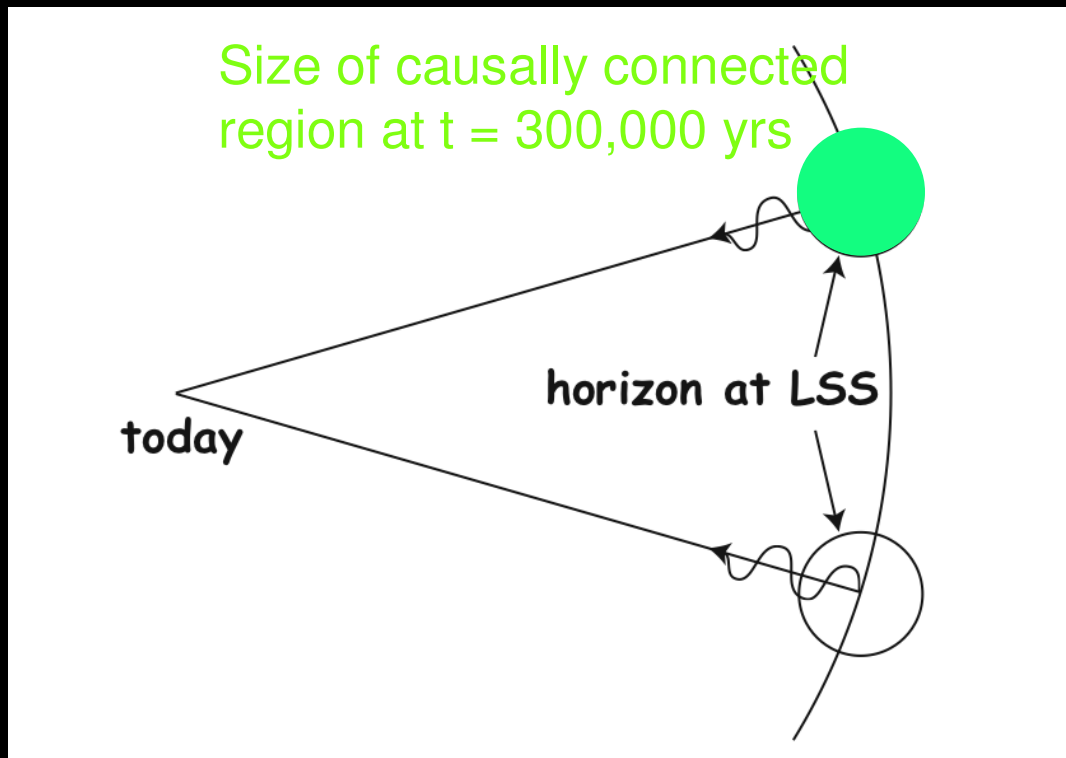
The strange composition of the Universe



# Universe

## The horizon problem :

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



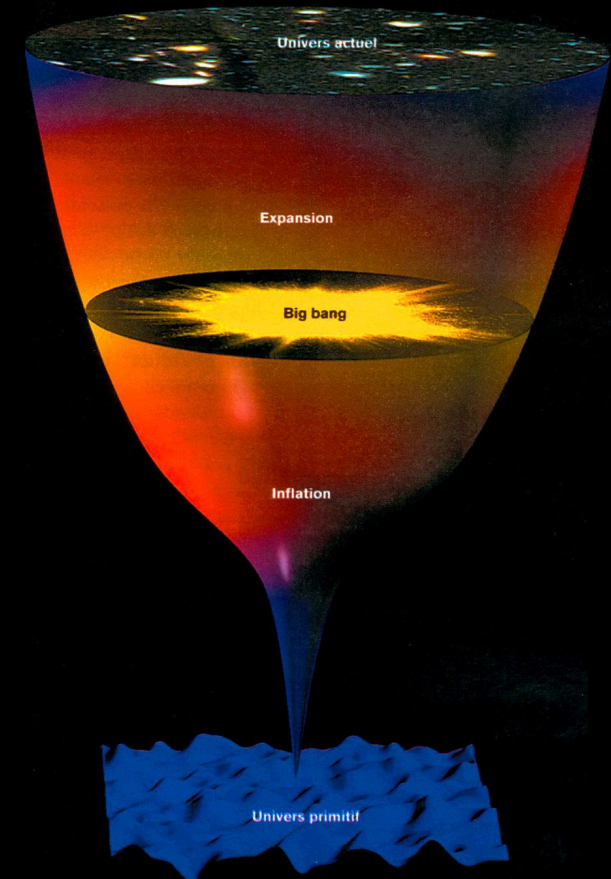
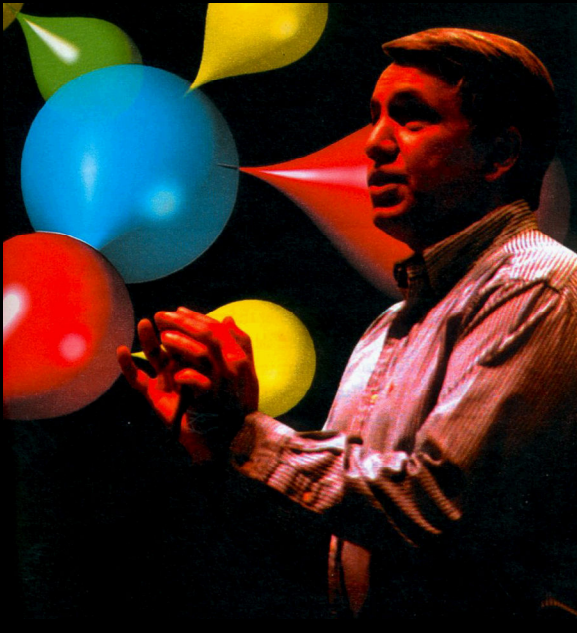
$$\text{Angle} \sim \frac{10^3 \times 3 \cdot 10^5}{14 \cdot 10^9} \text{ rad} \sim 1^\circ$$



Guth/Linde (1980)

# Universe

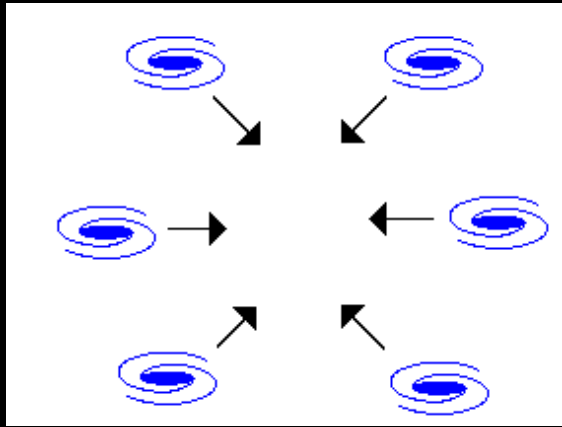
The Universe went through a phase of superluminal expansion, driven by an 'inflaton' field



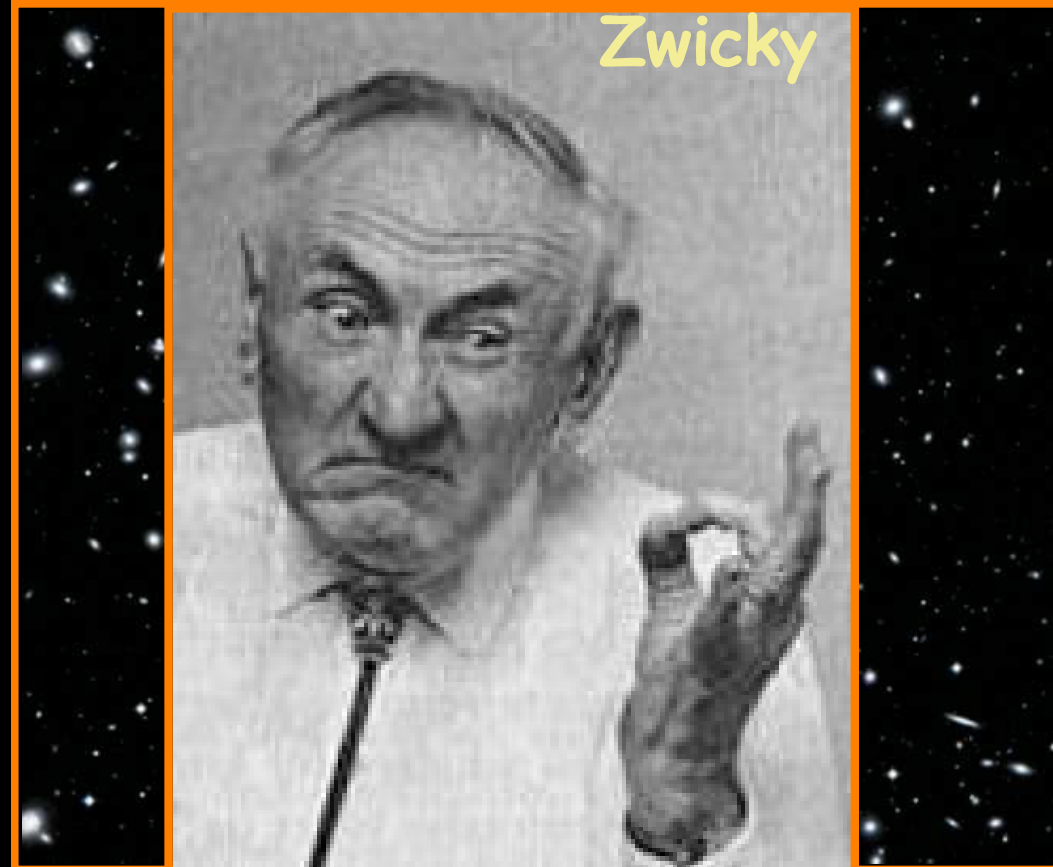
solves two big problems:  
1) the flatness of the Universe  
2) the horizon problem

# Universe

## Evidence for Dark Matter (1933)



Mass of luminous matter  
=  
10%  
Gravitational mass



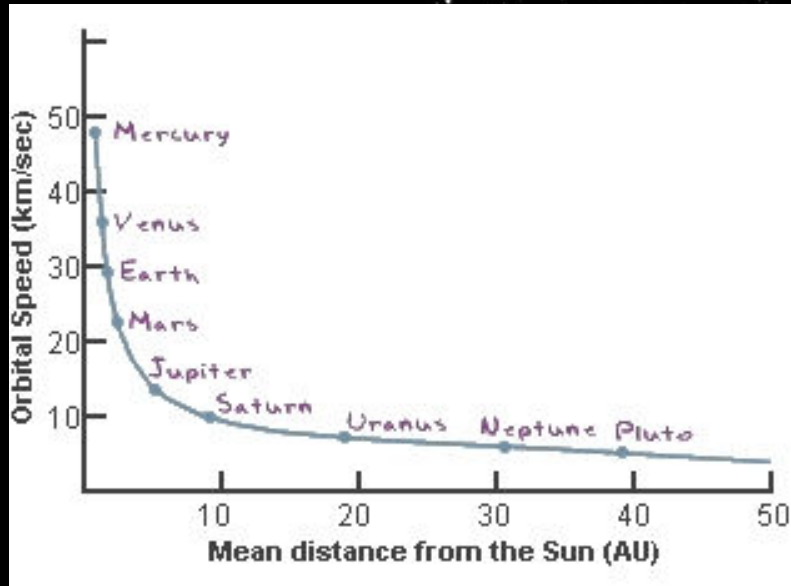


# Universe

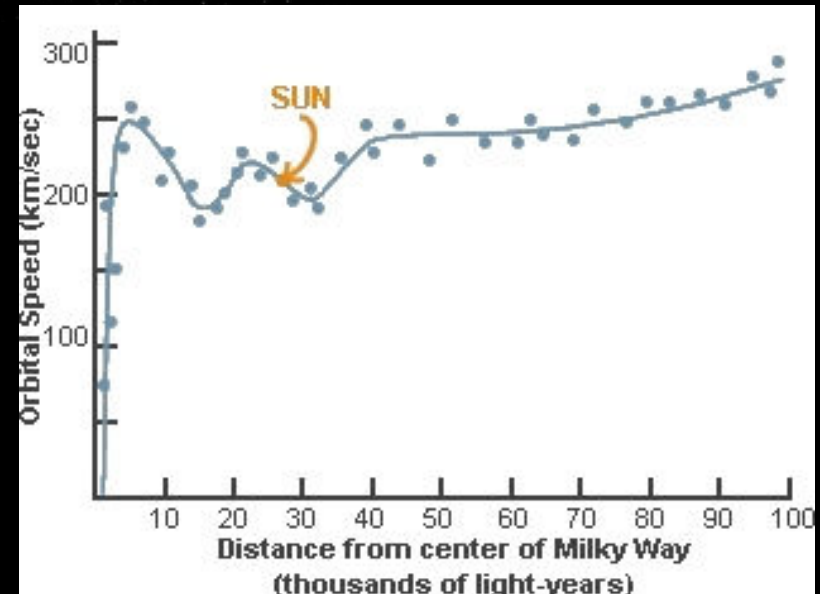
## MORE EVIDENCE FOR “DARK MATTER”



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



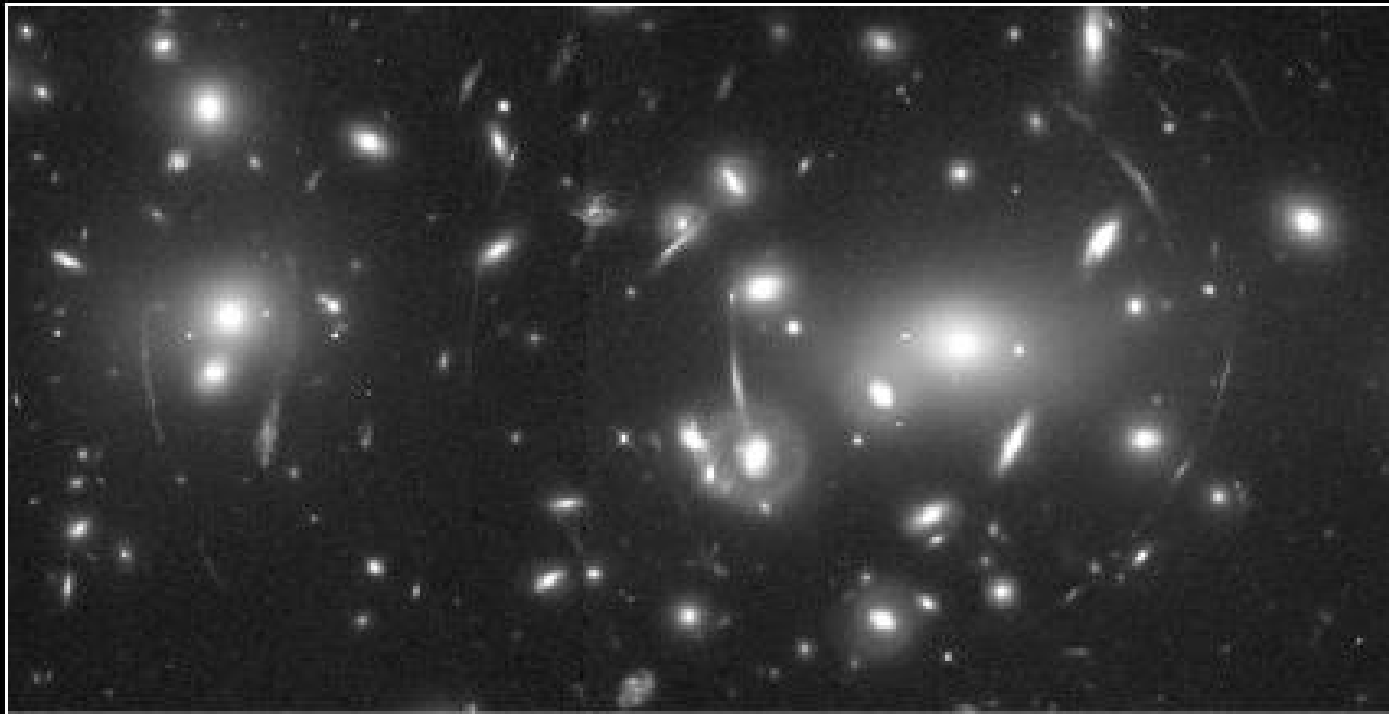
One central mass (Sun)



Milky Way

# Universe

AND EVEN MORE EVIDENCE FOR “DARK MATTER”



**Gravitational Lens in Abell 2218**

HST - WFPC2

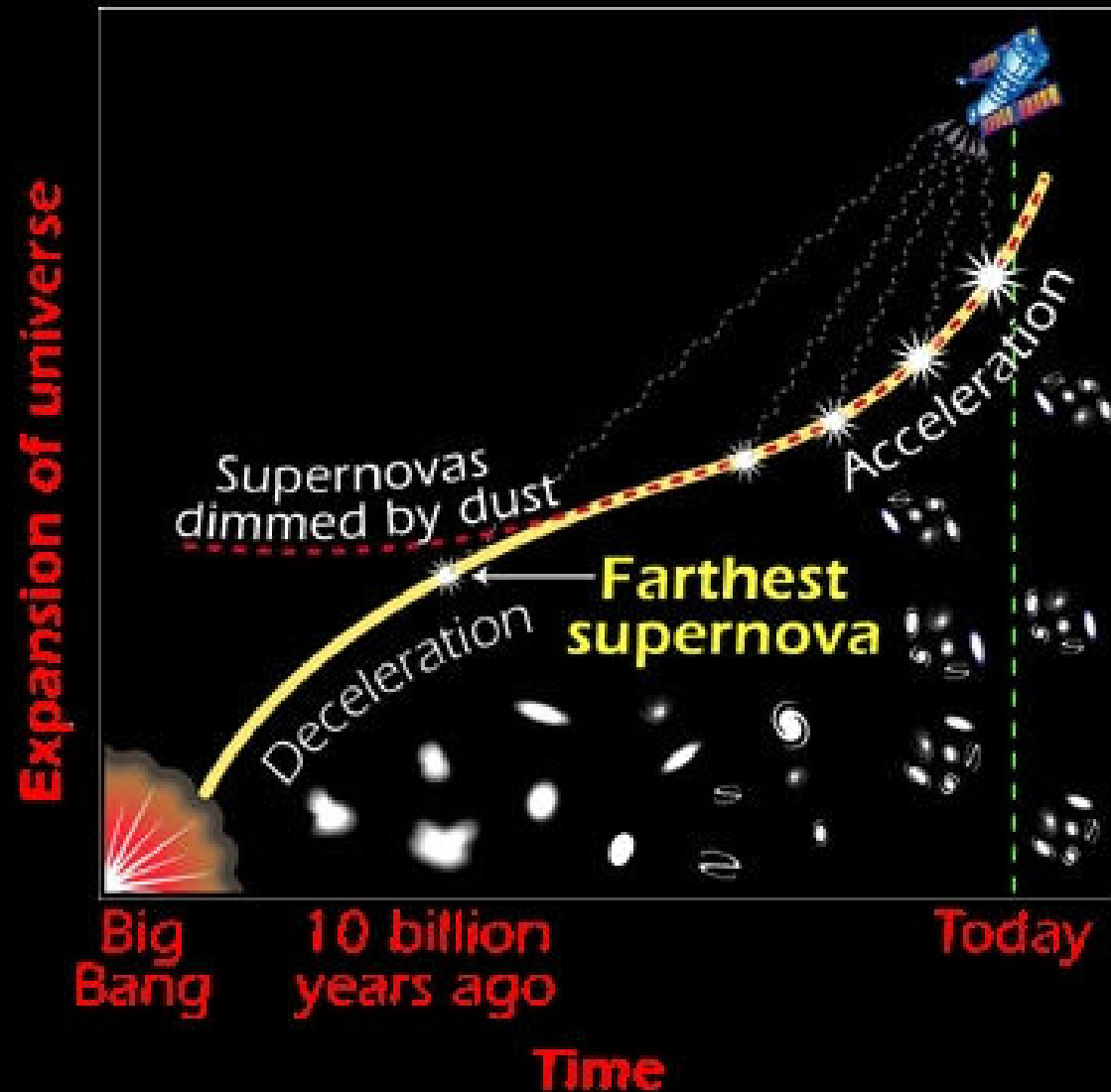
PF95-14 - ST ScI OPO - April 5, 1995 - W. Couch (UNSW), NASA

GRAVITATIONAL LENSING



# Universe

## Evidence for Dark Energy



# DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

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

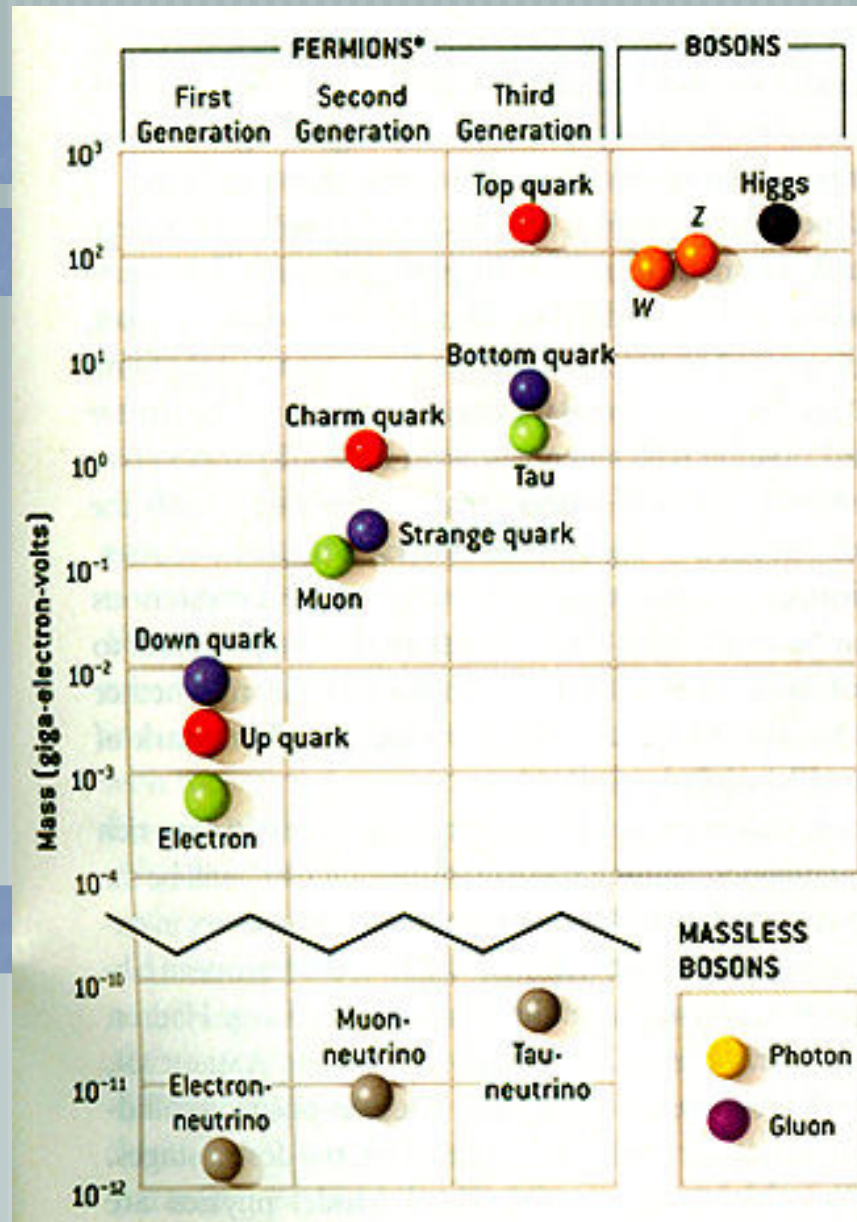
1 TeV →

100 GeV →

1 GeV →

1 MeV →

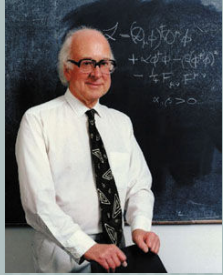
0.01 eV →





# DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

## Was ist so besonders am Higgs-Feld?



Sir Peter Higgs

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)

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...

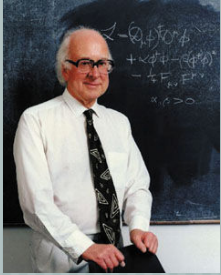
*Das Higgs-Feld ...*

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

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

# DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

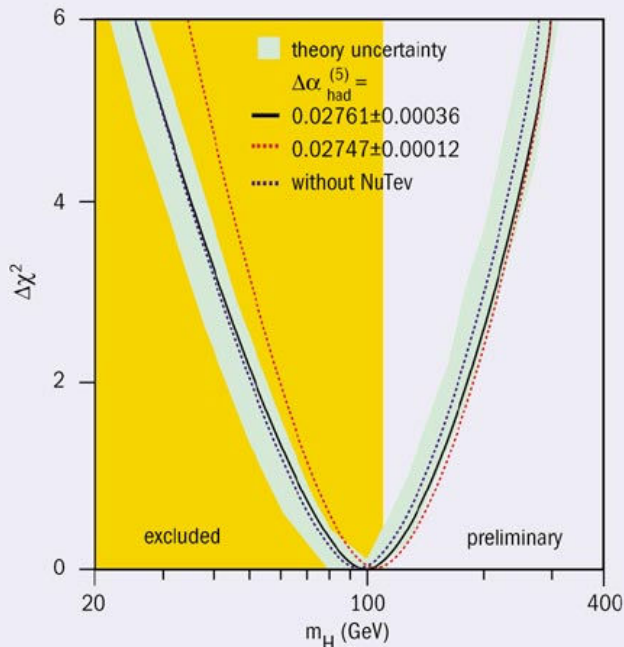
## Das Higgs-Teilchen



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 ?

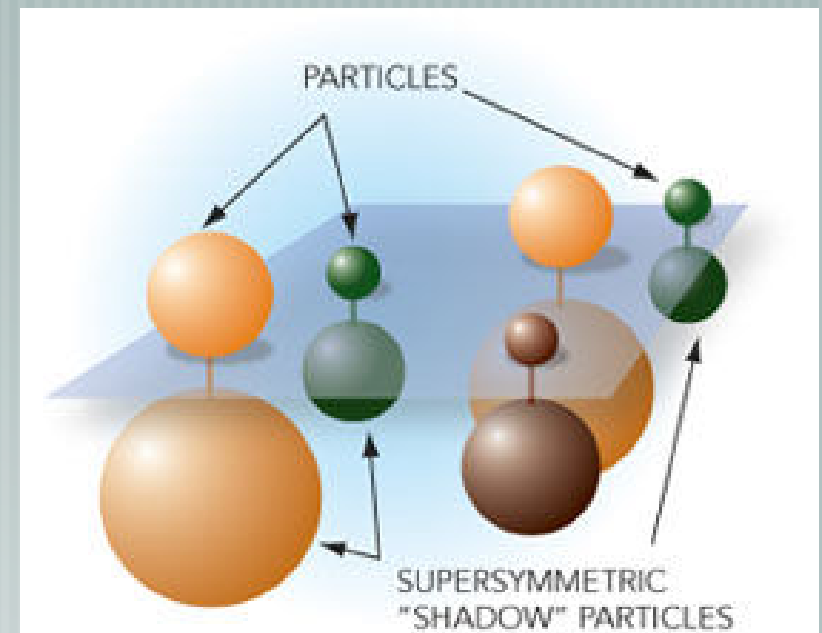
'Materie'teilchen (Spin  $1/2$ =Fermion) wechselwirken durch den Austausch von 'Feld'teilchen (Spin  $1$ =boson):

### 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



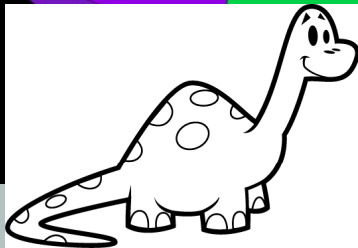
Falls diese 'Super'-Partner existieren, müssen sie sehr massiv sein ( $> 200$  GeV)

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

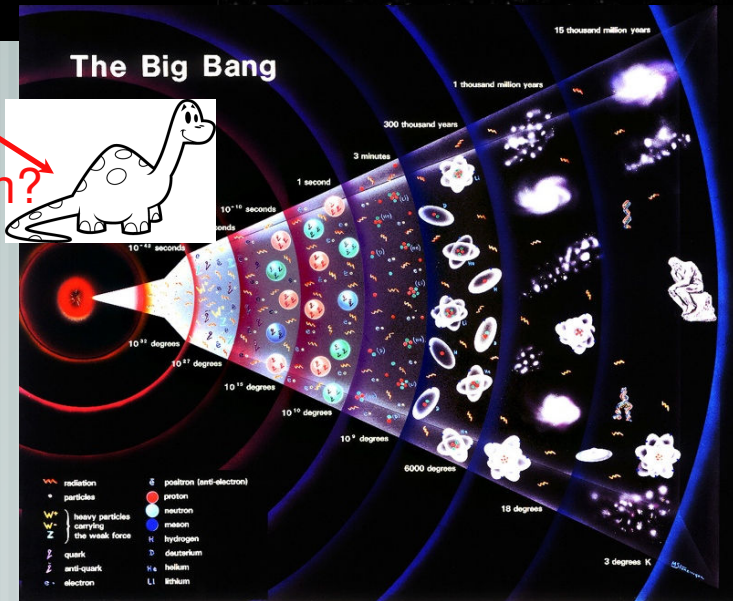
# DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS



Wir+Planeten+Sterne



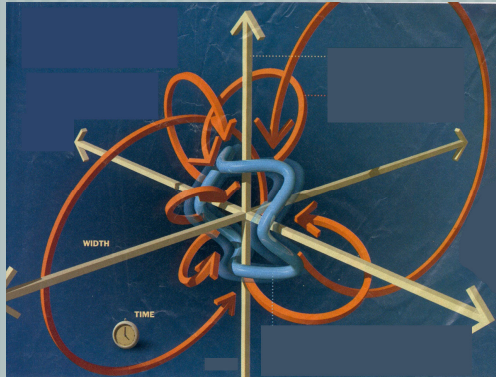
SUSY = Dunkle Materie-Teilchen?  
Überbleibsel vom Big Bang?





# DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS

## Was sind Teilchen?



## Superstrings in 10 Dimensionen?

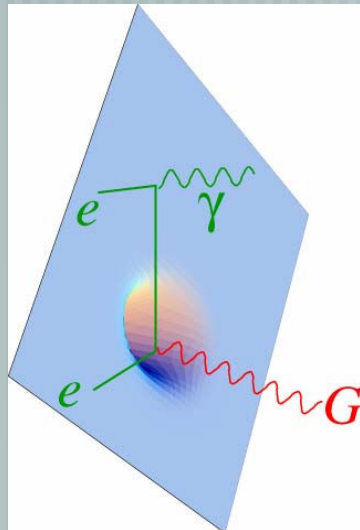
Sind Teilchen kleine 'Strings' die im 10-dimensionalen Raum vibrieren?  
Länge  $\sim 10^{-35}$  m (Planck Länge)  
Verschiedene Schwingungsmoden entsprechen verschiedenen Teilchen  
Graviton ist im Spektrum enthalten!

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?

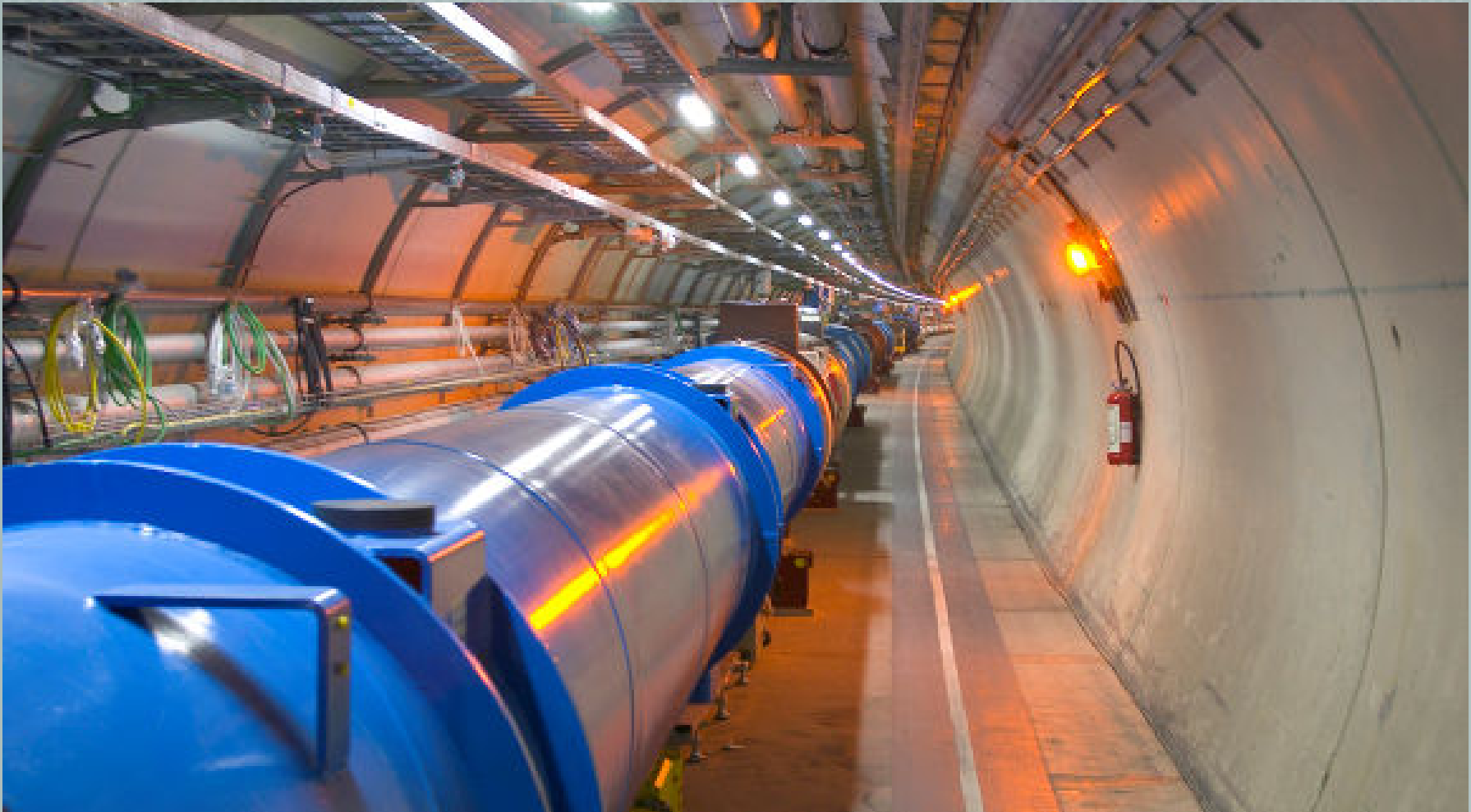
Warum hat das Vakuum eine so geringe Energie?

Die Physik des 21. Jahrhunderts ...



# **DIE RÄTSEL DES 21. JAHRHUNDERTS**

**LHC START IM JAHR 2008**



**Neue Entdeckungen !**