

Spezial-Vorlesung im SS 2000 an der Universität Augsburg:

# Einblicke in die aktuelle Teilchenphysik

gehalten von

Priv. Doz. Dr. O. Biebel

MPI für Physik, Föhringer Ring 6, 80805 München,  
e-mail: biebel@mppmu.mpg.de, Tel: 089/32534-463

Themen der Vorlesung:

- Einleitung: Von der Kosmologie zur Teilchenphysik,
- Beschleuniger und Detektoren,
- Ein Standardmodell der Teilchen und der Kräfte:  
die elektroschwache Wechselwirkung ...
- ... und die starke Wechselwirkung,
- Das Proton und seine innere Struktur,
- Ein neuer Materiezustand: Das Quark-Gluon-Plasma,
- Quarks und fundamentale Symmetrien in der Natur,
- Experimente zu Neutrinos und ihrer Masse,
- Das Higgs-Teilchen und seine Rolle bei den Teilchenmassen,
- Gültigkeitsgrenzen für das Standardmodell:  
Experimente an Beschleunigern ...
- ... und Experimente mit kosmischer Strahlung,
- Teilchenphysik und Kosmologie: Zukunft der Teilchenphysik.

Termin der Vorlesung:

Donnerstags, 12:30 - 14:00 Uhr, Seminarraum: 1005  
Beginn: 04. Mai 2000

## ● Organisatorisches:

▶ Termin der Vorlesung ?  
(Tag / Uhrzeit)

▶ Ersatztermine für

1.6.

22.6.

27.7.

▶ ...

# Literatur

vielfältige Auswahl, z.B.

E. Lohrmann: *Einführung in die Elementarteilchenphysik*  
Teubner, ~ 30 DM

E. Lohrmann: *Hochenergiephysik*  
Teubner, ~ 40 DM

D. H. Perkins: *Hochenergiephysik*  
Oldenbourg, ~ 90 DM

D. H. Perkins: *Introduction to High Energy Physics*  
Cambridge UP, ~ 50 US-\$

D. Griffiths: *Introduction to Elementary Particles*  
Wiley & Sons, ~ 110 DM HC  
~ 80 DM SC

F. Halzen & A. Martin: *Quarks & Leptons*  
Wiley & Sons, ~ 92 DM

P. Renton: *Electroweak Interactions*  
Cambridge UP, ~ 55 US-\$

O. Nachtmann: *Phänomene und Konzepte d. E-Teilchenphys.*  
Vieweg, ~ 90 DM

und viele andere

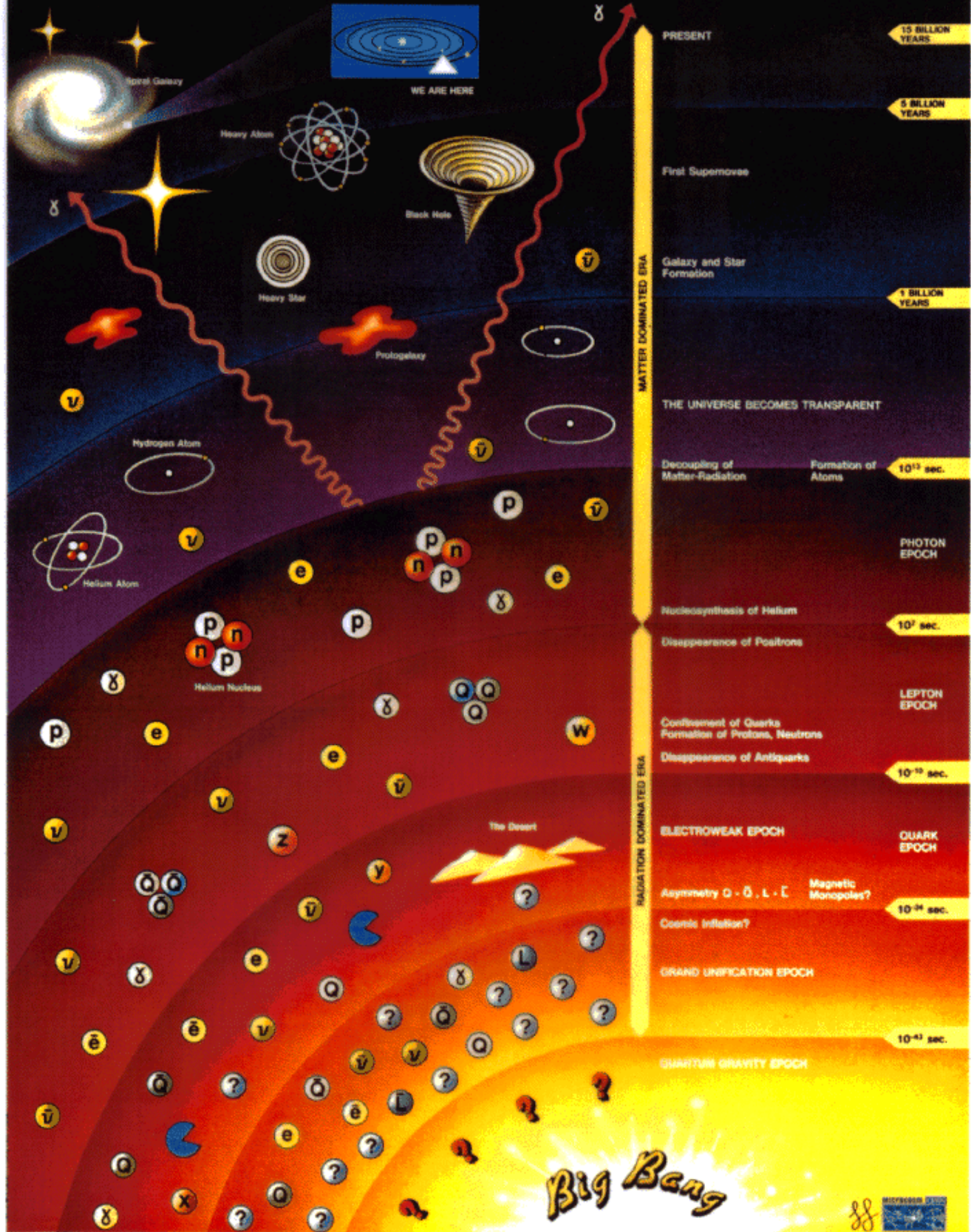
# Einleitung

## Meilensteine der Elementarteilchenphysik:

- 1897 J.J. Thomson Entdeckung des Elektrons  
( $e/m$  Messung)
- { 1900 M. Planck Quantisierung der elektromagnet. Strahlung
- { 1905 A. Einstein Erklärung d. photoelektr. Effektes
- { 1923 A.H. Compton Compton-Effekt: Wellenlängenverschiebung nach Streuung an Elektron  
→ Entdeckung des Photons  
(Name stammt von Gilbert Lewis, Chemiker, 1926)
- 1911 E. Rutherford Kern des Wasserstoff-Atoms  
→ Entdeckung des Protons
- 1932 J. Chadwick Entdeckung des Neutrons
- 1930 W. Pauli Postulat des Neutrino

Genügt, um status quo der Welt zu erklären

# History of the Universe



# Meilensteine

Aber: Wie hat sich das Universum zu diesem Zustand entwickelt?  
und noch viele weitere Fragen ...

Außerdem:

- { 1927 P. Dirac Postulat der Anti-Elektronen
- 1931 C. Anderson Entdeckung des Positrons

1934 H. Yukawa Postulat von Mesonen als Träger der Kernkraft.

Konzept: Kernteilchen tauschen ein "Feldquant" aus (analog zum Photon)

Abschätzung: Reichweite  $\approx$  Kerngröße  $\approx 10^{-15}$  m

Unschärferelation:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$  für beobachtbare Vorgänge

→ borge  $\Delta E'$  für  $\Delta t'$ , so daß  $\Delta E' \Delta t' \approx \hbar$   
 $\Delta E' \approx$  Masse des "Feldquant"

Reichweite:  $\Delta R = c \cdot \Delta t' = \frac{\hbar c}{\Delta E'} \Rightarrow$  Masse  $m_\pi$

$\Rightarrow$  Masse  $\approx 300$  Elektron- bzw.  $\frac{1}{6}$  Protonenmasse

$\Rightarrow$  Postulat der Mesonen

# Entdeckung des Positrons

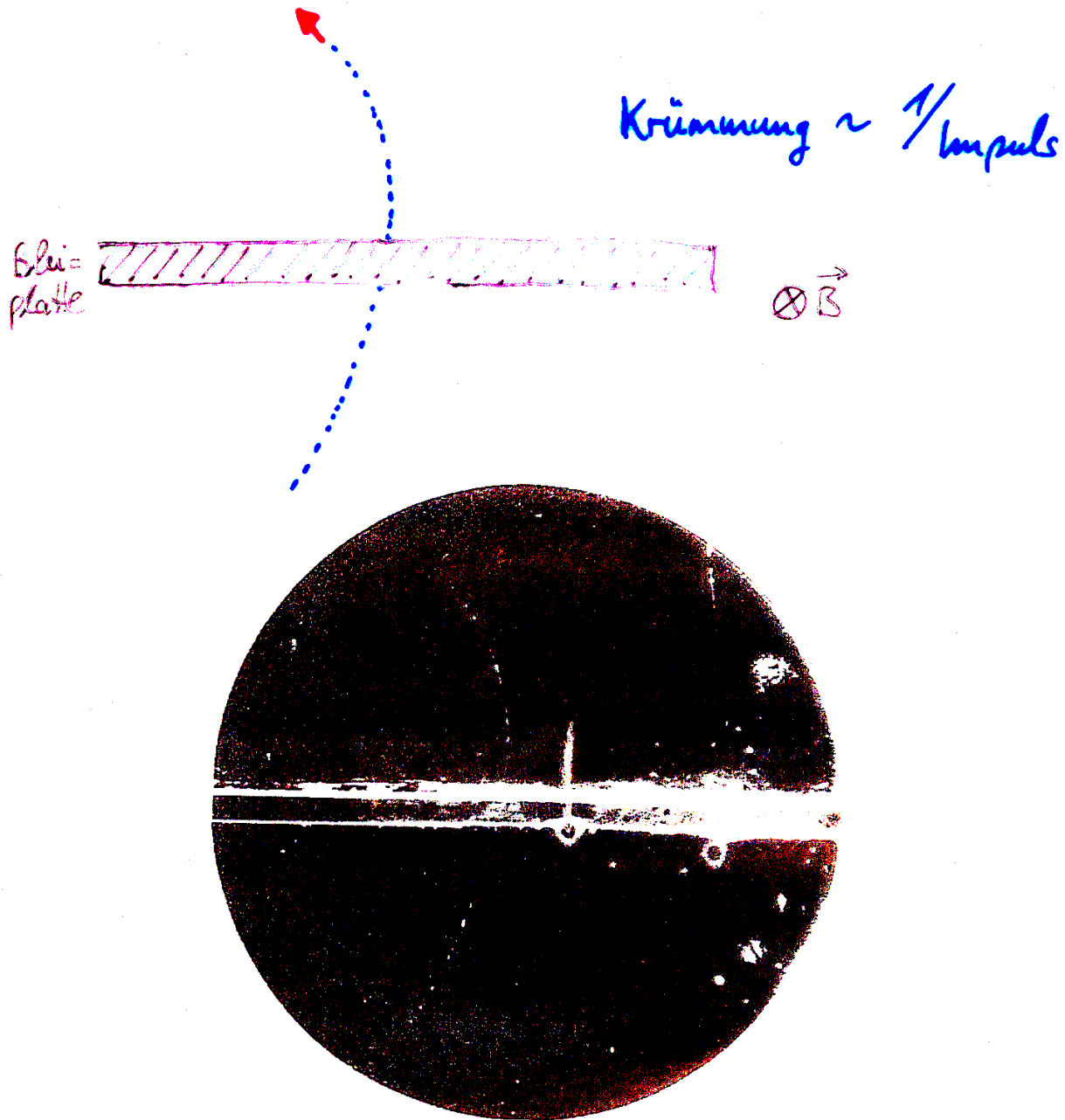


Fig. 1.2 Discovery of the positron by Anderson in 1932, in a cloud chamber. The particle's momentum and sign of charge are inferred from its direction and curvature in the applied magnetic field. It loses energy in the central lead plate, and was therefore moving upwards and positive. The droplet density along the track implies a velocity  $v \simeq c$  and thus a small mass.

# Meilensteine

- 1947 C.F. Powell Entdeckung der  $\pi$ -Mesonen  
(Höhenstrahlungsexperiment)
- 1937/38 ~~Street, Stevenson~~  
Anderson, Neddermeyer Entdeckung der Myonen  $\mu$   
 $\mu$  zeigt keine Wechselwirkung mit Kernen  
Lebensdauer  $\approx 2 \mu\text{s}$   
Masse  $\approx 200$  Elektronenmassen  
verhält sich wie ein schweres Elektron
- 1947 G.D. Rochester Entdeckung seltsamer Teilchen  
C.C. Butler  
große Lebensdauer  $10^{-8} \text{ s}$   
große Masse  $\geq 1000$  Elektronenmasse
- ... Entdeckung vieler hundert Elementarteilchen!
- 1956 C.L. Cowan, F. Reines Entdeckung des Neutrinos
- 1964 M. Gell-Mann Quarkmodell der Hadronen  
G. Zweig
- 1974 C.C. Ting, B. Richter Entdeckung des  $J/\psi \rightarrow$  charm Quarks
- 1975 M. Perl Entdeckung des  $\tau$ -Leptons
- 1978 S.W. Herb u.a. Entdeckung des  $\Upsilon \rightarrow$  bottom Quarks
- 1983 C. Rubbia, S.v.d. Meer Entdeckung der  $W^\pm, Z$  Bosonen
- 1995 CDF-Kollaboration Entdeckung des top Quarks



# Entdeckung der $\pi$ -Mesonen und Myonen

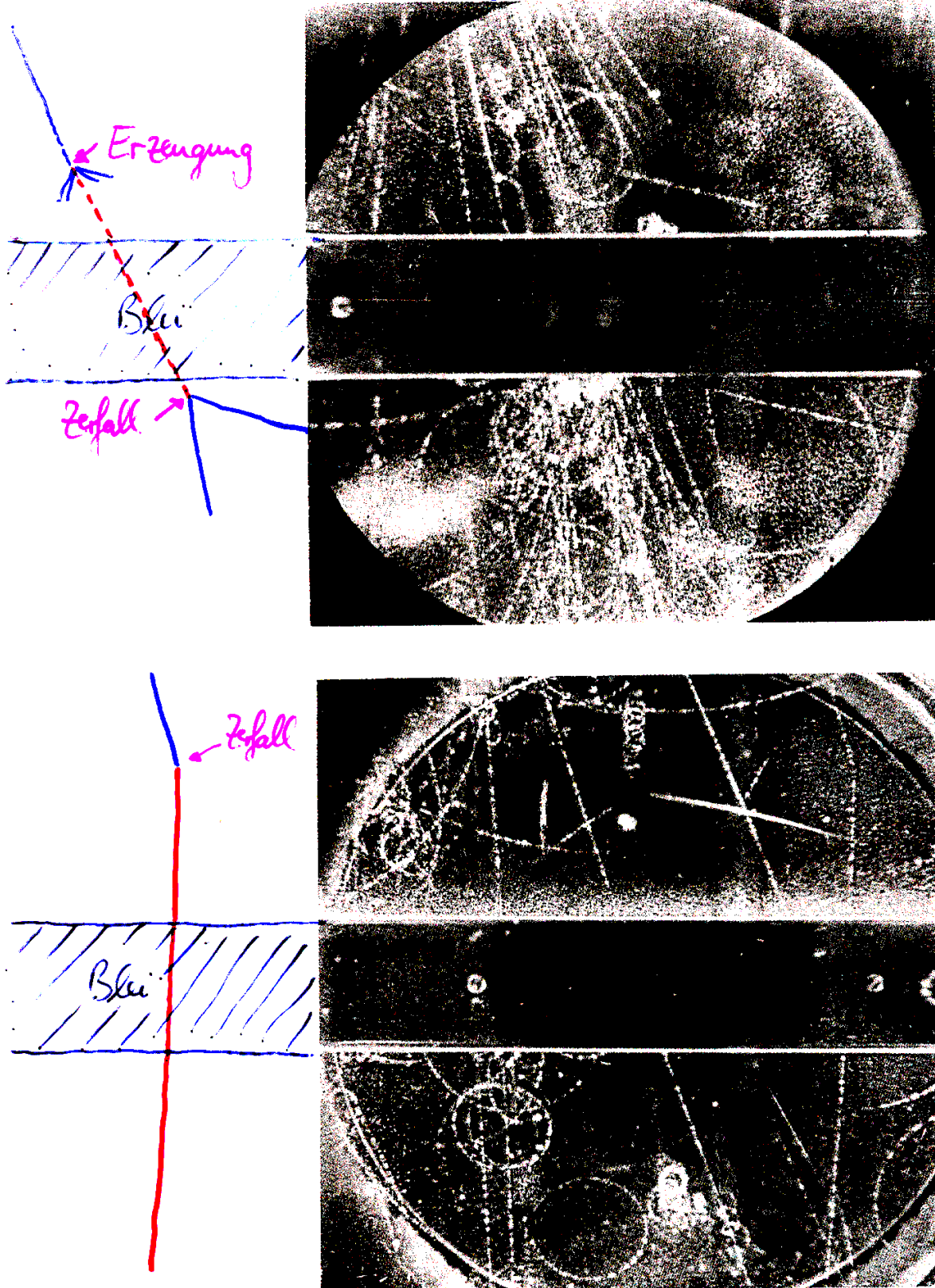


Fig. 1.3 Examples of the decay sequence  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$  in G5 emulsion exposed at Pic du Midi. The constancy of range ( $\approx 600 \mu\text{m}$ ) of the muon implies two-body decay at rest of the pion:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ . The first examples of pion decay were observed by Lattes, Muirhead, Occhialini, and Powell in 1947. The electron emitted in muon decay,  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ , was not served in the early experiments employing less sensitive emulsions. (Photograph courtesy University of Bristol).

$\pi^+$  gestoppt ; Zerfall in  $\mu^+$   
 $\mu^+$  gestoppt ; Zerfall in  $e^+$

$\approx$  gleiche Flugstrecke bis zum Zerfall

# Entdeckung seltsamer Teilchen



**Fig. 1.5** First observations of V-events in a cloud chamber, by Rochester and Butler (1947). The upper picture is of a "neutral V-event", consisting of a wide-angle fork occurring in the gas a few millimeters below the horizontal plate. Subsequent analysis suggests that it was due to the decay  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ . The lower picture is of a "charged V-event", seen as a fork near the right-hand top corner of the picture. The secondary traverses the 3-cm lead plate without interaction. The measured momenta are in fact consistent with the decay scheme  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ , or what is now called the  $K_{\mu 2}$  decay mode of the charged kaon. (Courtesy Pergamon Press.)

It is some measure of the surprise with which these new heavy baryons and mesons were greeted that they came to be known collectively as “strange” particles. In 1952 the first of the modern particle accelerators (the Brookhaven Cosmotron) began operating, and soon it was possible to produce strange particles in the laboratory (before this the only source had been cosmic rays) . . . and with this, the rate of proliferation increased. Willis Lamb began his Nobel Prize acceptance speech in 1955 with the words

When the Nobel Prizes were first awarded in 1901, physicists knew something of just two objects which are now called “elementary particles”: the electron and the proton. A deluge of other “elementary” particles appeared after 1930; neutron, neutrino,  $\mu$  meson,  $\pi$  meson, heavier mesons, and various hyperons. I have heard it said that “the finder of a new elementary particle used to be rewarded by a Nobel Prize, but such a discovery now ought to be punished by a \$10,000 fine”. [Source: Les Prix Nobel 1955, The Nobel Foundation, Stockholm.]

# Das Standard-Modell der Elementarteilchen und ihrer Kräfte

Konzept: "Kraft"-Teilchen vermitteln die Wechselwirkung zwischen "Materie"-Teilchen

Konstituenten:

- "Materie"-Teilchen: Leptonen und Quarks
- "Kraft"-Teilchen: Photonen, Weakonen, Gluonen (elektromagn., schwach, starke Ww.)

Standard-Modell: beschreibt elektromagnetische, schwache und starke Wechselwirkung zwischen den Konstituenten des Modells

( "Weltformel" ? )

# "Weltformel" des Standard-Modells

## Lagrangedichte des Standard-Modells der Teilchenphysik: $\mathcal{L}$

(Lösung beschreibt Teilchen und ihre Wechselwirkung)

$$\mathcal{L} = \mathcal{L} = -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}^i W_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} \quad (1.2) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische Energie und Selbstwechsel-} \\ \text{wirkung von } W^+, W^-, Z, \gamma \text{ und Gluo-} \\ \text{nen.} \end{array} \right.$$

$$+ \sum_l \left( \bar{L}_l \gamma^\mu \left( i\partial_\mu - g\frac{\tau_i}{2}W_\mu^i - g'\frac{Y}{2}B_\mu \right) L_l + \bar{R}_l \gamma^\mu \left( i\partial_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu \right) R_l \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische Energie der Leptonen und} \\ \text{ihre Wechselwirkung mit } W^+, W^-, Z, \\ \gamma. \end{array} \right.$$

$$+ \sum_q \left( \bar{L}_q \gamma^\mu \left( i\partial_\mu - g\frac{\tau_i}{2}W_\mu^i - g'\frac{Y}{2}B_\mu - g''\frac{\lambda_a}{2}G_\mu^a \right) L_q + \bar{R}_q \gamma^\mu \left( i\partial_\mu - g'\frac{Y}{2}B_\mu - g''\frac{\lambda_a}{2}G_\mu^a \right) R_q \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{kinetische Energie der Quarks und} \\ \text{ihre Wechselwirkung mit } W^+, W^-, Z, \\ \gamma \text{ und Gluonen.} \end{array} \right.$$

$$+ \left| \left( i\partial_\mu - g\frac{\tau_i}{2}W_\mu^i - g'\frac{Y}{2}B_\mu \right) \Phi \right|^2 - \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Massen von } W^+, W^-, Z, \gamma \text{ und des} \\ \text{Higgs selbst bzw. ihre Kopplungen an} \\ \text{das Higgs.} \end{array} \right.$$

$$- \sum_l \left( G_l \bar{L}_l \Phi R_l + \text{hermitisch konjugierte Form} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Massen der Leptonen bzw. ihre} \\ \text{Kopplungen an das Higgs.} \end{array} \right.$$

$$- \sum_{q_1, q_2} \left( G_{q_1} \bar{L}_{q_1} \Phi R_{q_1} - iG_{q_2} \bar{L}_{q_2} \tau_2 \Phi^* R_{q_2} + \text{hermitisch konjugierte Form} \right) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Massen der Quarks bzw. ihre Kopp-} \\ \text{lungen an das Higgs.} \end{array} \right.$$

$$W_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i - g\epsilon_{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - g'' f_{abc} G_\mu^b G_\nu^c$$

$W_\mu^i, B_\mu =$  Felder von  $W^+, W^-, Z, \gamma$  ( $i = 1,2,3$ )

$G_\mu^a =$  Felder der Gluonen ( $a = 1, \dots, 8$ )

$L_l =$  Felder der linkshändigen Dubletts der Leptonen ( $l = 1,2,3$ )

$R_l =$  Felder der rechtshändigen Singulets der Leptonen ( $l = 1,2,3$ )

$L_q =$  Felder der linkshändigen Dubletts der Quarks ( $q, q_1, q_2 = 1,2,3$ )

$R_q =$  Felder der rechtshändigen Singulets der Quarks ( $q = 1, \dots, 6$ ), ( $q_1 = 1,3,5$ ), ( $q_2 = 2,4,6$ )

$\Phi =$  Feld des Higgs-Teilchens

$g, g', g'' =$  Kopplungen der Kräfte

$G_l, G_{q_1}, G_{q_2} =$  Kopplungen der Higgs-Fermion-Kopplung  $\propto$  der Fermionmassen

$\tau_i = 3$  Pauli Matrizen (Erzeugende der  $SU(2)_L$ )

$\lambda_a = 8$  Gell-Mann Matrizen (Erzeugende der  $SU(3)_c$ )

$Y =$  schwache Hyperladung (Erzeugende der  $U(1)_Y$ )

$\mu, \lambda > 0 =$  Parameter des Higgs-Potential

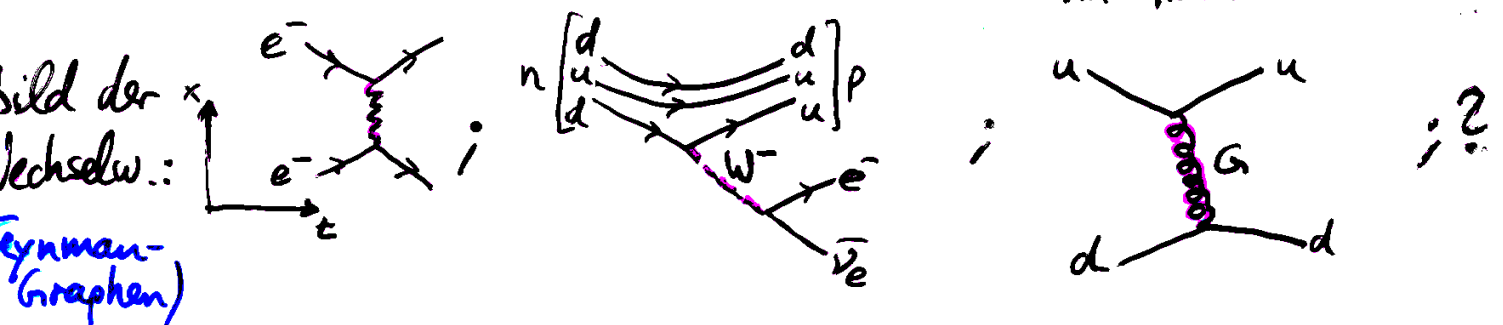
$$|\cdot|^2 \equiv (\cdot)^\dagger (\cdot)$$

In der Gleichung werden Teilchen durch Felder und die Wechselwirkungen durch „Produkte“ der Teilchenfelder  $L_f, R_f, L_q, R_q, W^i, B, G^a, \Phi$  mit den Feldern der Austauscheteilchen  $W^i, B, G^a$  ausgedrückt. Die Stärke der Kraft wird durch die Kopplungen  $g, g', g''$  und  $G_l, G_{q_1}, G_{q_2}$  bestimmt und ist abhängig von der Energie der Austauscheteilchen. Die Massenterme entstehen in diesem Modell durch die Wechselwirkung des Higgs-Feldes  $\Phi$  mit den anderen Teilchenfeldern. Kinetische Energien werden durch die zeitliche und örtliche Änderung der Teilchenfelder erzeugt, welches Termen mit  $\partial_\mu$  entspricht.

# Wechselwirkungen

	el. magn.	schwach	starke	gravitativ
rel. Stärke	$1/137$	$10^{-5}$	$1$	$10^{-40}$
ergeben durch	$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$	$G_{Fermi} = 1.166 \cdot 10^{-5} \frac{(\hbar c)^3}{GeV^2}$	$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi \hbar c}$	$\frac{G_N \cdot m_{Proton}^2}{4\pi \hbar c}$
Träger der Kraft:	Photon	Weakonen	Gluon	Graviton?
el. Ladung:	$0e$	$W^+, W^-, Z^0$	$G$	$0e$
starke ":	$0$	$+e, -e, 0e$	$0e$	$0e$
schwache ":	$0$	$0$	$2 \times$ starke Ladung	$0$
Massenklasse:	$0$	ja	$0$	$0$
Reichweite:	$\infty$	$80 GeV/c^2$ $91 GeV/c^2$	$0$	$0$
$R = \frac{\hbar c}{\Delta E}$	$\infty$	$\sim 10^{-18} m$	$10^{-15} m$	$\infty$

(da selbst Träger der starken Ladung)  
 $\rightarrow$  sog. Confinement der Quarks & Gluonen im Hadron



Spin der "Kraft"-Teilchen ist ganzzahlig (=1h bis auf Graviton)  
 $\rightarrow$  unterliegen Einstein-Bose-Statistik (Wellenfkt gerade)  $\rightarrow$  Bosonen

# Quarks und Leptonen

Standard-Modell besitzt Familienstruktur mit drei Generationen:

1. Generation

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ e^- \\ u \\ d \end{bmatrix}$$

2.

$$\begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \\ c \\ s \end{bmatrix}$$

3.

$$\begin{bmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \\ t \\ b \end{bmatrix}$$

el. Ladung [e]      schwache Ladung      starke Ladung

0      ja      0

-1      ja      0

$+\frac{2}{3}$       ja       $1^*$

$-\frac{1}{3}$       ja       $1^*$

(wenn  $\neq 0$  oder "ja", dann Teilnahme an zugehöriger W.)

\* Situation kompliziert für starke Ladung als für electr.: (folgt später)

Leptonen

Quarks

• Spin der "Materie"-Teilchen ist  $\frac{1}{2} \hbar$

→ Teilchen unterliegen Fermi-Dirac-Statistik,

d.h. Wellenfkt ist ungerade (→ Pauli Ausschlußprinzip)

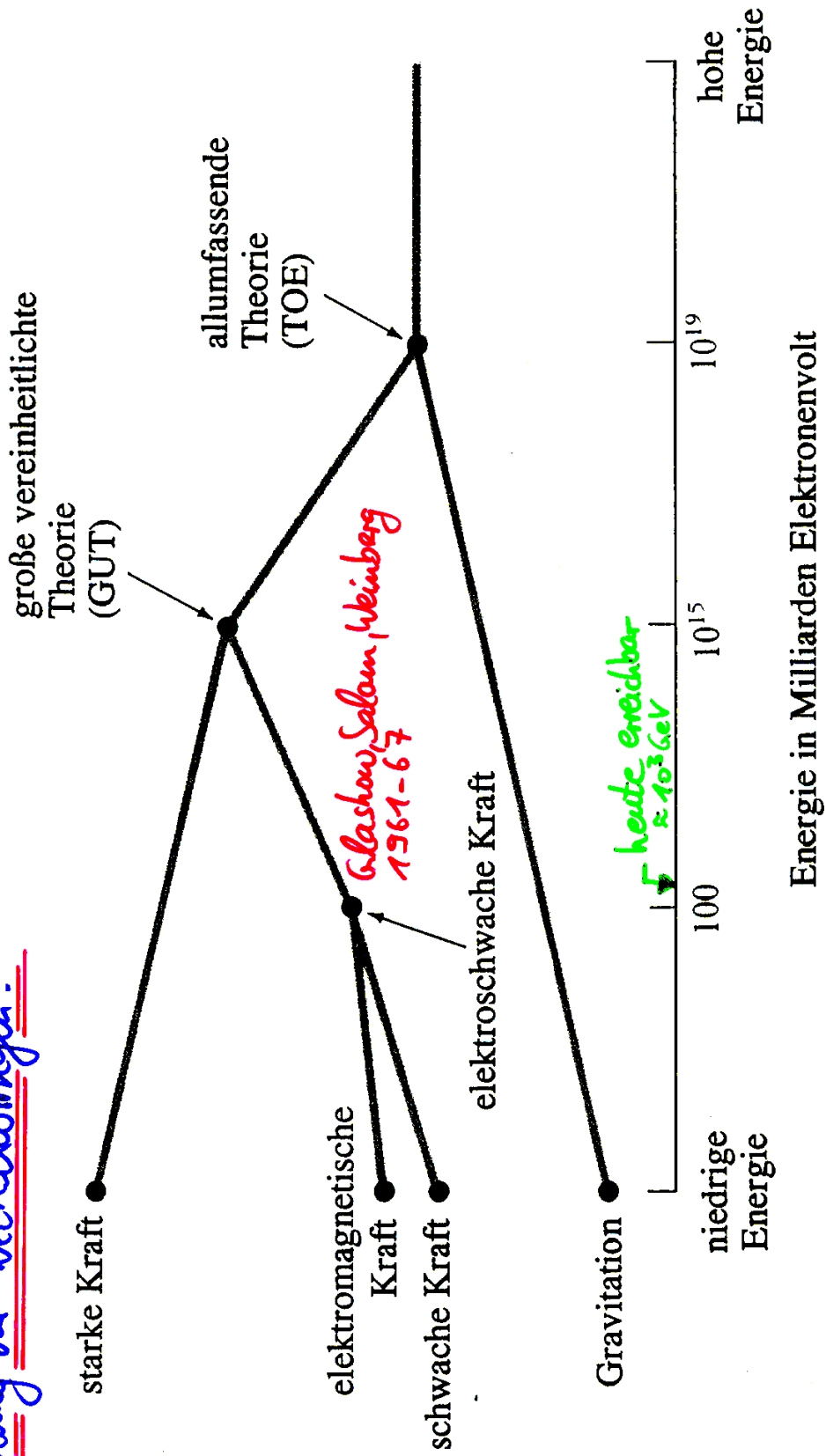
→ Bezeichnung: Fermion

• Aus Quarks werden "Hadronen" aufgebaut: Mesonen  $q\bar{q}$  ( $\pi \cong u\bar{d}$ ), Baryonen  $qqq$  ( $p = uud$ )

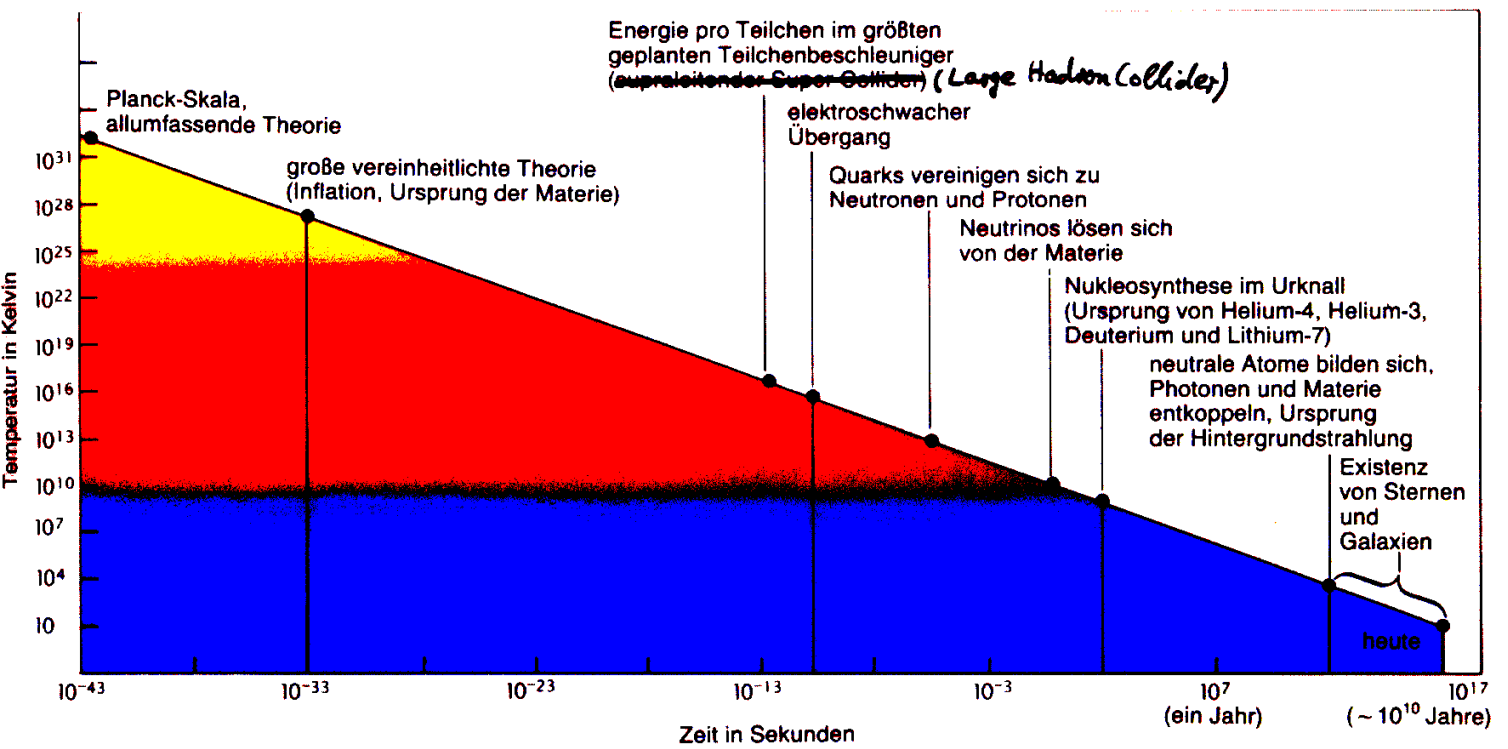




# Vereinheitlichung der Wechselwirkungen.



**6.2** Die Vereinheitlichung der vier Grundkräfte setzt enorme Energien voraus. Man nimmt an, daß die vier Kräfte unter den hochenergetischen Bedingungen unmittelbar nach dem Urknall vereinheitlicht waren. Experimentell bestätigt hat sich die elektroschwache Theorie, die die schwache und die elektromagnetische Kraft bei Energien von einigen hundert GeV zusammenfaßt.



↑  
≈ 10<sup>19</sup> GeV

↑  
≈ 10<sup>15</sup> GeV

↑  
~ 100 GeV

# 8 Schritte in der Entwicklung des Universums

(1)  $t < 10^{-43} \text{ s}$  ,  $T > 10^{32} \text{ K}$  ,  $E > 10^{19} \text{ GeV}$

Quantenkosmos zur Planck-Zeit

Details unbekannt !

Dynamik der Materie nicht mehr hydrodynamisch oder quantenmechanisch beschreibbar, da Geometrie und Topologie der Raum-Zeit kurzfristig und kleinräumig fluktuieren. Unklar ist auch, ob Begriffe wie Zeit und Raum überhaupt anwendbar sind.

Gesucht: Quantentheorie der Gravitation, eine "Geometrodynamik" GMD

Ansätze: viele, aber noch keine widerspruchsfrei Beschreibung

(2)  $t = 10^{-43} \dots 10^{-33} \text{ s}$  ,  $T > 10^{28} \text{ K}$  ,  $E > 10^{15} \text{ GeV}$

"Ursuppe" von Quarks, Elektronen, Neutrinos,  
Photonen, Gluonen, hypoth. X-  
Teilchen  
und

inflationäre Expansion des Universums

( Ausdehnung der Raum-Zeit um Faktor  $10^{90}$   
zwischen  $t = 10^{-35} \text{ s}$  und  $10^{-33} \text{ s}$  )

(damit werden gewisse Probleme von GUT ver-  
mieden ( magnet. Monopole mit enormen Massen)

mögliche Erklärung für Expansion: "falsches"  
Vakuum für (Higgs)-Hintergrundfeld geht in  
"richtiges" Vakuum (niedrigster Energiezustand) über)

∴ bei  $t = 10^{-33} \text{ s}$ :

X-Teilchen zerfallen und erzeugen Asymmetrie  
zwischen Quarks und Anti-Quarks

⇒ Materie - Anti-Materie Asymmetrie  
des heutigen Universums

Größenordnung der Asymmetrie:  $10^{-8} \dots 10^{-10}$

(3)  $t = 10^{-33} \dots 10^{-6} \text{ s}$  ,  $T > 10^{13} \text{ K}$  ,  $E > 1 \text{ GeV}$

## Plasmaära

Quarks - Gluonen - Leptonen - Photonen formen ein Plasma, das sich rapide abkühlt  
Aufgrund der hohen Teilchendichte und der hohen Kollisionsrate stehen alle Teilchen im thermischen Gleichgewicht

(4)  $t = 10^{-6} \dots 10^{-3} \text{ s}$  ,  $T > 10^{11} \text{ K}$  ,  $E > 30 \text{ MeV}$

## Beginn der Protonenära

- Phasenübergang : Quarks  $\rightarrow$  Hadronen  
z.B.  $u+u+d \rightarrow$  Proton  $p$
- aber auch : Aussterben der Quarks durch  
 $q + \bar{q} \rightarrow \gamma + \gamma$   
Asymmetrie aus  $X$ -Teilchenzerfall stellt sicher, daß einige Quarks überleben!

- Zustand des Universums zum Ende dieser Phase :

Gas aus  $\begin{cases} e^-, e^+, \nu, \gamma & \text{ca. } 10^{36} / \text{cm}^3 \\ \text{Protonen, Neutronen} & \text{ca. } 10^{27} / \text{cm}^3 \end{cases}$

mit mittlerem Abstand von  $\approx 10^{-9} \text{ cm}$

(5)  $t = 10^{-3} \dots 10^{+2} \text{ s}$ ,  $T > 10^9 \text{ K}$ ,  $E > 0.1 \text{ GeV}$

## Strahlendes Universum

- $\nu$  entkoppeln  $\Rightarrow$  Proton/Neutron-Verhältnis  
(bisher  $p + e^- \rightleftharpoons n + \nu_e$ ) friert ein  $p:n \approx 75\%:25\%$   
weil  $\Delta m = m_n - m_p \neq 0$

und kühlen weiter ab (auf heute ca. 1.9 K)

- Elektronen & Positronen sterben aus  $e^+e^- \rightarrow \gamma + \gamma$   
weil Energie für Umkehrprozess zu gering wird  
(einige überleben um Gesamtladung Null des Universums sicherzustellen)

- Zustand zum Ende dieser Ära:

Plasma aus  $\nu + \gamma +$  einige  $p + e^- + n$

(6)  $t = 100 \text{ s} \dots 30 \text{ min}$ ,  $T < 9 \cdot 10^8 \text{ K}$ ,  $E < 0.1 \text{ GeV}$

## Elemente entstehen

- Neutron-Zerfall  $\Rightarrow$  Proton : Neutron = 87 : 13

- Deuterium-Fusion :  $p + n \rightleftharpoons d + \gamma$

- Helium-Fusion :  $d + d \rightleftharpoons {}^4\text{He} + \gamma$

$\Rightarrow$  Elementzusammensetzung zum Ende:

77% H + 23% He + Spuren von  ${}^7\text{Li}$  und D und  ${}^3\text{He}$

(7)  $t = 30 \text{ min} \dots 10^6 \text{ a}$

## Atombildung, Photonemanzipation

nach ca. 300000 Jahren ist die Temperatur so weit abgesunken, daß das Plasma aus Elektronen, Protonen und anderen Ionen rekombiniert. Dann werden die Photonen nicht mehr absorbiert und können sich fortan frei ausbreiten (heutige Temperatur dieser Photonen: 3K, sichtbar als Mikrowellenhintergrund-Strahlung)

(8)  $t = 10^6 \text{ a} \dots 20 \cdot 10^9 \text{ a}$  (heute)

## Galaxien- und Sternenära

- Zusammenballung der Materie zu Galaxien, Sternen, Planeten,
- Elemente bis Eisen werden in Sternen fusioniert
- schwerere Elemente entstehen in Supernova-Explosionen