

Elementarteilchen aus dem Urknall

T. Hebbeker

1.2

Thomas Hebbeker
RWTH Aachen
DPG 2003



VLT
NGC 1232

Übersicht



Astrophysik

Universum

Urknall

Elementarteilchenphysik

Teilchen und Kräfte

Neutrinos

Neutrinos aus dem Urknall

Aktuelle Neutrino-physik



Astrophysik

Universum

Urknall

Elementarteilchenphysik

Teilchen und Kräfte

Neutrinos

Neutrinos aus dem Urknall

Aktuelle Neutrino-physik

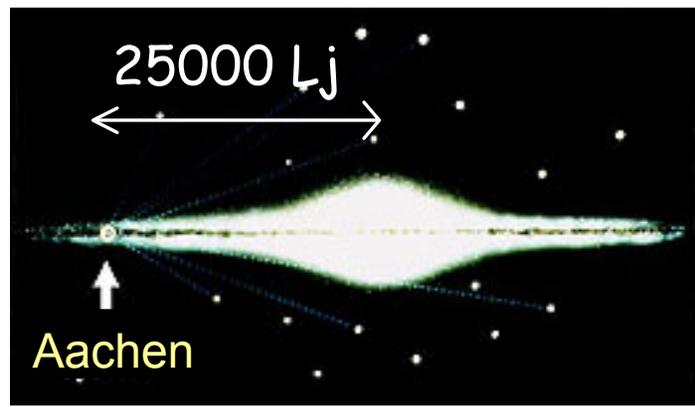
Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

Die Milchstraße



Nachbarstern
„Proxima Centauri“
4 Lichtjahre

1 Lichtjahr
=70000 mal
Abstand Erde-
Sonne



Das Sonnensystem in der
Milchstrasse

„Unsere“ Galaxie = Milchstrasse

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

Andere Galaxien



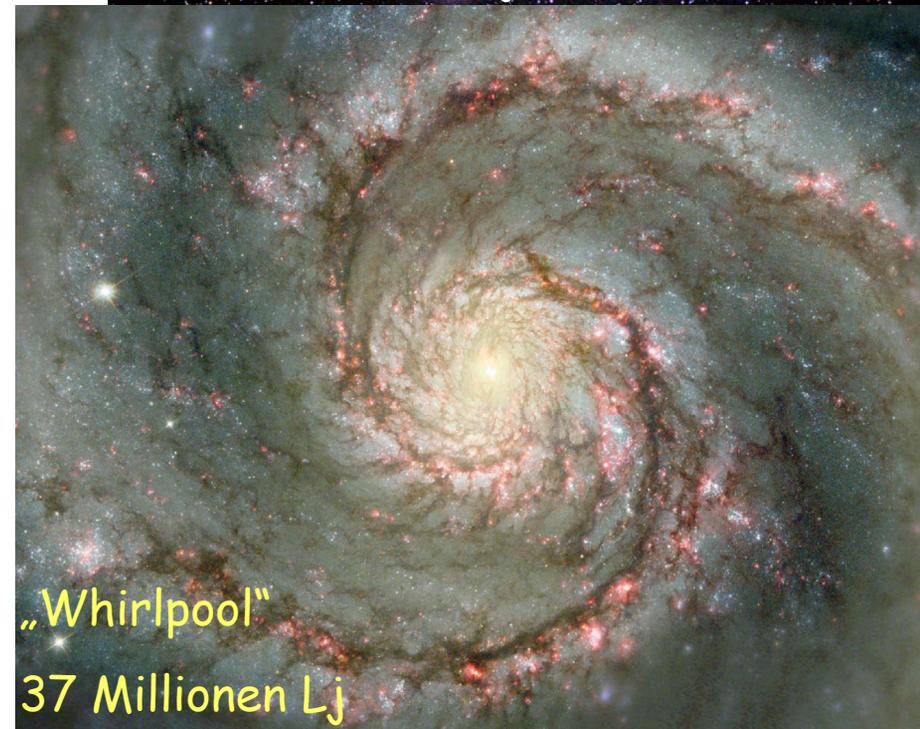
Palomar Observatory, E. Hubble (1949)



Nachbargalaxie

„Andromeda“

3 Millionen Lichtjahre

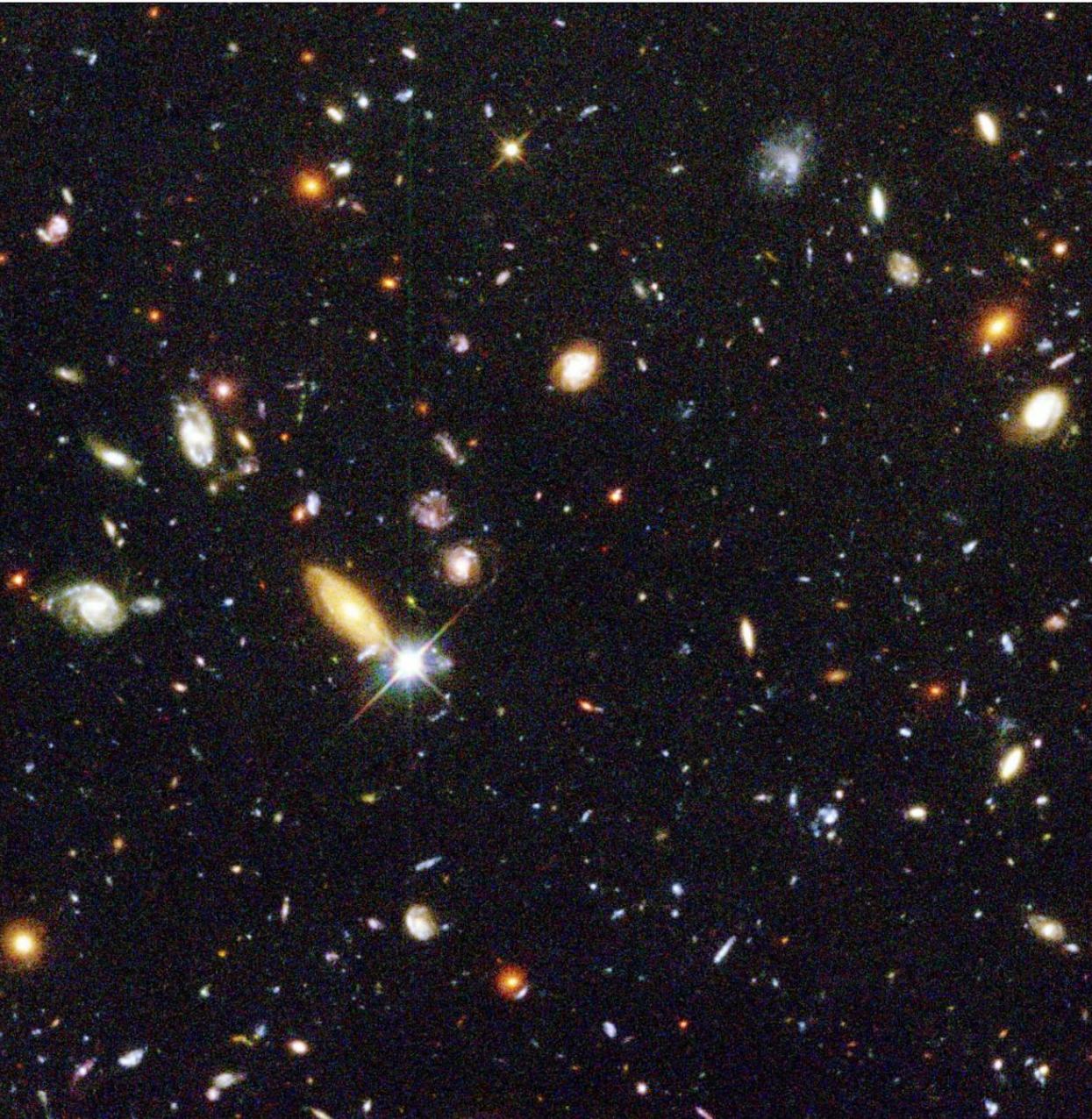


„Whirlpool“

37 Millionen Lj

Blick ins Universum: Sterne und Galaxien

T.Hebbeker



Entfernte Galaxien

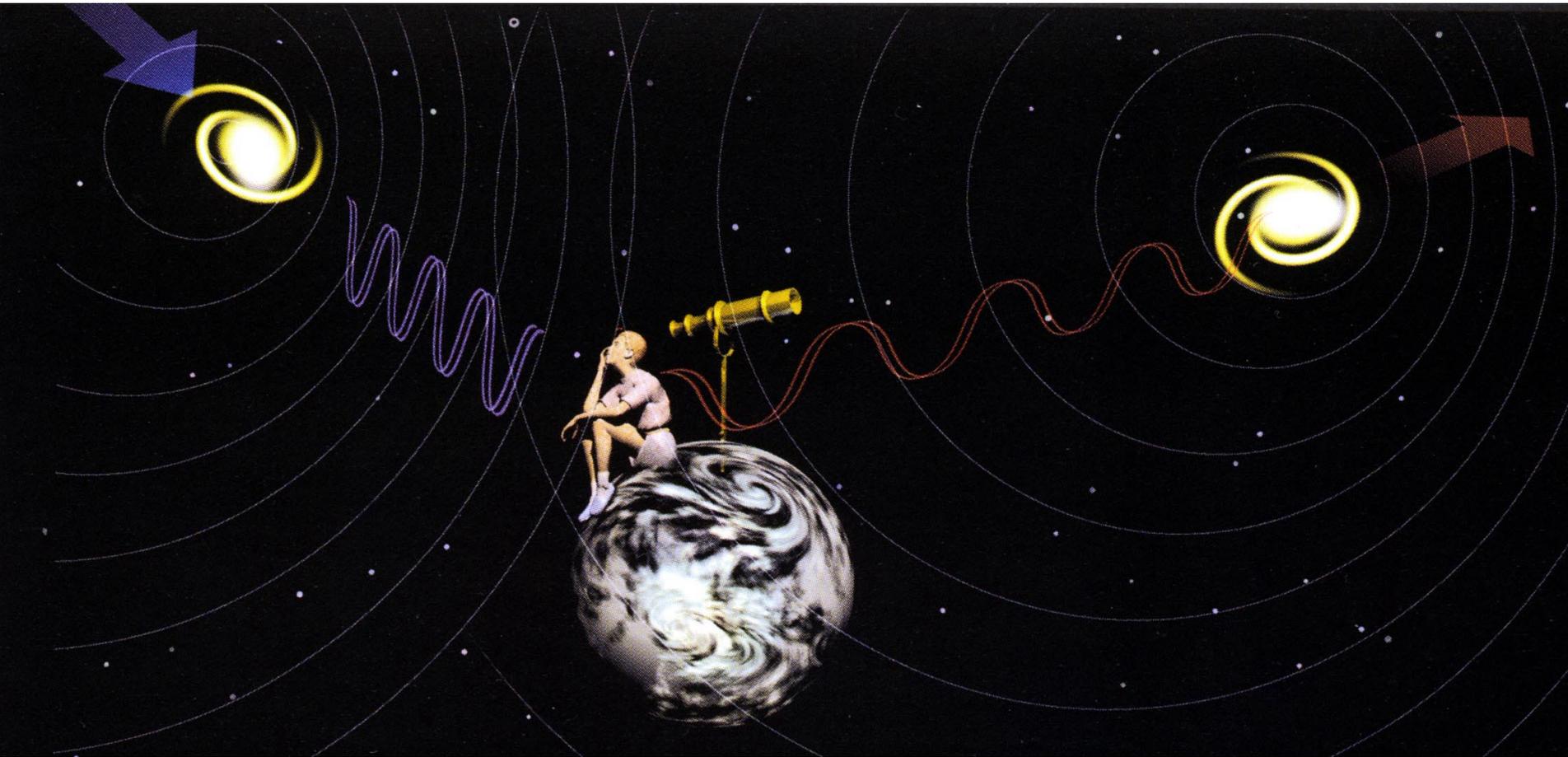


Hubble-Teleskop

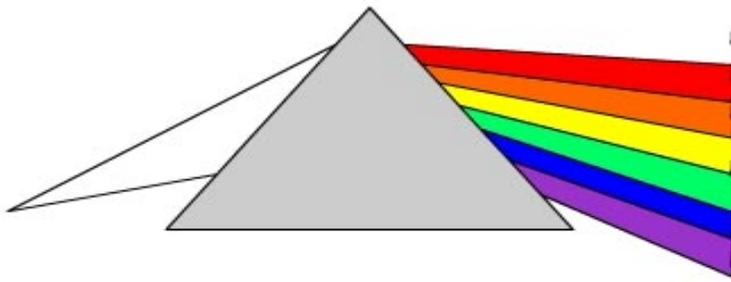
bis zu einigen
Milliarden Lichtjahren

Blick in die
Vergangenheit!

Doppler-Effekt (Licht)



Sonnenlicht:

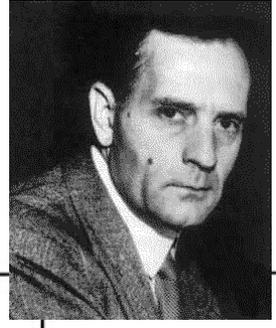


Atomare Spektrallinien:

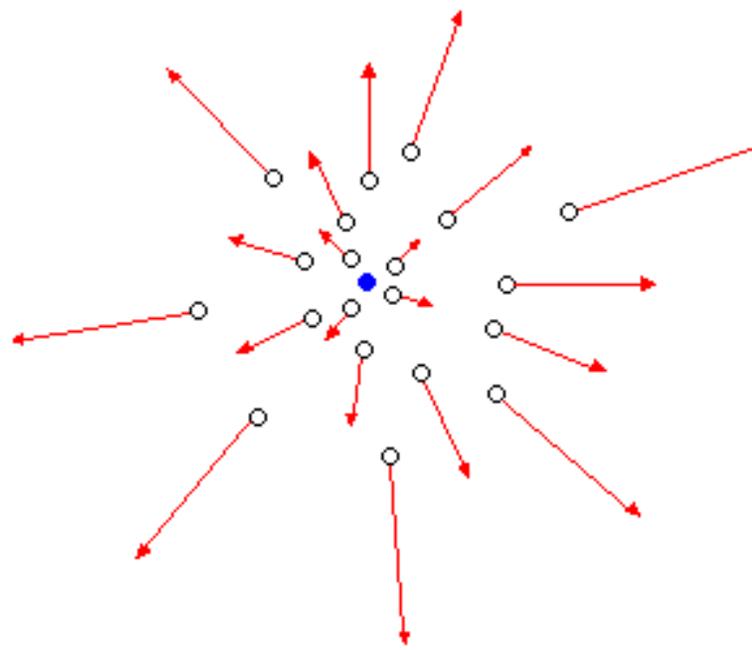
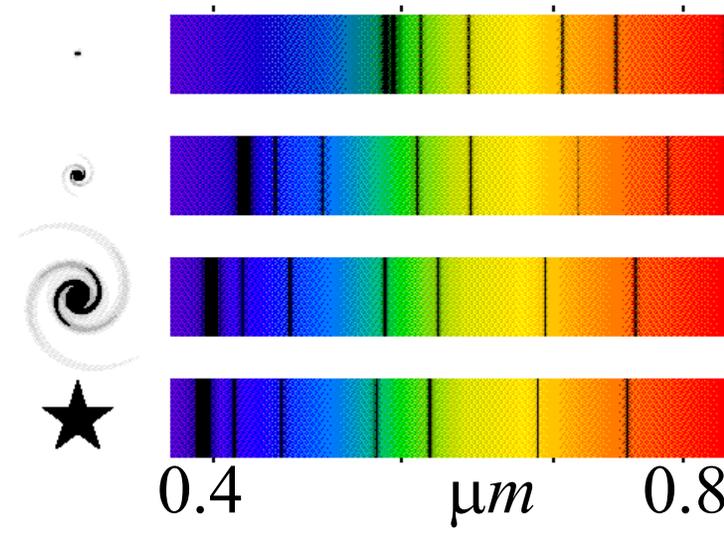
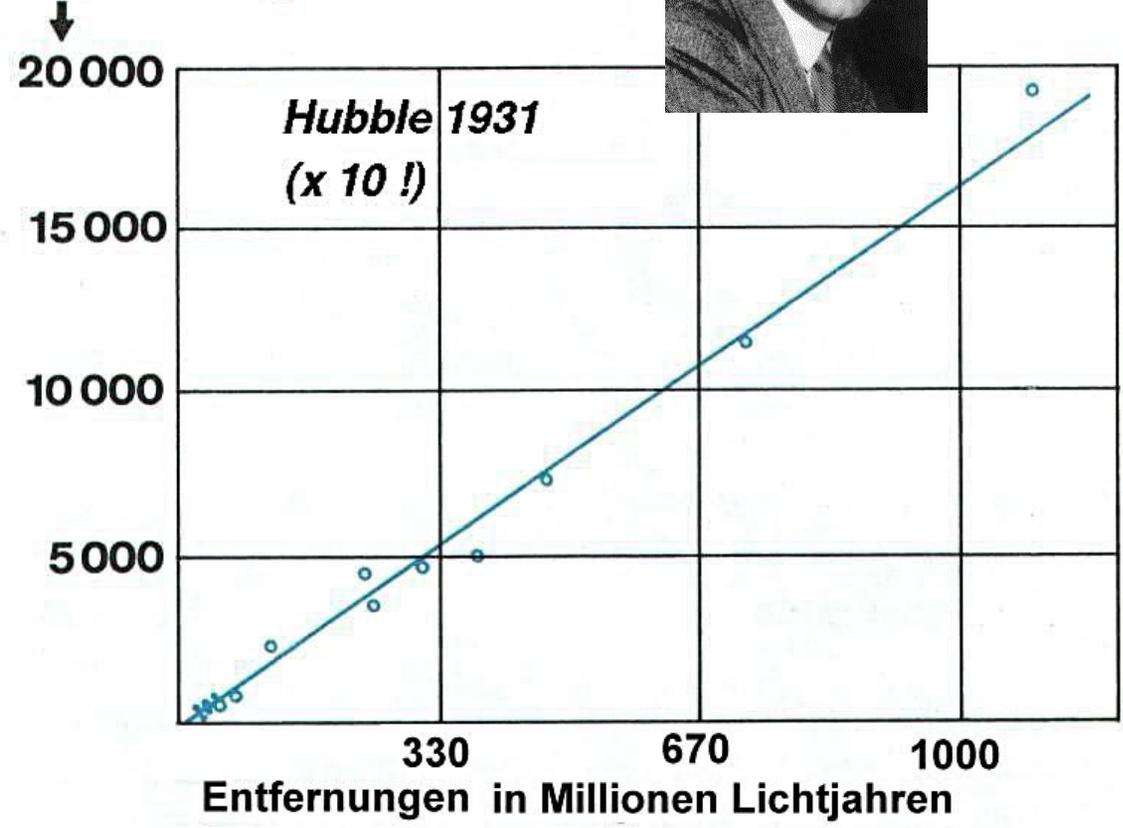


Rotverschiebung der Spektrallinien

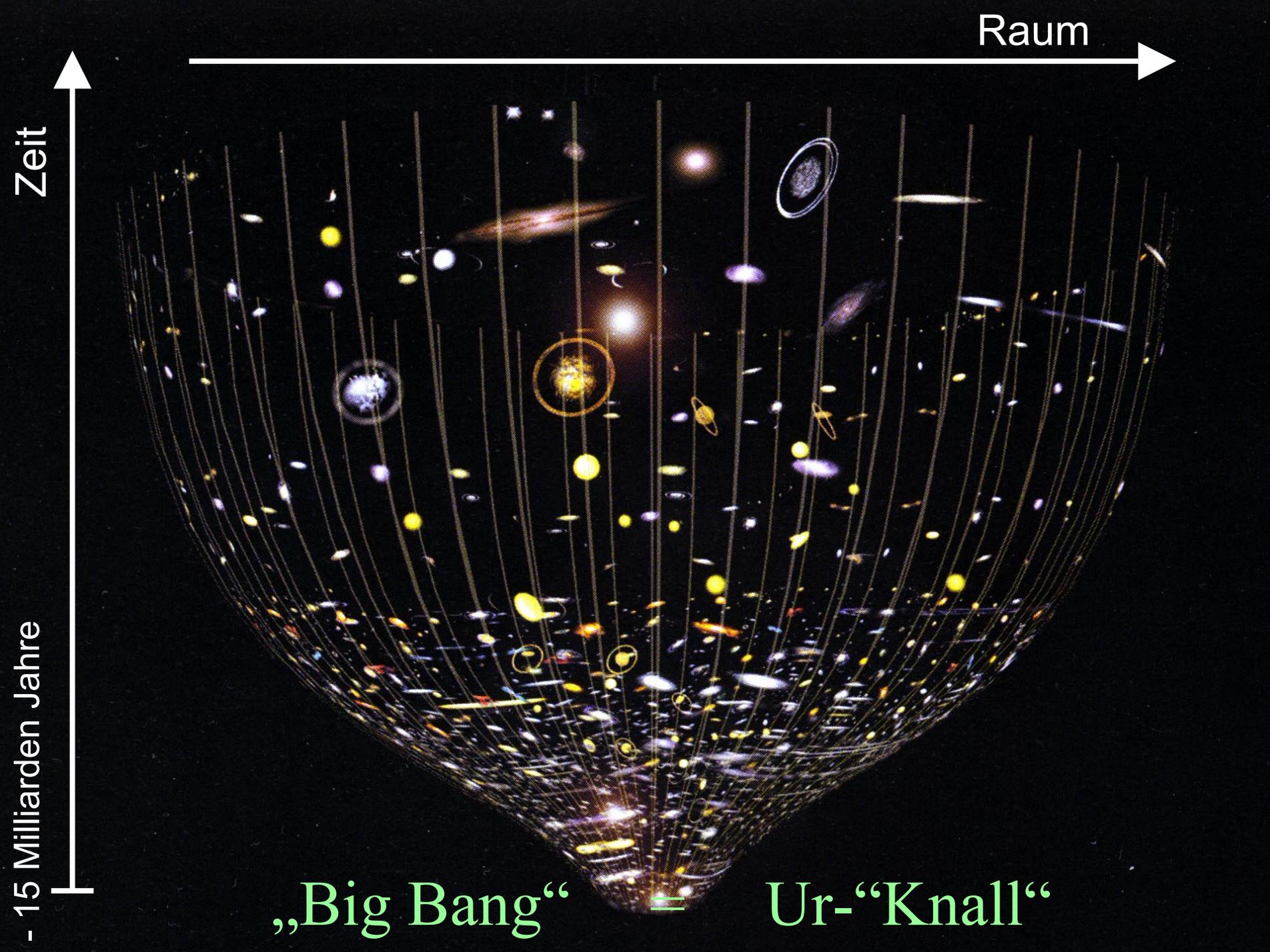
E. Hubble

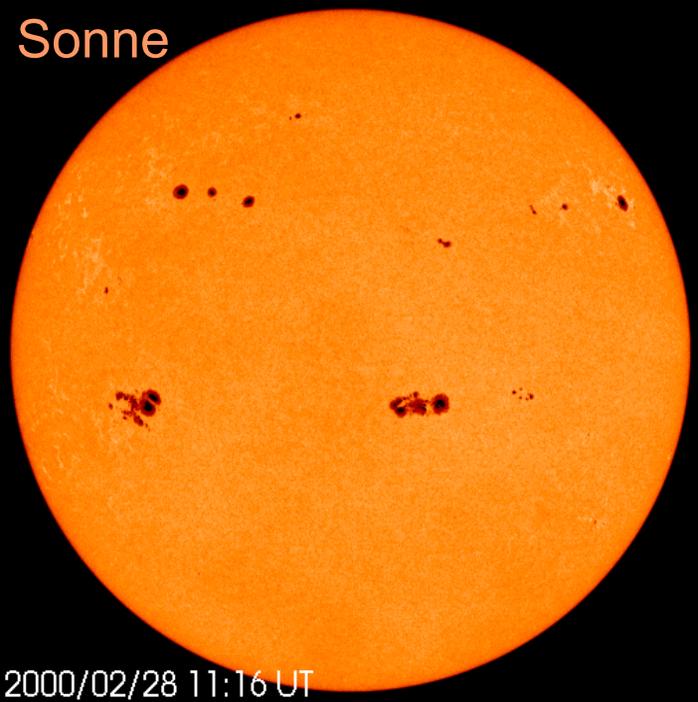


Geschwindigkeit in km/sec



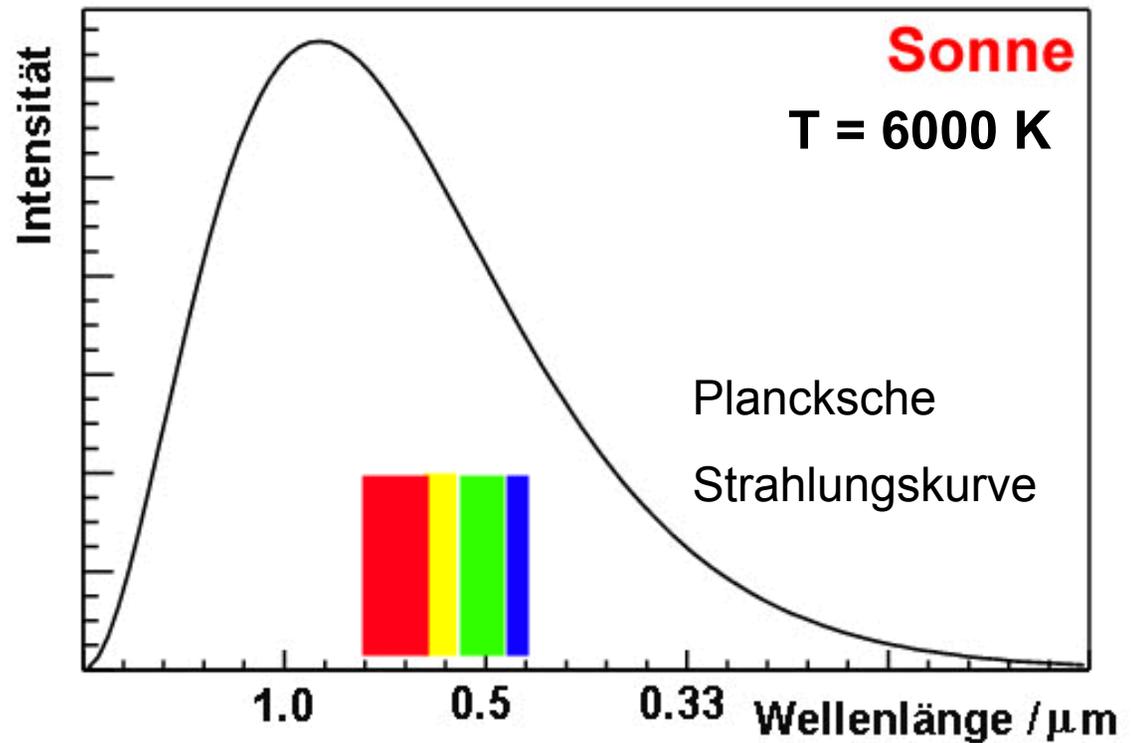
Universum expandiert !

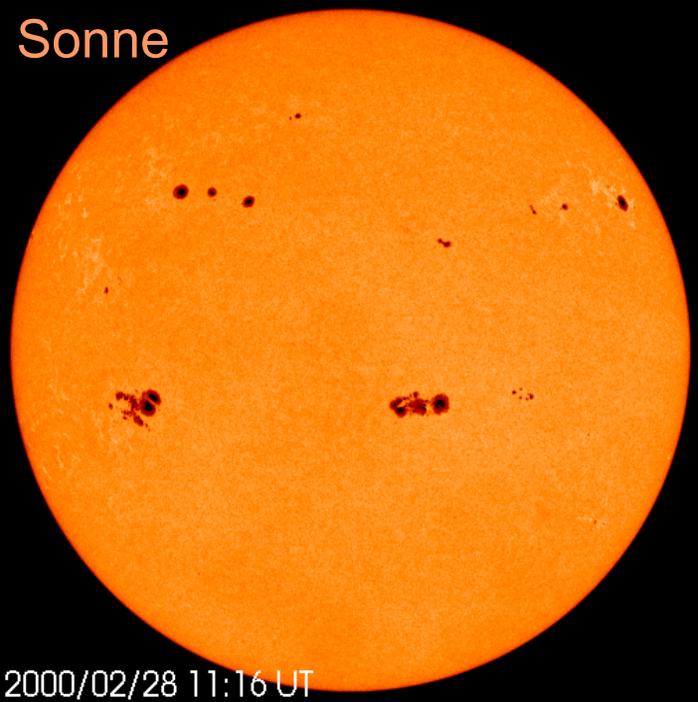




Licht von der Urexplosion

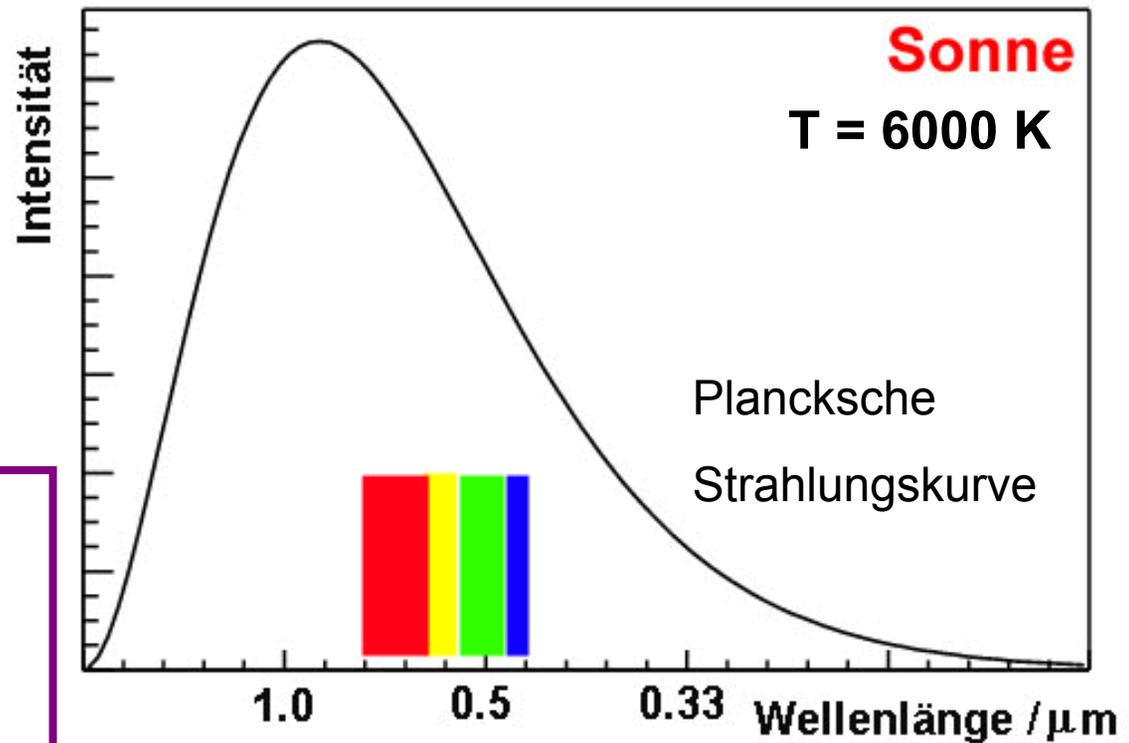
Urexplosion: heißes Gas / Plasma
(ähnlich Sonne)





Licht von der Urexplosion

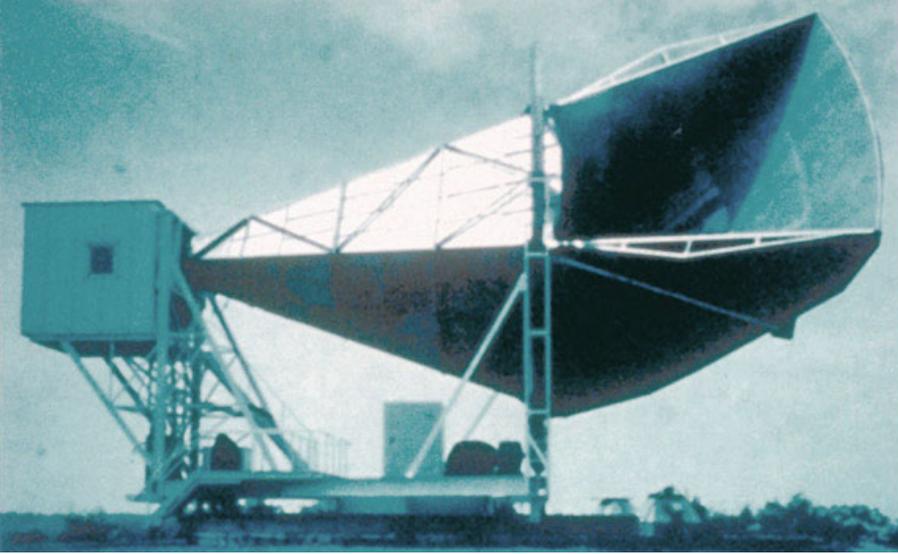
Urexplosion: heißes Gas / Plasma
(ähnlich Sonne)



Vorhersage von
R. Alpher u.a. 1948:

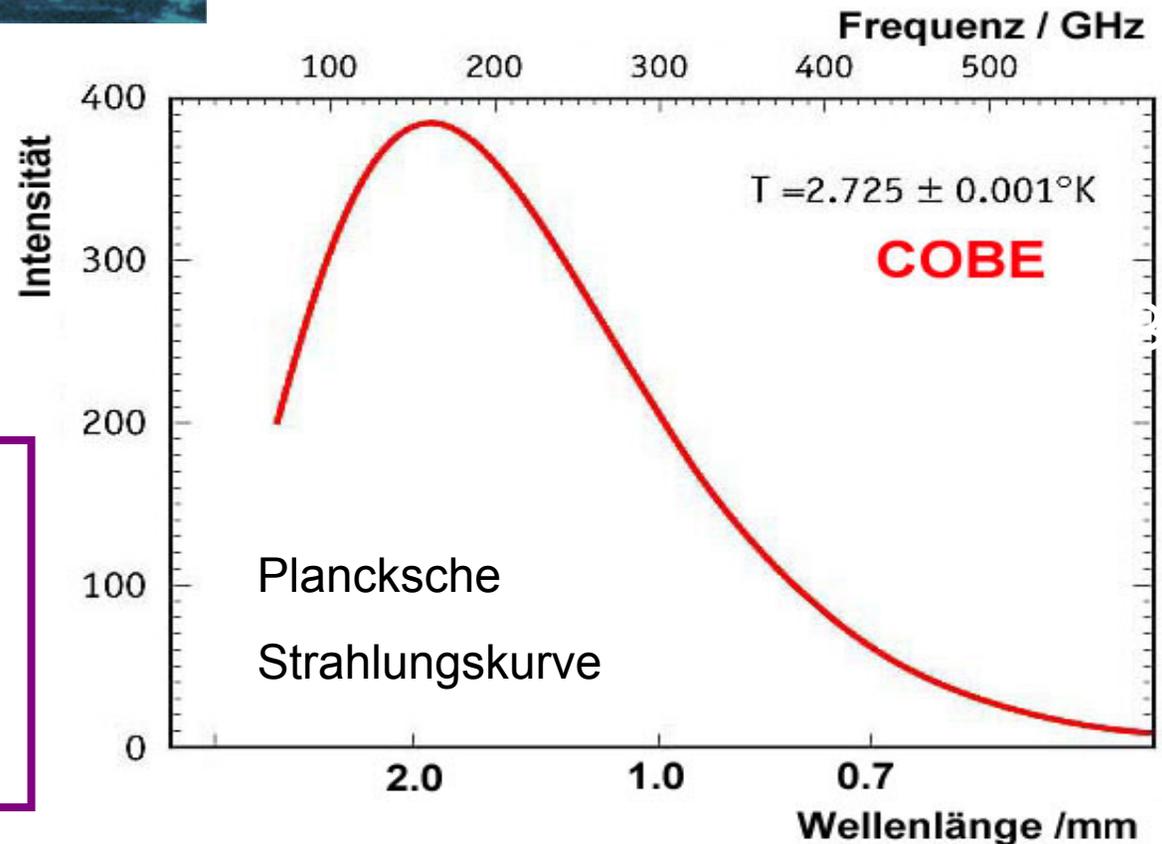
Ur-Licht heute noch
beobachtbar
Wellenlängen ~ 1000
mal größer
Spektrum gleiche Form

Die kosmische Hintergrundstrahlung

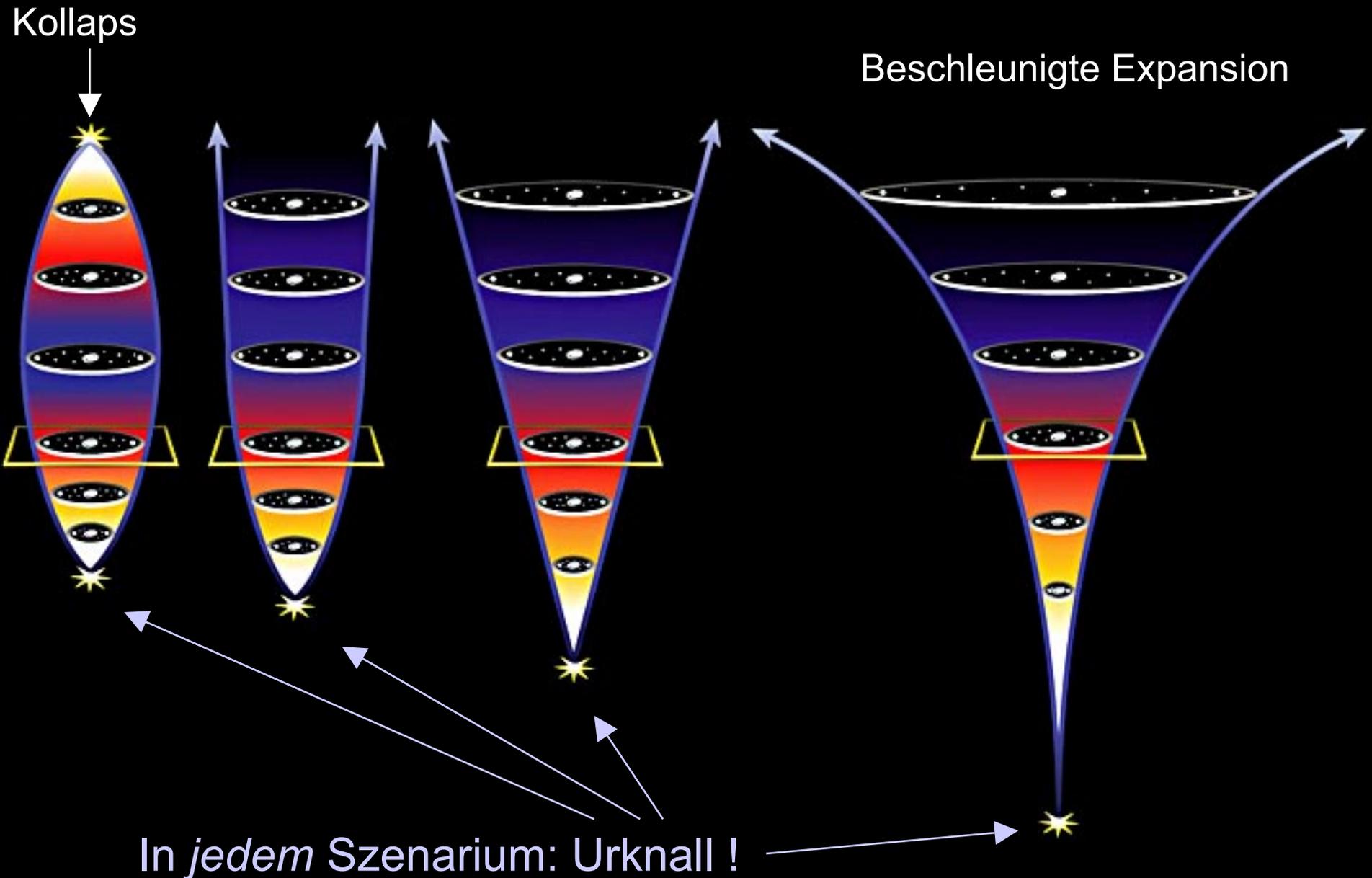


A. Penzias und
R. Wilson 1965:

Mikrowellenstrahlung
aus dem Kosmos
= Blitz der Urexplosion



Entwicklung des Universums ?



Zusammenfassung Astrophysik

- **Universum = viele Galaxien**

- **Galaxien fliegen auseinander**

- **Licht aus „Urexplosion“**



Astrophysik

Universum

Urknall



Elementarteilchenphysik

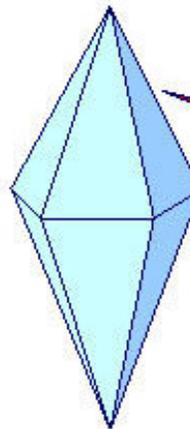
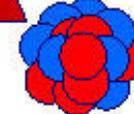
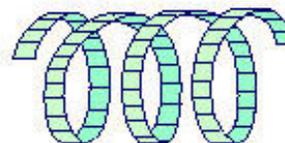
Teilchen und Kräfte

Neutrinos

Neutrinos aus dem Urknall

Aktuelle Neutrino-physik

Die Struktur der Materie

Kristall Molekuel	Atom	Atom-Kern	Elementar- teilchen	
			Hadronen	
			Mesonen 	Leptonen $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
		Kerne	Baryonen 	Quarks u, c, d, s, b, t
			Proton Neutron	
1 cm	10^{-8} cm	10^{-12} cm	10^{-13} cm = 1 fm	?

elektromagnetische Kraft
(= elm. Wechselwirkung)

Kernkraft = starke Wechselwirkung

Die 4 Grundbausteine des Sonnensystems

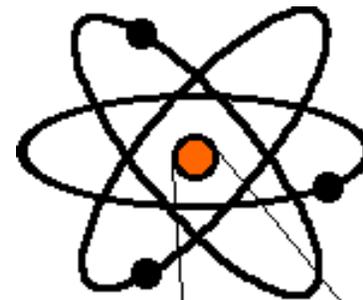
$$\left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} \text{Neutrino} \\ \text{Elektron} \end{array} \right\} \text{Leptonen}$$

$$\left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} \text{up-Quark} \\ \text{down-Quark} \end{array} \right\}$$

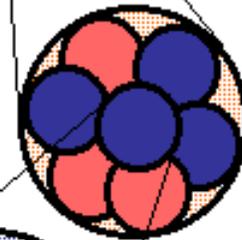
Kernbausteine = Nukleonen:

$$p = \text{Proton} = u + u + d \quad (\text{positiv})$$

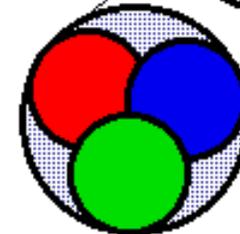
$$n = \text{Neutron} = u + d + d \quad (\text{neutral})$$



Atom aus
Elektronen
und Kern



Kern aus
Nukleonen



Nukleon aus
Quarks

Grundbausteine sind punktförmig : “Elementarteilchen“

(heutige Messgenauigkeit = 1/1000 Protonradius)

Materie - Antimaterie

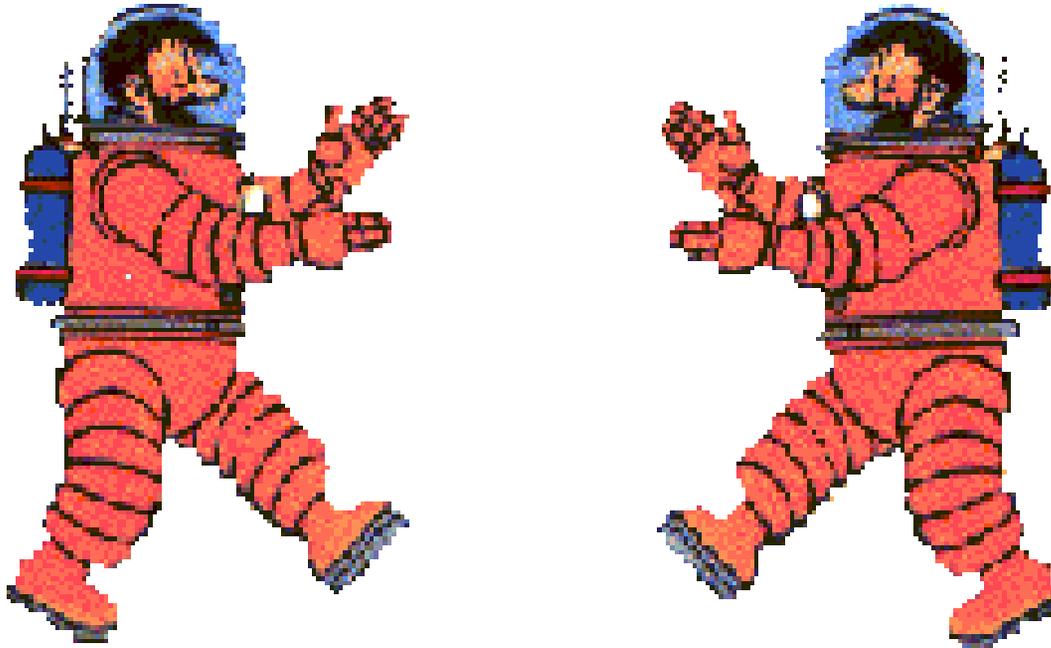
Zu jedem Lepton und Quark existiert ein **Antiteilchen**

Beispiele:

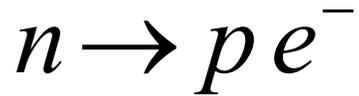
e^{-} e^{+}
Elektron Positron

ν_e $\bar{\nu}_e$
Neutrino Antineutrino

Gibt es Galaxien, Planeten,... aus Antimaterie ?



Der Beta-Zerfall



„schwache Kraft“ = „schwache Wechselwirkung“

! Einzige Kraft, die Teilchen verwandeln kann !

Problem: Energiebilanz!

- Freiwerdende Energie folgt aus Einsteins Formel $E = m \cdot c^2$
- Kinetische Energien von p und e werden gemessen:

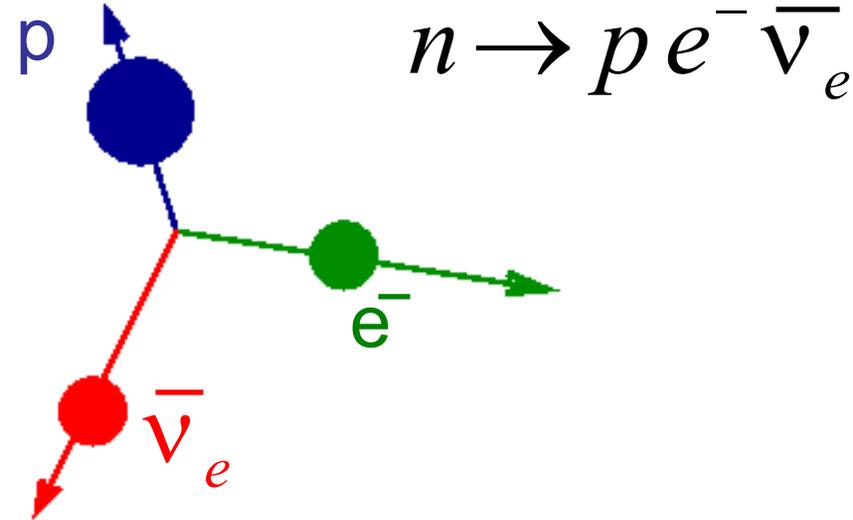
etwa die Hälfte der kinetischen Energie fehlt !

Das Neutrino ?

W. Pauli:



Brief aus Zürich an die Gruppe der
'Radioaktiven' bei der Gauvereins-
Tagung zu Tübingen, vom 4.12.1930



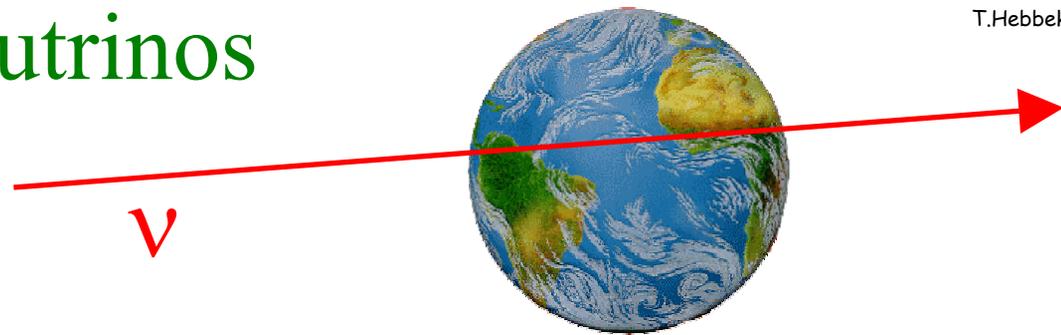
Liebe Radioaktive Damen und Herren!

... es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutrinos nennen will, in den Kernen existieren ...

... dass mit dem Elektron jeweils noch ein Neutrino emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutrino und Elektron konstant ist.

... Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dezember in Zürich stattfindenden Balles hier unabhkömmlich bin. ...

Neutrinos

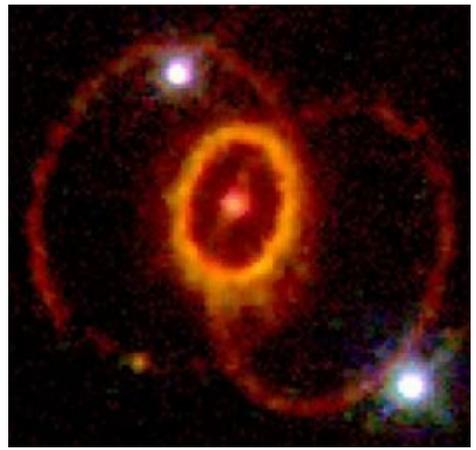


Eigenschaften:

- sehr geringe Wechselwirkung: Reichweite > 1 Lichtjahr
- sehr kleine Masse, vielleicht null (< 1/100000 Elektronmasse)

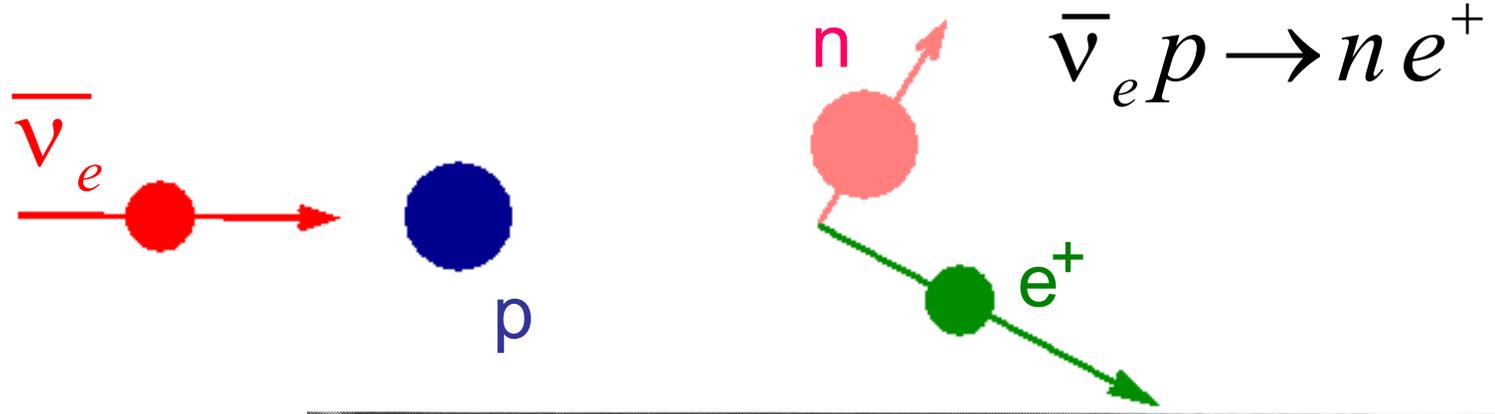
Quellen:

- natürliche Radioaktivität
- Sonne
- Supernovae
- Kernreaktoren



„Durch unsere Körper strömen in jeder Sekunde viele Milliarden Neutrinos, und wir machen uns Gedanken über die Benzinpreise?“

Neutrino-Nachweis

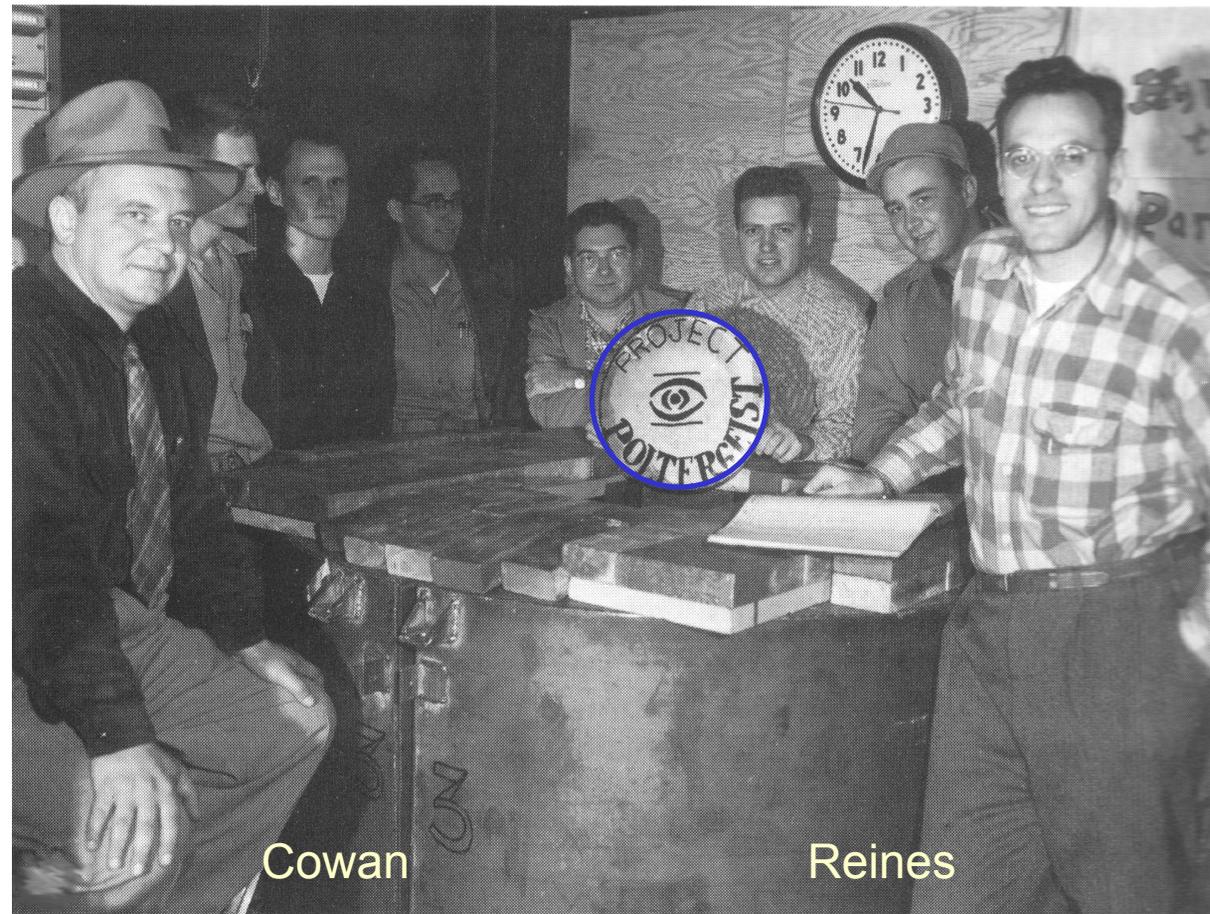


Kernreaktor

1956

C. Cowan, F. Reines

„Project Poltergeist“



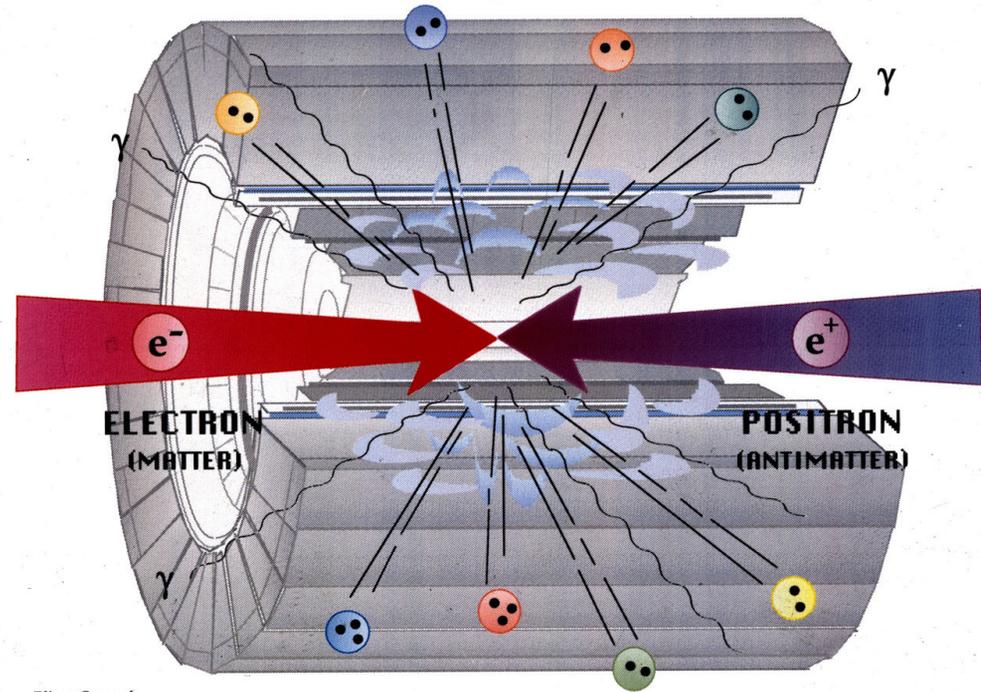
Cowan

Reines

Methoden der experimentellen Teilchenphysik

Werkzeuge:

- Teilchenbeschleuniger
- Teilchendetektoren



Eliane Onursal

Ziele:

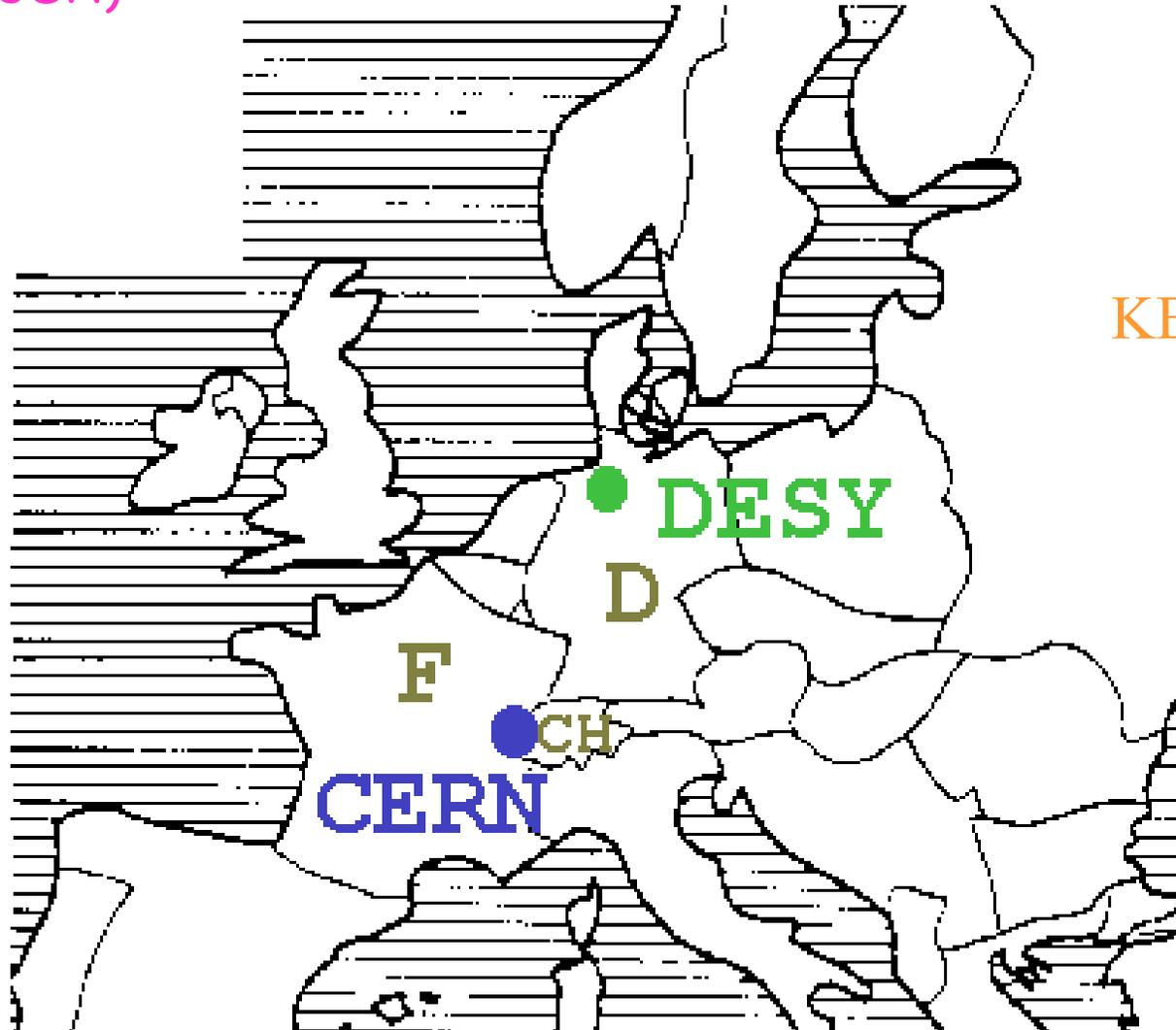
- Neue Teilchen (große Masse) $E = m \cdot c^2$
- Struktur der Teilchen (z.B. Proton)
- Kräfte bei hohen Energien **Big Bang**

**HOHE
ENERGIE !**

Forschungszentren

FERMILAB (USA)

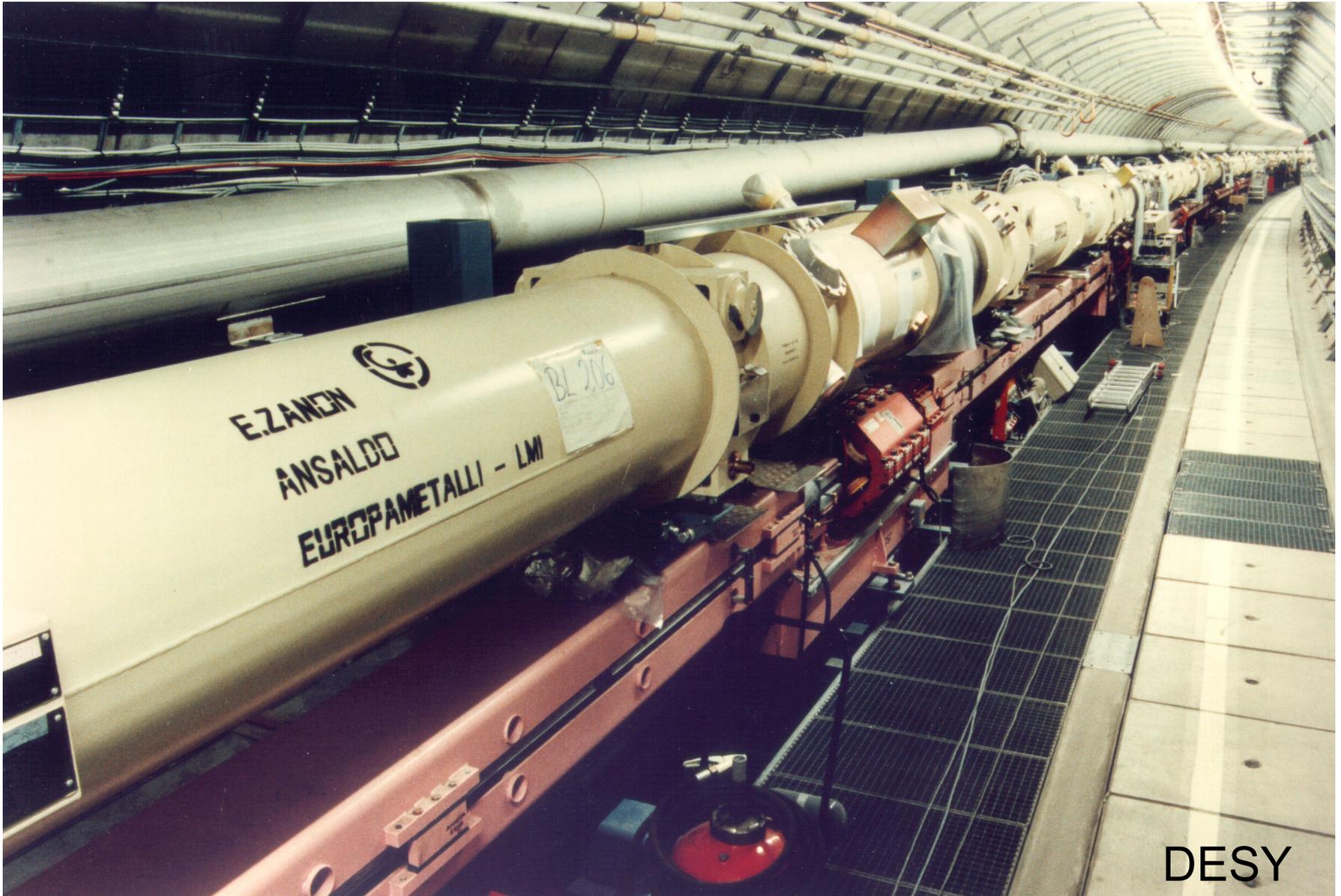
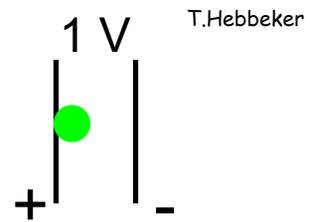
SLAC (USA)



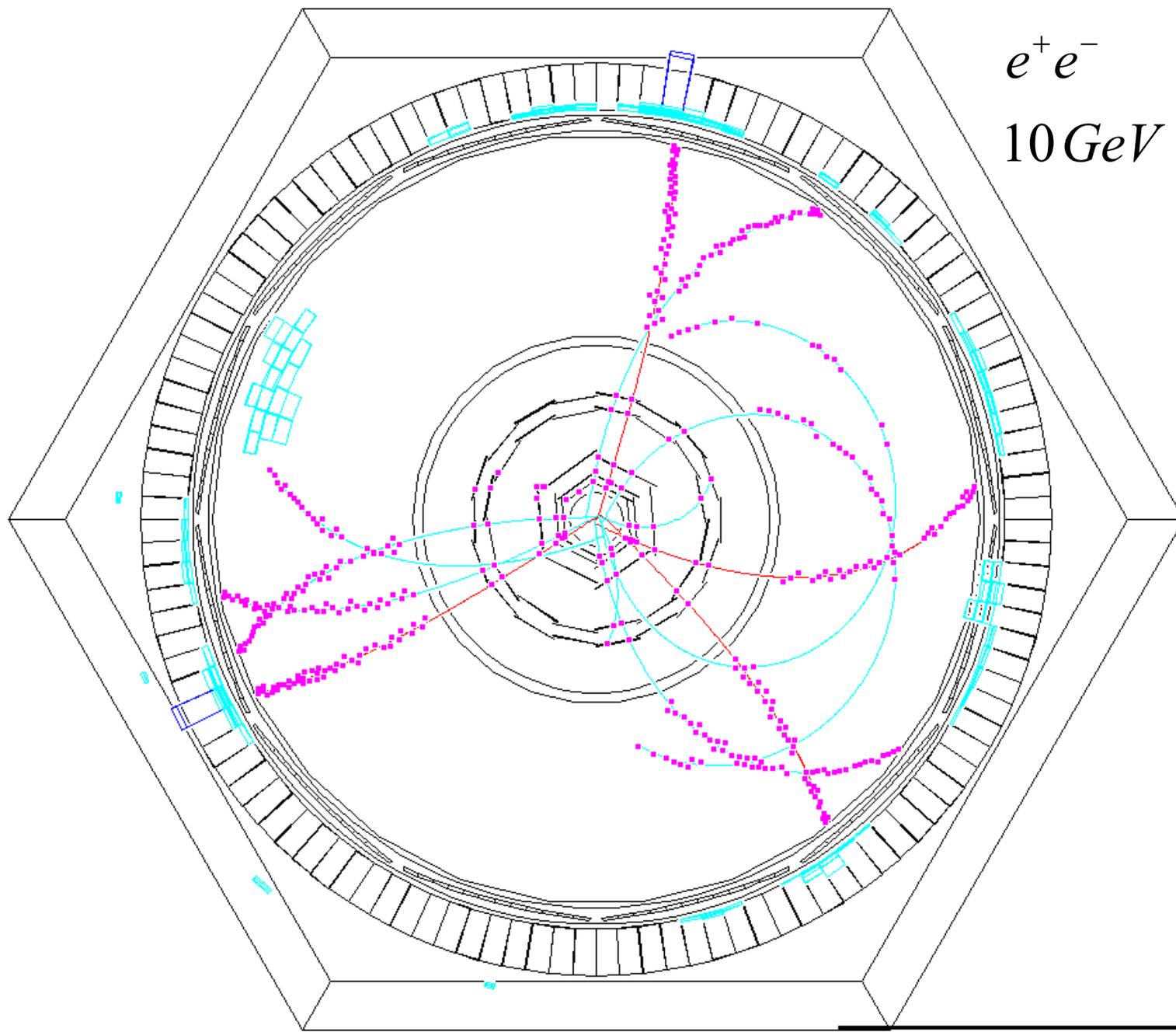
KEK (Japan)

HERA: e (30 GeV) + p (1000 GeV)

Weltbestes Elektronenmikroskop



Kollisionsereignis im BABAR-Detektor (SLAC)



Das Standardmodell der Teilchenphysik

3 „Familien“

Materie-Teilchen:

$$\text{Leptonen:} \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

$$\text{Quarks:} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

leicht

schwer

sehr schwer

Kräfte = Wechselwirkungen:

- stark: hält Quarks im Nukleon und Nukleonen im Kern (Gluon g)
- elektromagnetisch: bindet Elektronen an Kern (Photon γ)
- schwach: ermöglicht Umwandlungen (W-Boson, Z-Boson)

$$e \leftrightarrow \nu_e$$

$$\mu \leftrightarrow \nu_\mu$$

$$u \leftrightarrow d \quad (p \leftrightarrow n)$$

Das Standardmodell der Teilchenphysik

3 „Familien“

Materie-Teilchen:

$$\text{Leptonen:} \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

$$\text{Quarks:} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

leicht

schwer

sehr schwer

? Higgs ?

Kräfte = Wechselwirkungen:

- stark: hält Quarks im Nukleon und Nukleonen im Kern (Gluon g)
- elektromagnetisch: bindet Elektronen an Kern (Photon γ)
- schwach: ermöglicht Umwandlungen (W-Boson, Z-Boson)

$$e \leftrightarrow \nu_e$$

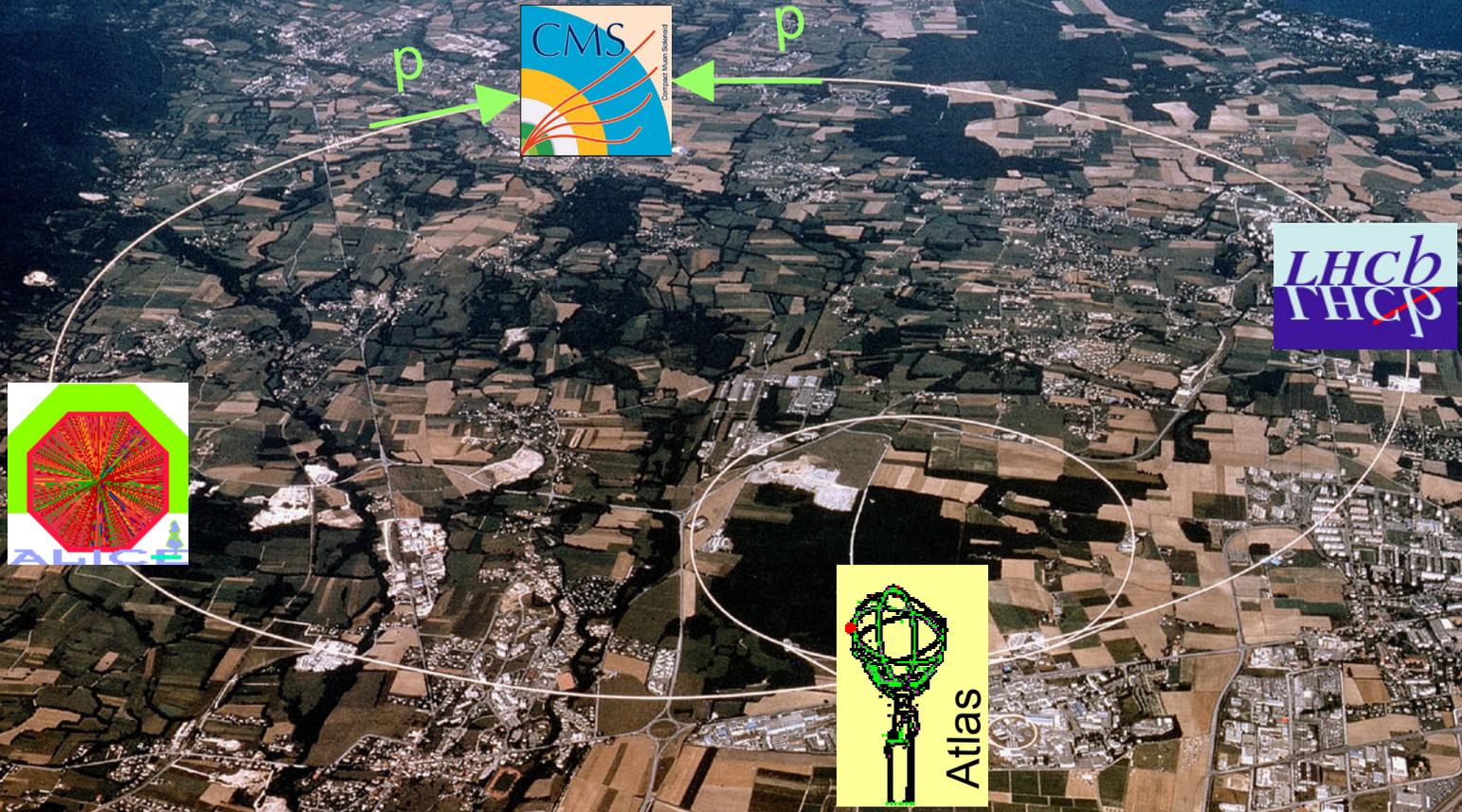
$$\mu \leftrightarrow \nu_\mu$$

$$u \leftrightarrow d \quad (p \leftrightarrow n)$$

LHC = Large Hadron Collider am CERN

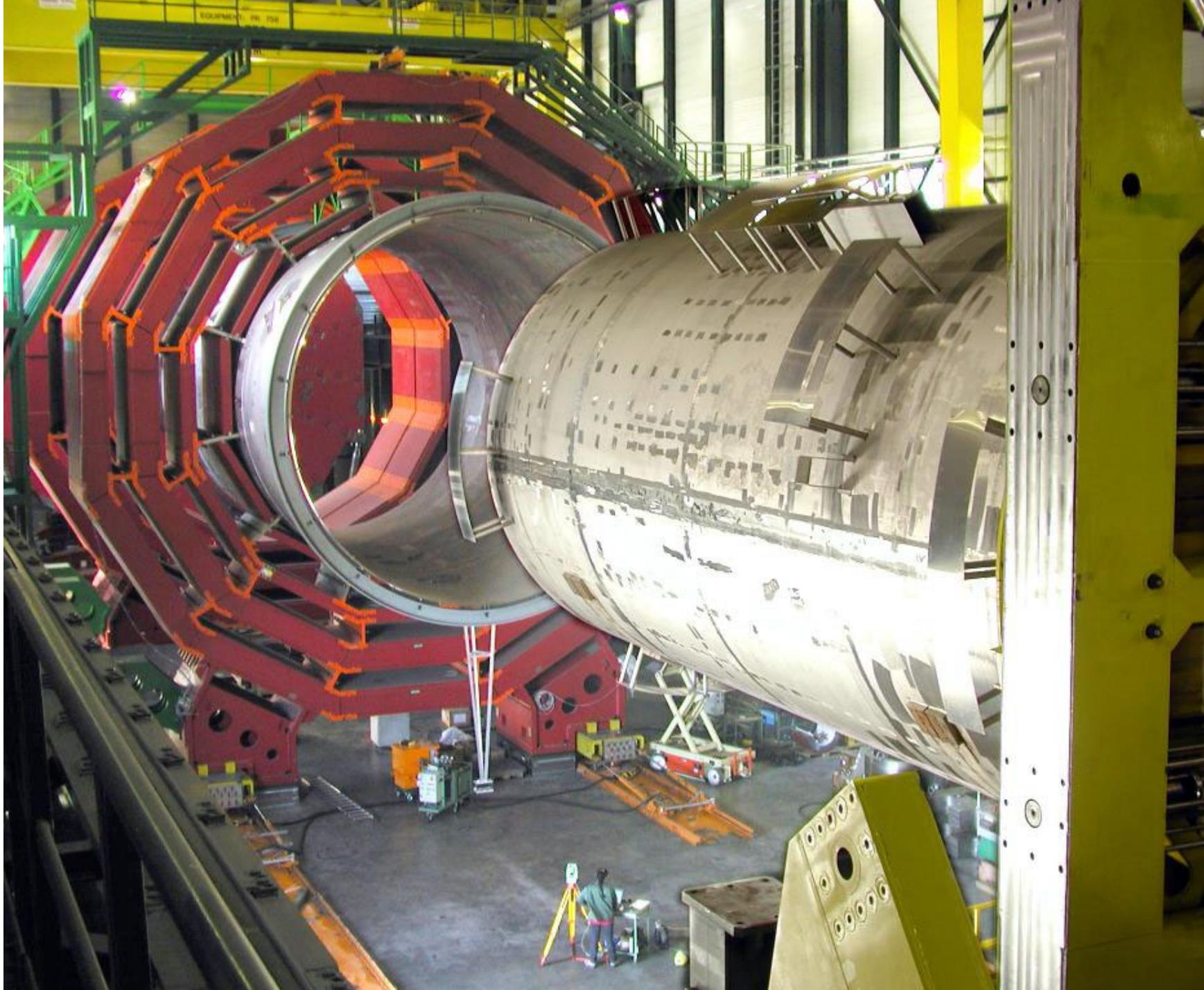
7000 GeV p + 7000 GeV p

Start: 2007



Bis 2000: LEP = Large Electron Positron Collider

CMS-Detektor am LHC



Zusammenfassung Elementarteilchenphysik



Beschleuniger
+ Detektoren

Standardmodell:

3 Familien von Leptonen und Quarks

Starke und elektromagnetische und
schwache Kraft

? Higgs ?



Astrophysik

Universum

Urknall

Elementarteilchenphysik

Teilchen und Kräfte

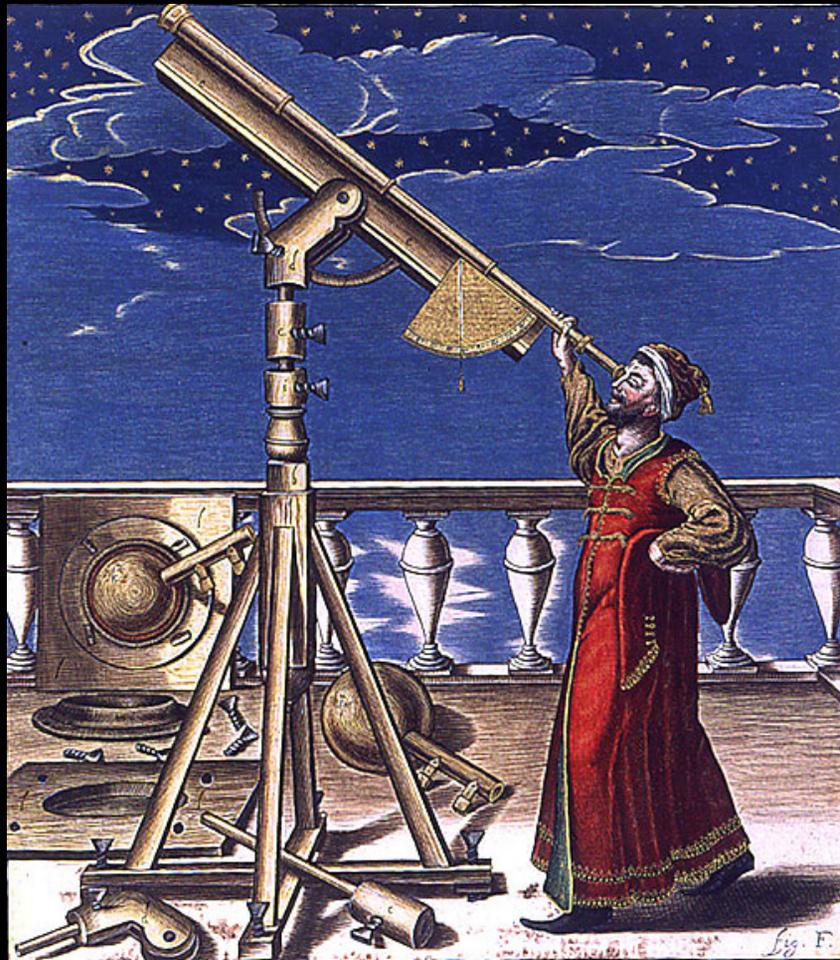
Neutrinos

Neutrinos aus dem Urknall

Aktuelle Neutrino-physik

Astronomen und Teilchenphysiker

... damals ...



Astronomen und Teilchenphysiker

... heute ...



Astronomen und Teilchenphysiker

... heute ...

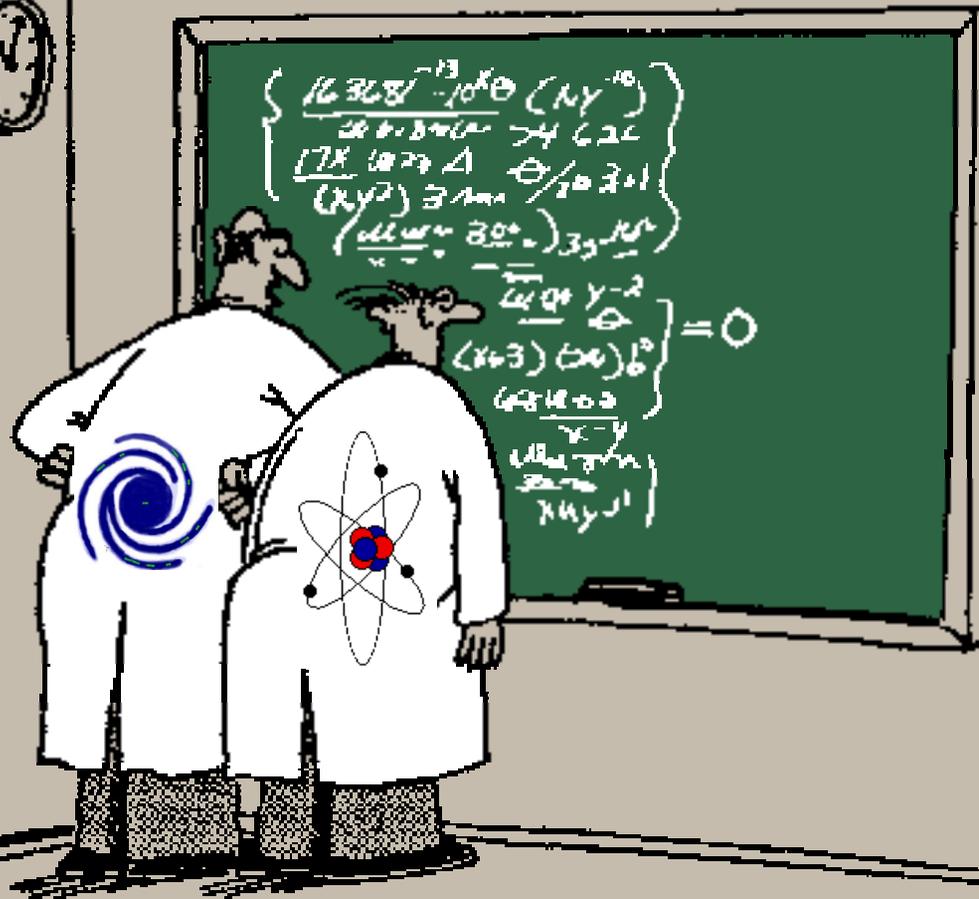


NASA
(Hubble - Teleskop)



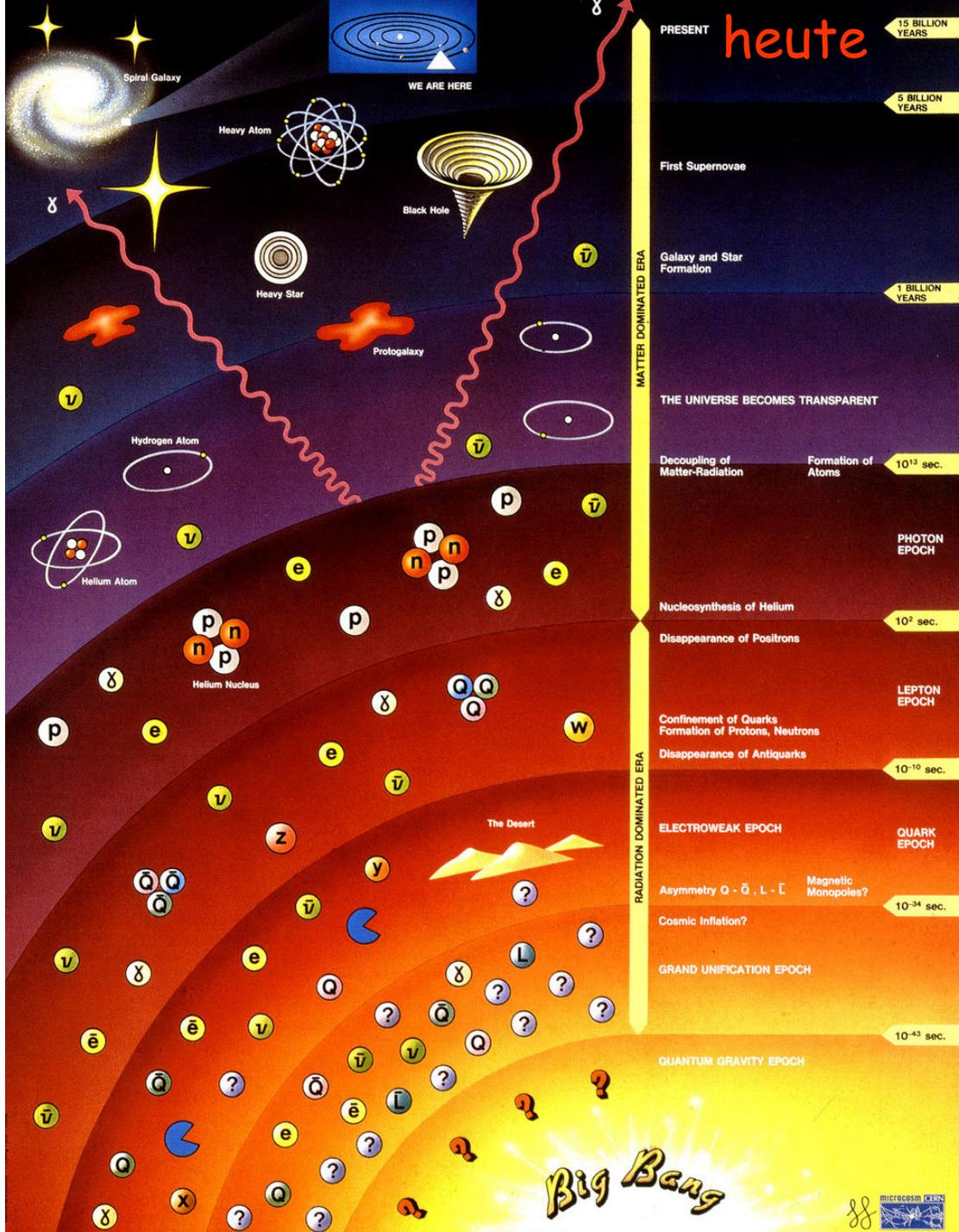
CERN
(LEP-Beschleuniger)

Astronomen und Teilchenphysiker



„Kein Zweifel,
lieber Kollege - wir
haben den Sinn
des Universums
berechnet!“

Prozesse im frühen Universum



15 Milliarden J.

300 000 J. Atome

3 min Kerne

$\frac{1}{10 \text{ Milliarden}}$ sec

Teilchenphysik

Big Bang

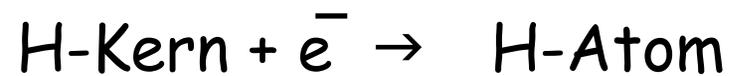
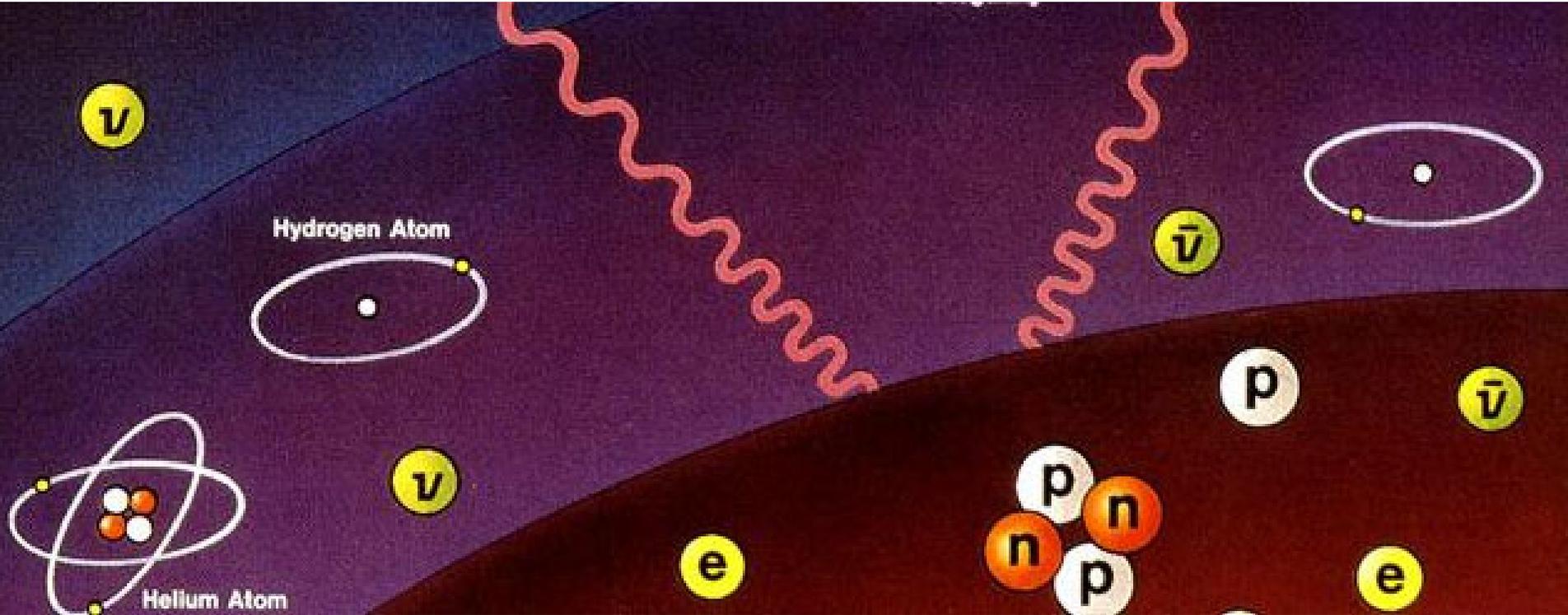
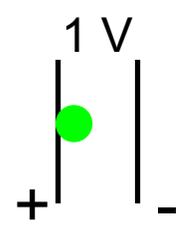


Bildung von Atomen

$t = 300\,000\text{ J.}$

$T = 3000\text{ K}$

$E = 0.3\text{ eV}$



Licht kann sich ungehindert ausbreiten,

Universum wird durchsichtig!

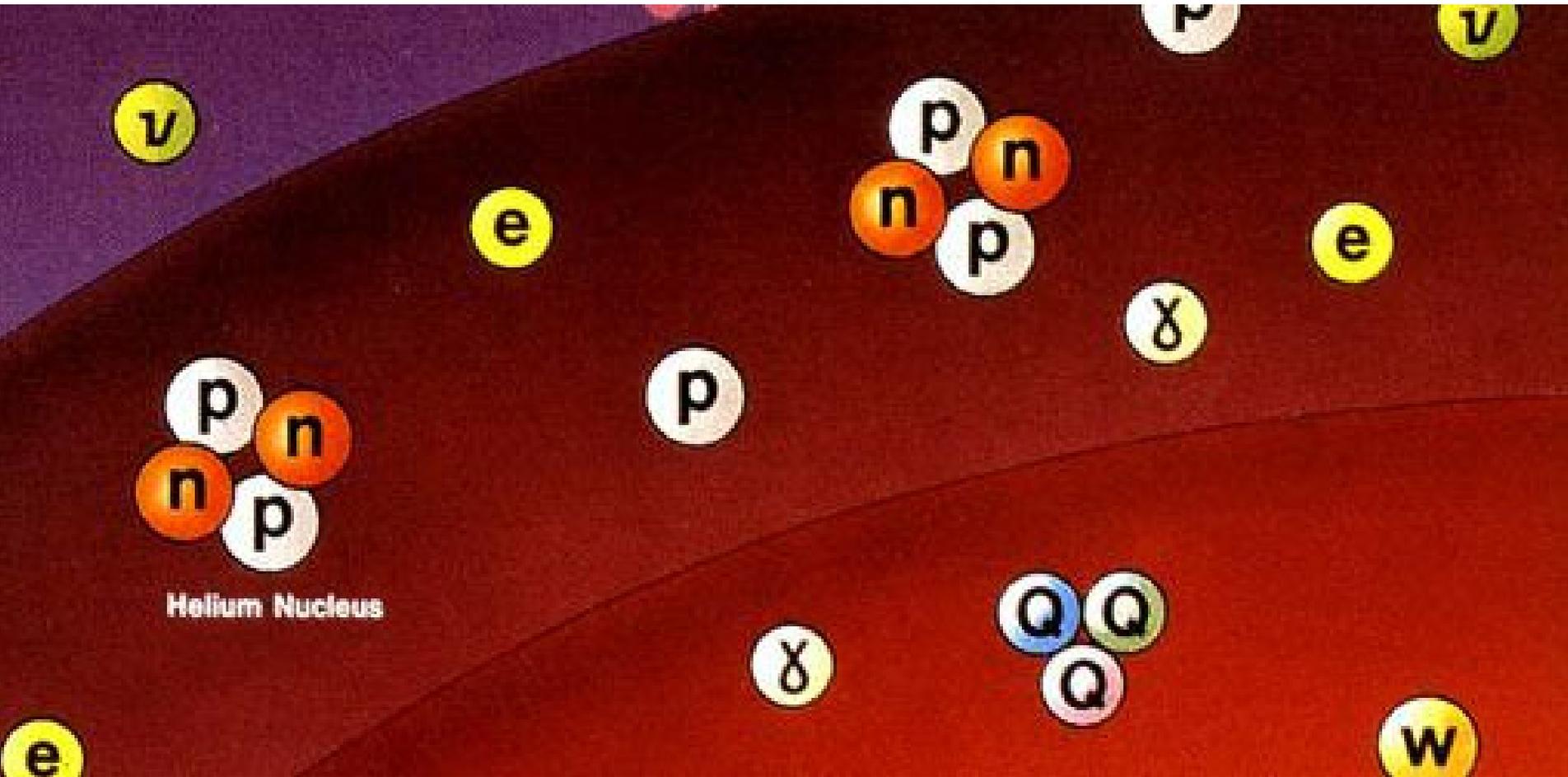
Hintergrundstrahlung!

Nukleosynthese

$t = 3 \text{ min}$

$T = 1\,000\,000\,000 \text{ K}$

$E = 0.1 \text{ MeV}$



$2n + 2p \rightarrow \text{He-Kern}$

$p = \text{H-Kern}$

n zerfällt

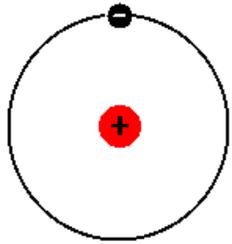
Schwere Kerne (C, O, U...) entstanden erst in Supernovae !

Die Chemie des Universums

Vor der Sternbildung:

75 %

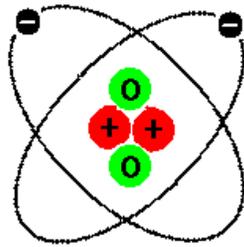
Wasserstoff



^1H

25 %

Helium



^4He

proton: 
 electron: 
 neutron: 

Am Ende des Sternenlebens:

Periodic Table of Elements

1	2																	10																	
1	H																	He																	
3	Li	4	Be																	10															
2	Li	Be																	Ne																
11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																				
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar																											
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	Y	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
4	K	Ca	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																	
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																	
55	Cs	56	Ba	*La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																	
87	Fr	88	Ra	+Ac	104	Rf	105	Ha	106	107	108	109	110																						
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110																									

* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

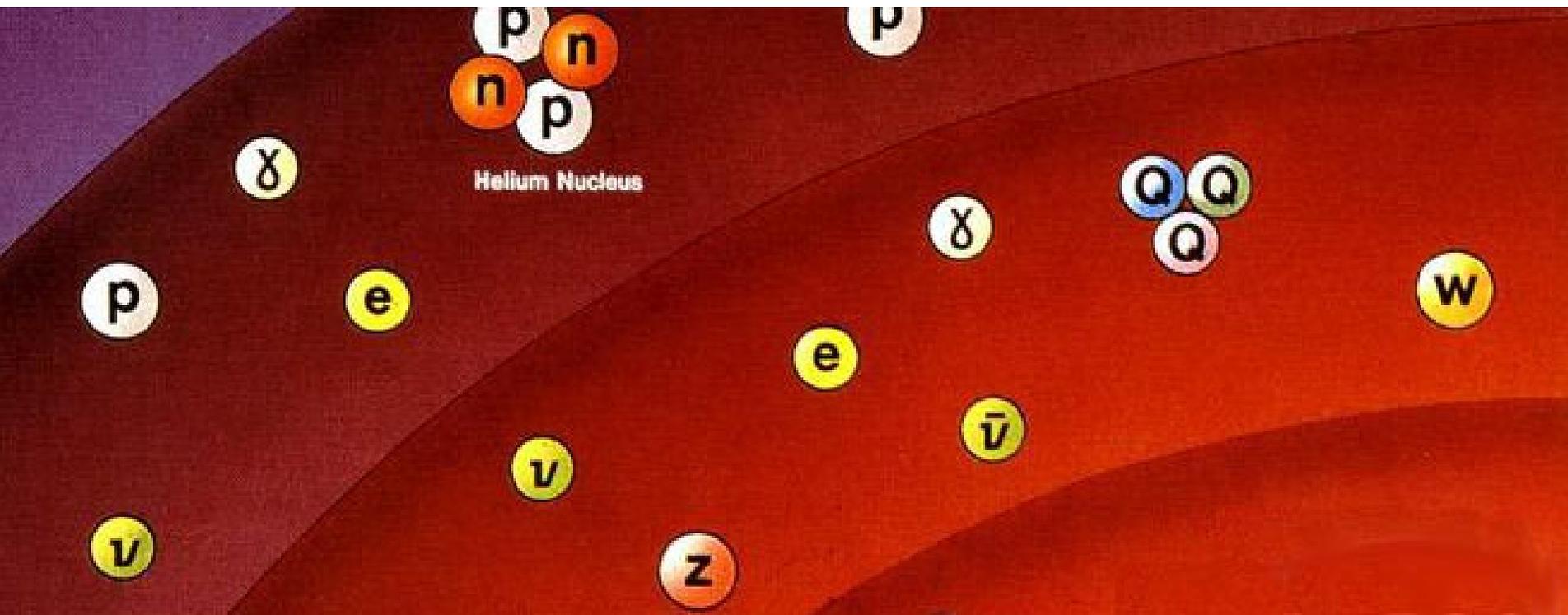
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

**Wir bestehen aus
Sternenasche !**

Neutrinos aus dem Urknall

Entstehung: $t \ll 1 \text{ sec}$

„Entkopplung“: $t = 1 \text{ sec}$ $T = 10 \text{ Milliarden K}$ $E = 1 \text{ MeV}$



Neutrinos aller Sorten ($\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$) plus Antineutrinos !



(noch) pfandfrei !

Inhalt:

$$35 \text{ cm}^3$$

Zusammensetzung pro cm^3 :

$$55\nu_e + 55\bar{\nu}_e$$

$$55\nu_\mu + 55\bar{\nu}_\mu$$

$$55\nu_\tau + 55\bar{\nu}_\tau$$

Kinetische Energie:

$$\sim 0.000001 \text{ eV}$$

Fragen:

- Kann man diese Neutrinos nachweisen ?

bisher nicht

(da Wechselwirkung schwach und Energie sehr klein)

- Woher kennt man die Zahl / cm^3 ?

Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung

+ Rechnungen

- Bleiben die Neutrinos in der Dose ?

Nein, sie fliegen von allen Richtungen
mit hoher Geschwindigkeit rein und raus





Astrophysik

Universum

Urknall

Elementarteilchenphysik

Teilchen und Kräfte

Neutrinos

Neutrinos aus dem Urknall

Aktuelle Neutrino-Physik

Neutrino-Masse ?



Wichtig für Teilchenphysik und Kosmologie: Kollaps des Universums ?

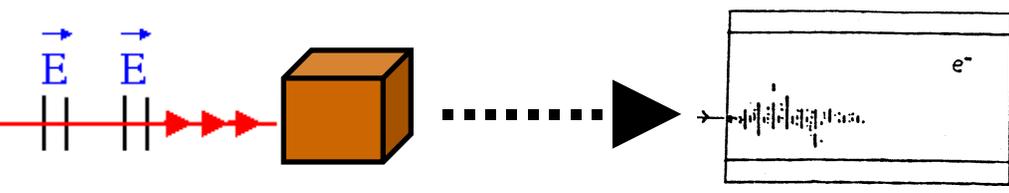
Universum: 1 Milliarde mal mehr
Neutrinos als Nukleonen !

Massenbestimmung:

- a) Genaue Messungen des Beta-Zerfalls $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$
- b) Neutrino-Oszillationen ? (B. Pontecorvo 1969)



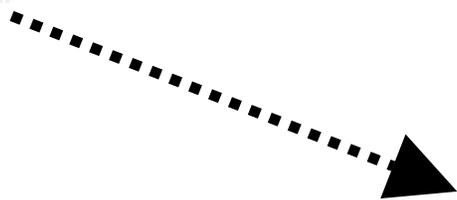
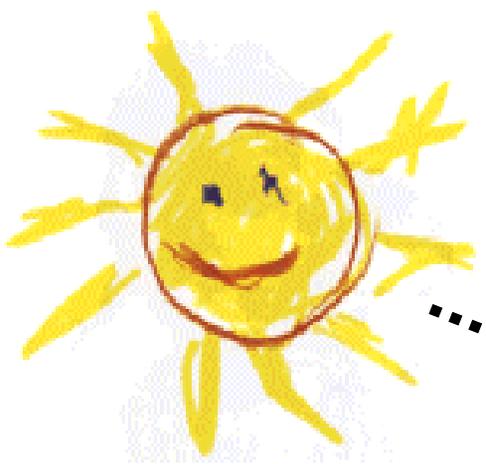
Neutrino-Oszillations-Experimente



Beschleunigerexperimente



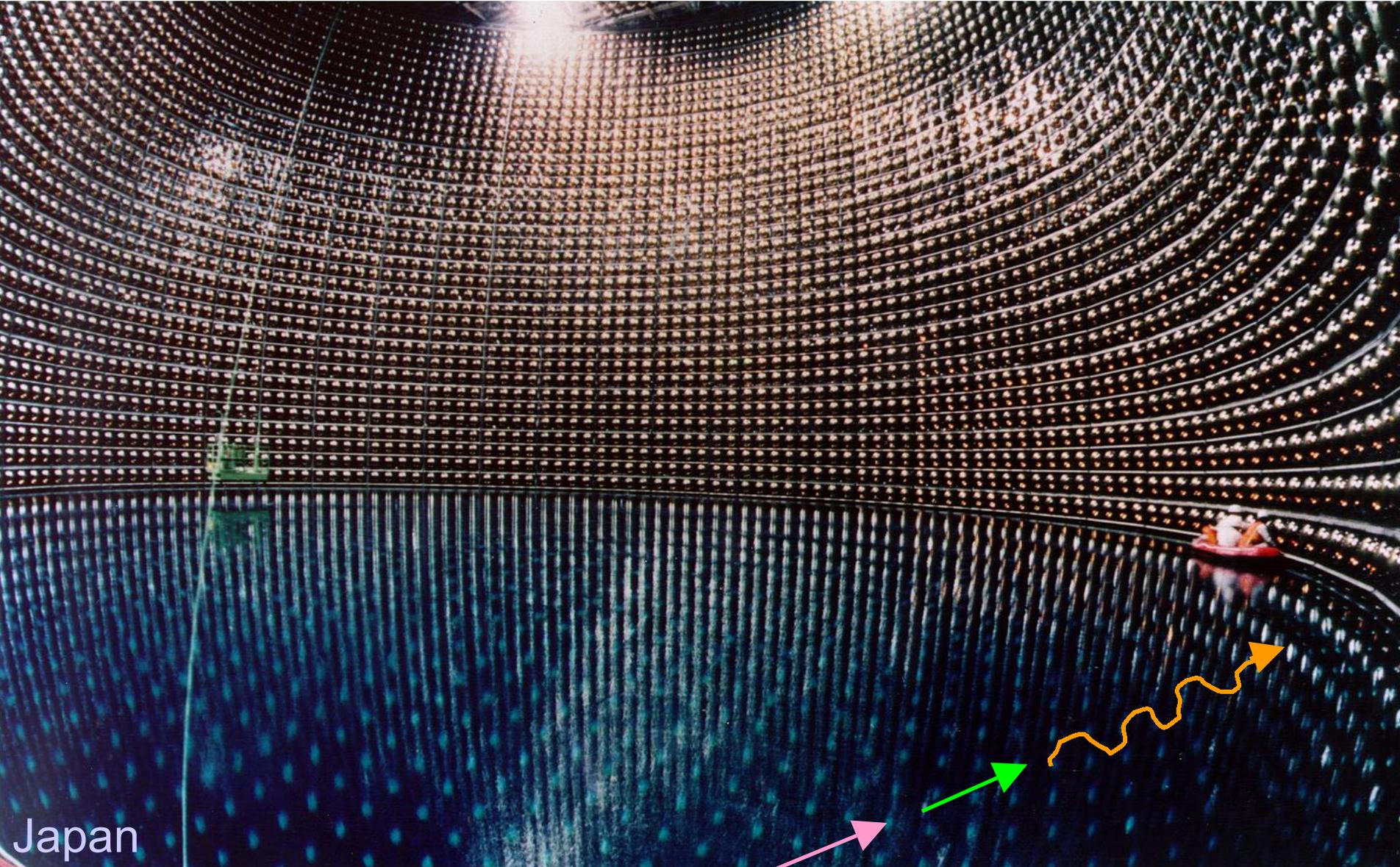
Reaktorneutrinos



Sonnen-Neutrinos

Super-Kamiokande

$$\nu \rightarrow e \rightarrow \text{Licht}$$



Japan

Neutrino-Eigenschaften

Neutrino-Oszillationen in mehreren Experimenten nachgewiesen!

**Nobelpreis
2002**

R. Davis, M. Koshiba

- Sonne rehabilitiert !



- Neues Verständnis der schwachen Wechselwirkung

- Neutrinos haben eine Masse

$$\sim 0.01 \frac{eV}{c^2} \dots \sim 1 \frac{eV}{c^2}$$

(Elektron: $500000 \frac{eV}{c^2}$)



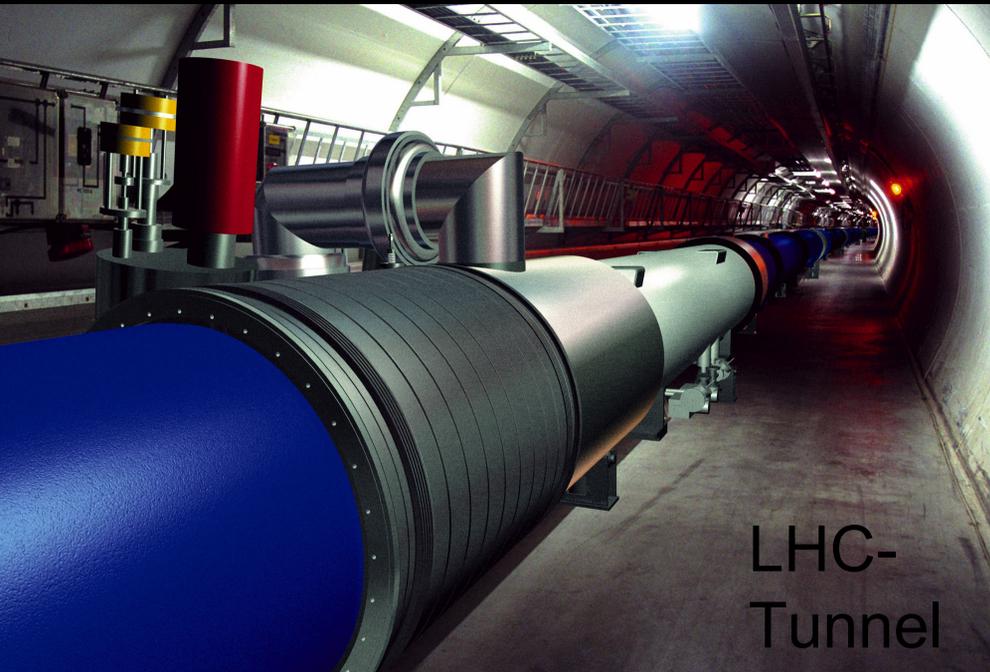
- Beitrag der Big-Bang-Neutrinos zur Masse des Universums:
gleiche Größenordnung wie Atome oder weniger

Zusammenfassung

Astrophysik

+ Teilchenphysik

= **Kosmologie**



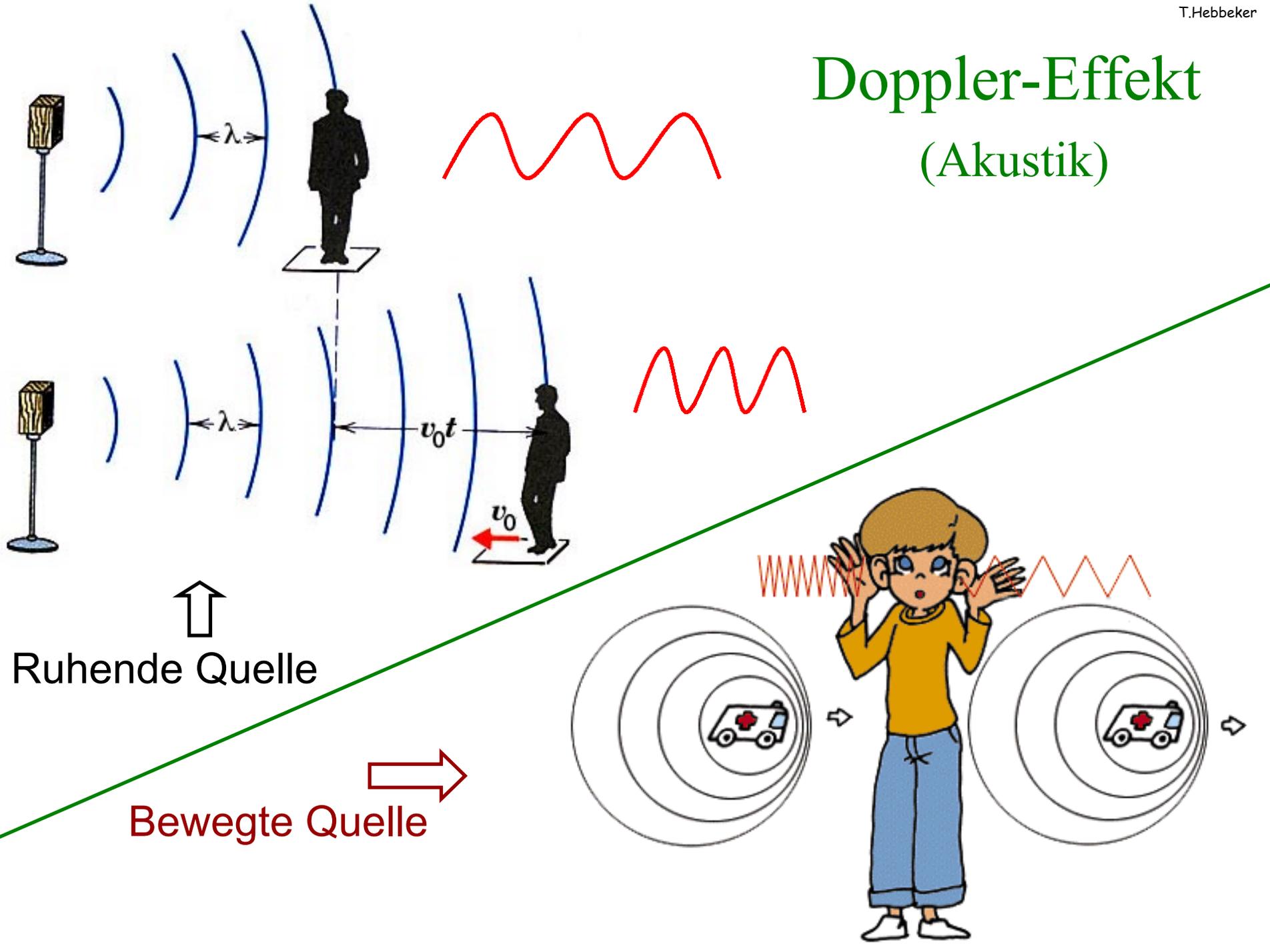
LHC-
Tunnel



Faszinierende
Ergebnisse die
unser Weltbild
prägen

ANHANG

Doppler-Effekt (Akustik)



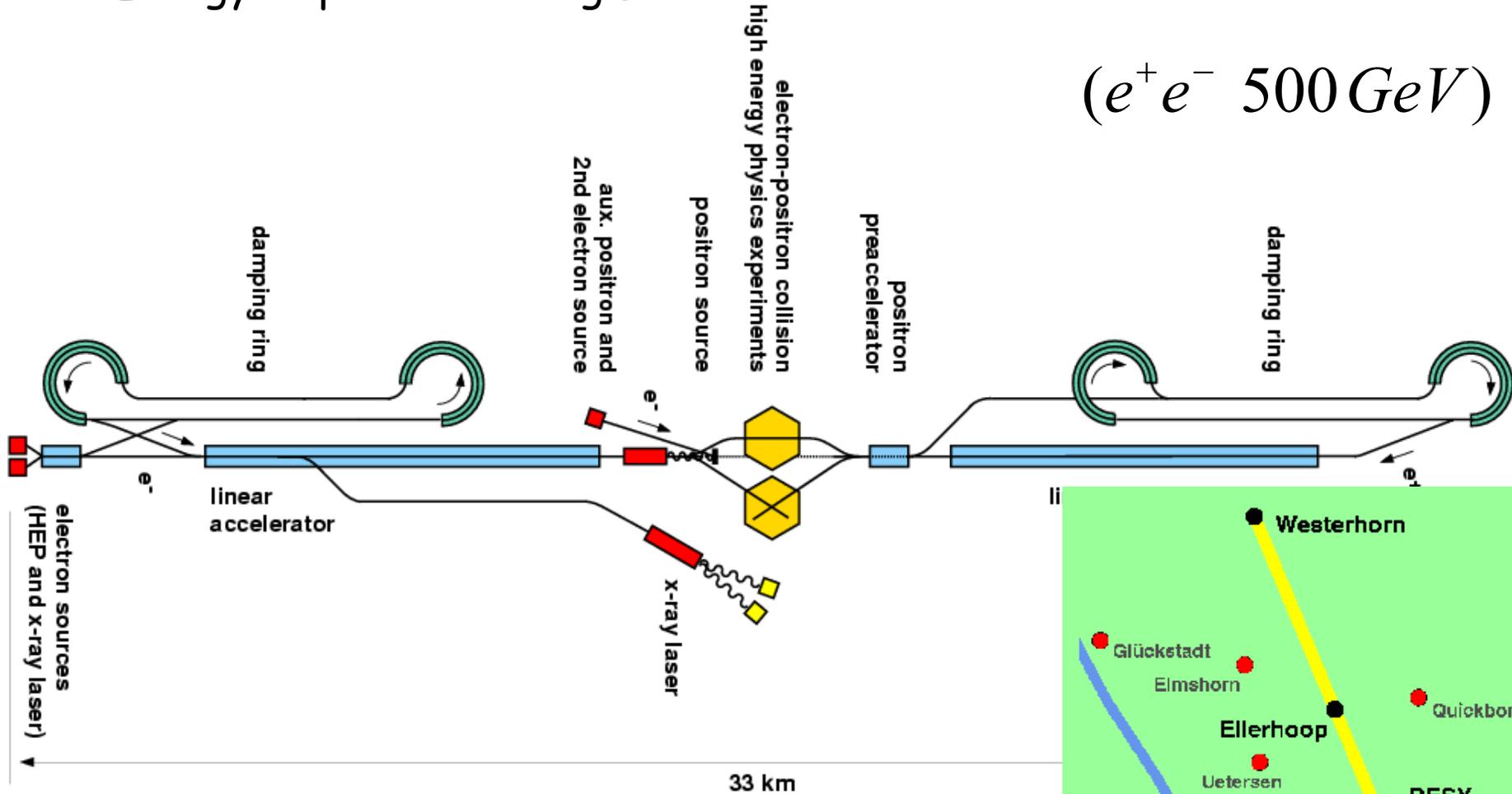
↑
Ruhende Quelle

→
Bewegte Quelle

Plan: TESLA-Linearbeschleuniger

= TeV Energy Superconducting Linear Accelerator

(e^+e^- 500 GeV)



li



Neutrino-Physik in Aachen

Gargamelle-
Blasenkammer
1973

