



Brennpunkte extragalaktischer Forschung

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

E-mail: sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de

Web: www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/

Heute: das Programm

- Heute: Die Themen des Semesters – Überblick
- 30.10. Gamma-Ray Bursts

- **13.11. GUT & TOE (Stringtheorie, etc.)**

- 27.11. LHC & HIGGS
- 11.12. Stringtheorie, Supersymmetrie, Quantengravitation

Winterferien: 23.12.-06.01.10

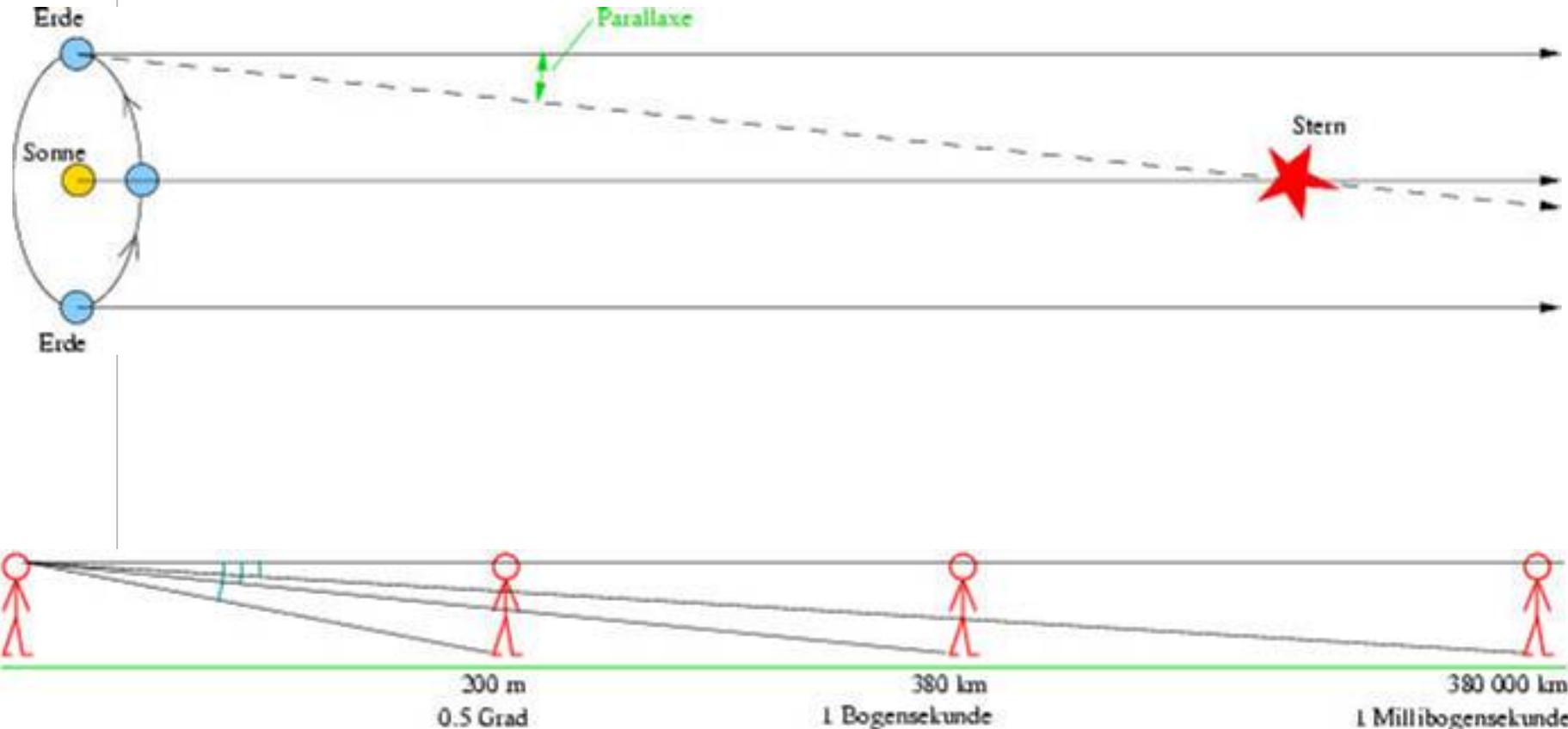
- 08.01.10 Vor dem Urknall
- 22.01.10 Zeit & Lichtgeschwindigkeit
- 05.02.10



Entfernungsbestimmung - Methoden

Objekte	Methoden	Bereich
Sonne, Planeten	trigonometrische Messungen, Radarechos, Kepler-Gesetz mittlere Entfernung Erde - Sonne 1 AE = 149 600 000 km	Sonnensystem
nächste Sterne	trigonometrische Parallaxe 1 pc = 206265 AE; 1 Lichtjahr=0,3066 pc=63240 AE	bis 10 pc, mit großen Ungenauigkeiten bis 100 pc
Hyaden	Sternstromparallaxe	42 pc
Milchstraße	spektroskopische Parallaxe	
Galaxien	Cepheiden hellste Sterne, Kugelsternhaufen Supernovae	bis ca 4 Mpc 30 Mpc 200 Mpc
Galaxienhaufen	hellste elliptisch Galaxien	10 000 Mpc ?

Friedrich Wilhelm Bessel 1838: Die erste Parallaxe eines Sterns.

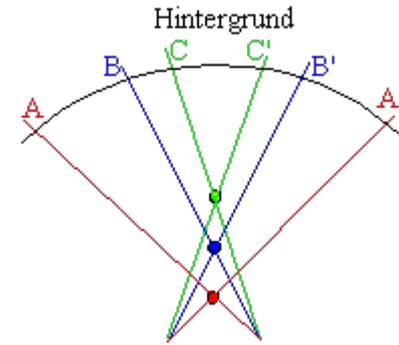
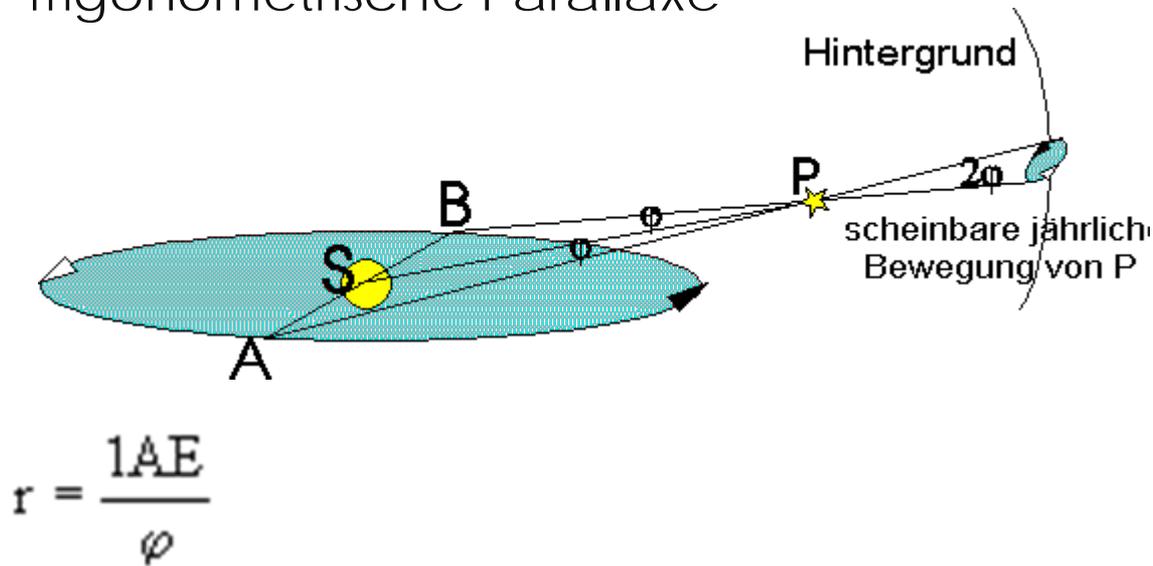


Parallaxe

- Beobachten wir einen nahen Gegenstand von verschiedenen Orten aus, so scheint der Gegenstand seine Position vor dem sehr weit entfernten Hintergrund zu ändern. Ebenso sehen wir, dass besonders nahe Sterne ihre Position vor dem Hintergrund der sehr weit entfernten Sterne verändern, wenn wir unsere Position verändern. Natürlich ist diese Positionsänderung auch für die größtmögliche Ortsveränderung sehr klein und daher schwierig zu messen. Die größte Ortsveränderung, die wir ausführen können, ist doppelt so groß wie die große Halbachse der Erdbahn, d.h. wir messen im zeitlichen Abstand von einem halben Jahr.

Entfernungsbestimmung

- Trigonometrische Parallaxe



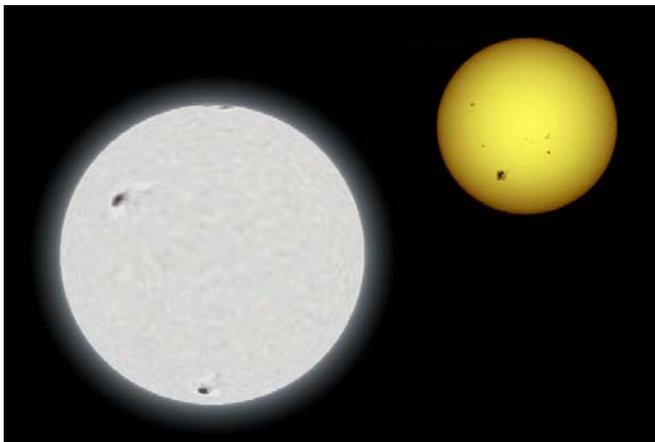
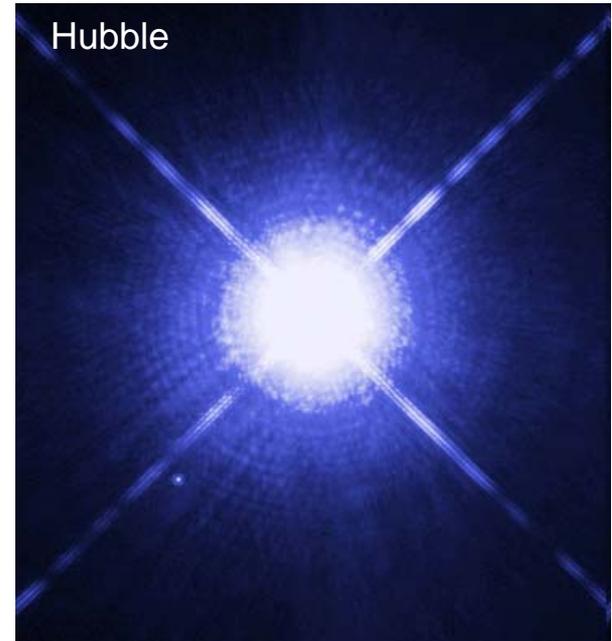
Ist der Winkel halb so groß, so ist die Entfernung doppelt so groß.
Man führt nun eine neue Entfernungseinheit ein, es ist die Entfernung, für die die Parallaxe 1" betragen würde. Die Entfernung heißt dann 1 **Parallaxensekunde**, kurz 1 **Parsec** (1 pc).

$$r = \frac{1'' \cdot \text{pc}}{\varphi}$$

Die größte gemessene Parallaxe, also die des Nachbarsterns der Sonne, α Centauri, beträgt nur 0,772".

Die anderen Parallaxen sind noch viel kleiner und daher schwierig zu messen. Ab einer Entfernung von ca. 100 pc versagt die Methode, da die Parallaxen dann so klein sind, dass sie im Bereich der Messfehler liegen.

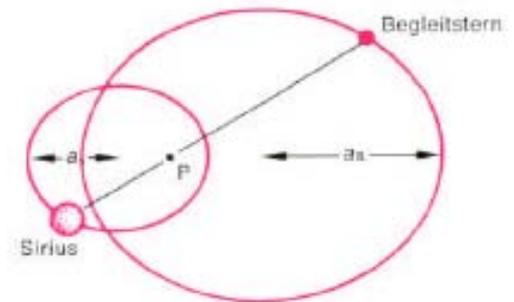
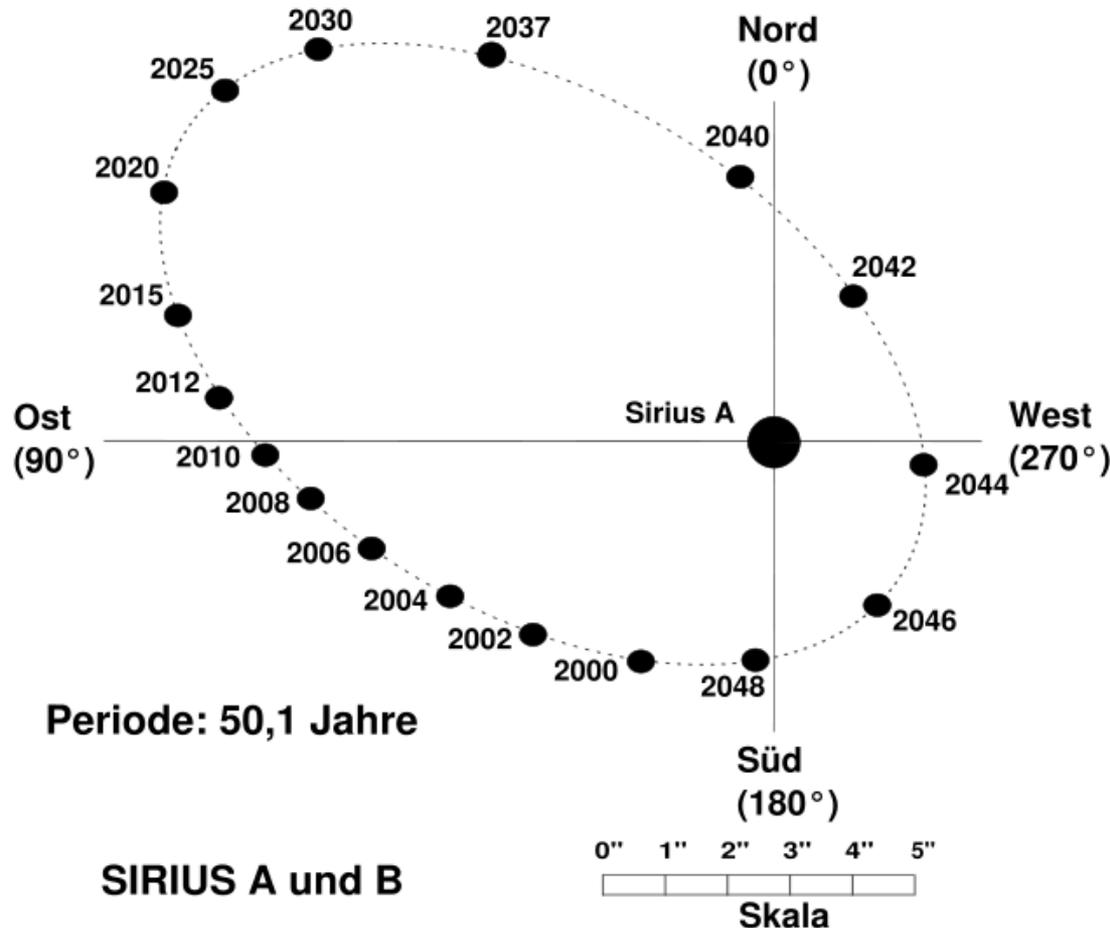
Sirius A & B



Entfernungsbestimmung: Sirius

Original from:

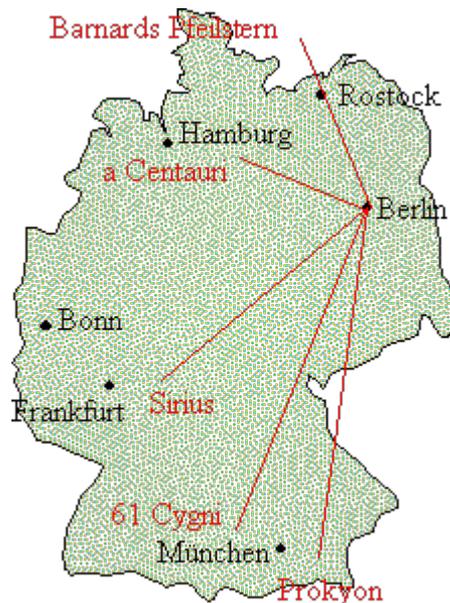
<http://www.edu-observatory.org/mcc/homework/homework.ch.20-21/SiriusPup.gif>



Die große Halbachse der Bahn von Sirius B ist doppelt so groß wie jene des Sirius A. Daher hat Sirius A die doppelte Masse seines Begleiters.

Entfernung zu Sirius

- In diesem Modell ist Pluto ca. 28 m vom Ausgangspunkt entfernt, die Sonne hat einen Radius von 6 mm.



Stern	Sternbild	Entfernung in Lj
α Centauri	Centaur	4,3
Barnards Pfeilstern	Ophiuchus	5,9
Wolf 359	Löwe	7,7
Sirius	gr. Hund	8,7
61 Cygni	Schwan	11,1
Prokyon	kl. Hund	11,3

Parallaxenmessung ist nur in unserer unmittelbaren Nähe möglich. Nur wenige, ganz sonnennahe Sterne sind erreichbar.

Deshalb haben die Astronomen einen riesigen Zoo von indirekten Methoden zur Entfernungsbestimmung entwickelt.

Deshalb wird die sogenannte kosmische Entfernungsleiter benötigt, um die Tiefen des Universums auszuloten.

Die kosmische “Entfernungsleiter”

- 1) Messe direkt die Entfernung einiger sonnennaher Sterne
- 2) Suche den Himmel nach “gleichartigen” Sternen ab
(was immer das im Detail bedeuten möge)
- 3) Vergleiche die auf der Erde gemessenen Helligkeiten der sonnennahen und der “gleichartigen” Sterne:

$$\text{Helligkeit} \sim 1 / (\text{Entfernung})^2$$

- 4) Suche “gleich weit entfernte” absolut hellere Sterne
(was immer das im Detail bedeuten möge),
die es in der Sonnenumgebung nicht gibt.
 - 5) Wiederhole Schritt 3 mit diesen helleren Sternen
 - 6) Wiederhole Schritt 4
- usw.

Die kosmische Entfernungsleiter bietet Vorlesungsstoff für ein ganzes Semester. Wir wollen das Thema hier nicht weiter vertiefen, sondern an einem konkreten Beispiel zeigen, was man aus den einmal gefundenen Entfernungen über die Sterne lernen kann.

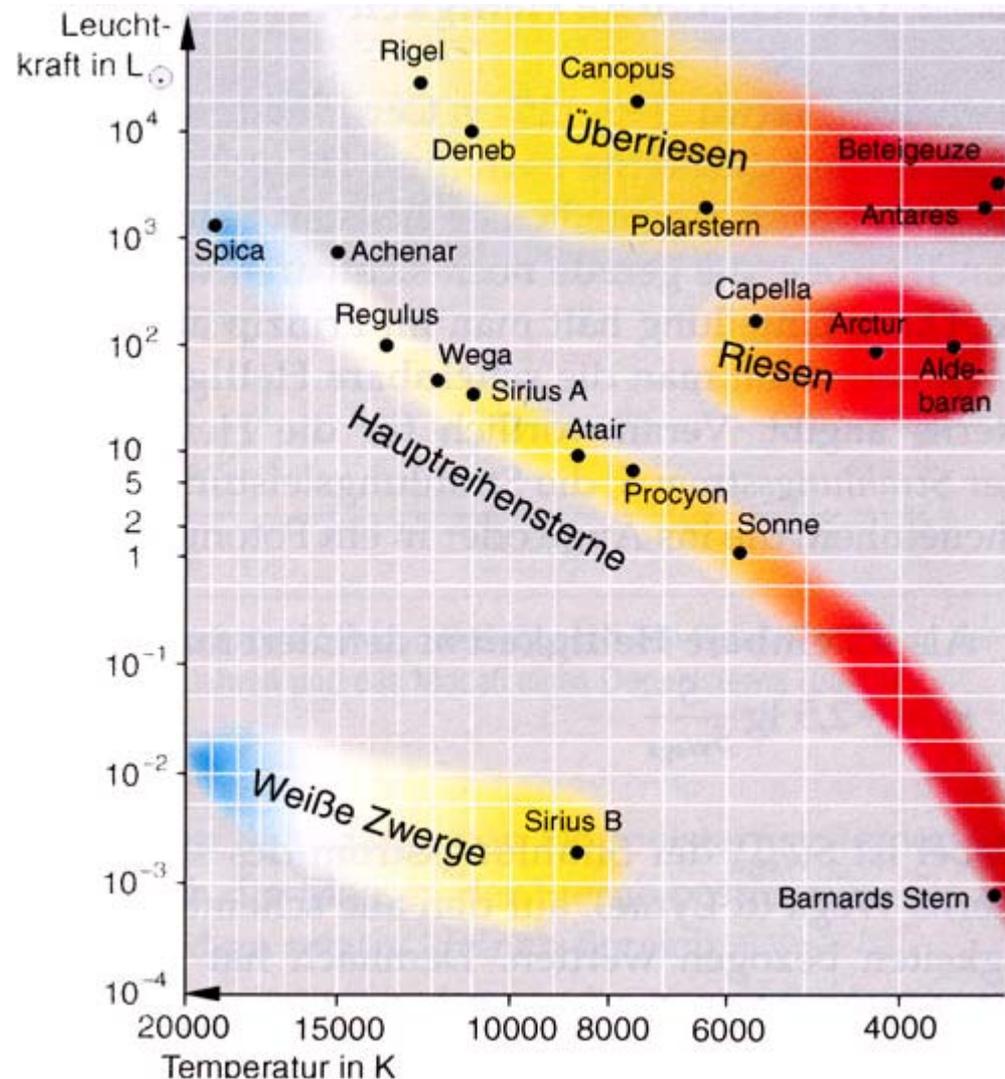
Im sog. Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) wird die absolute Helligkeit von Sternen gegen ihre Oberflächentemperatur aufgetragen.

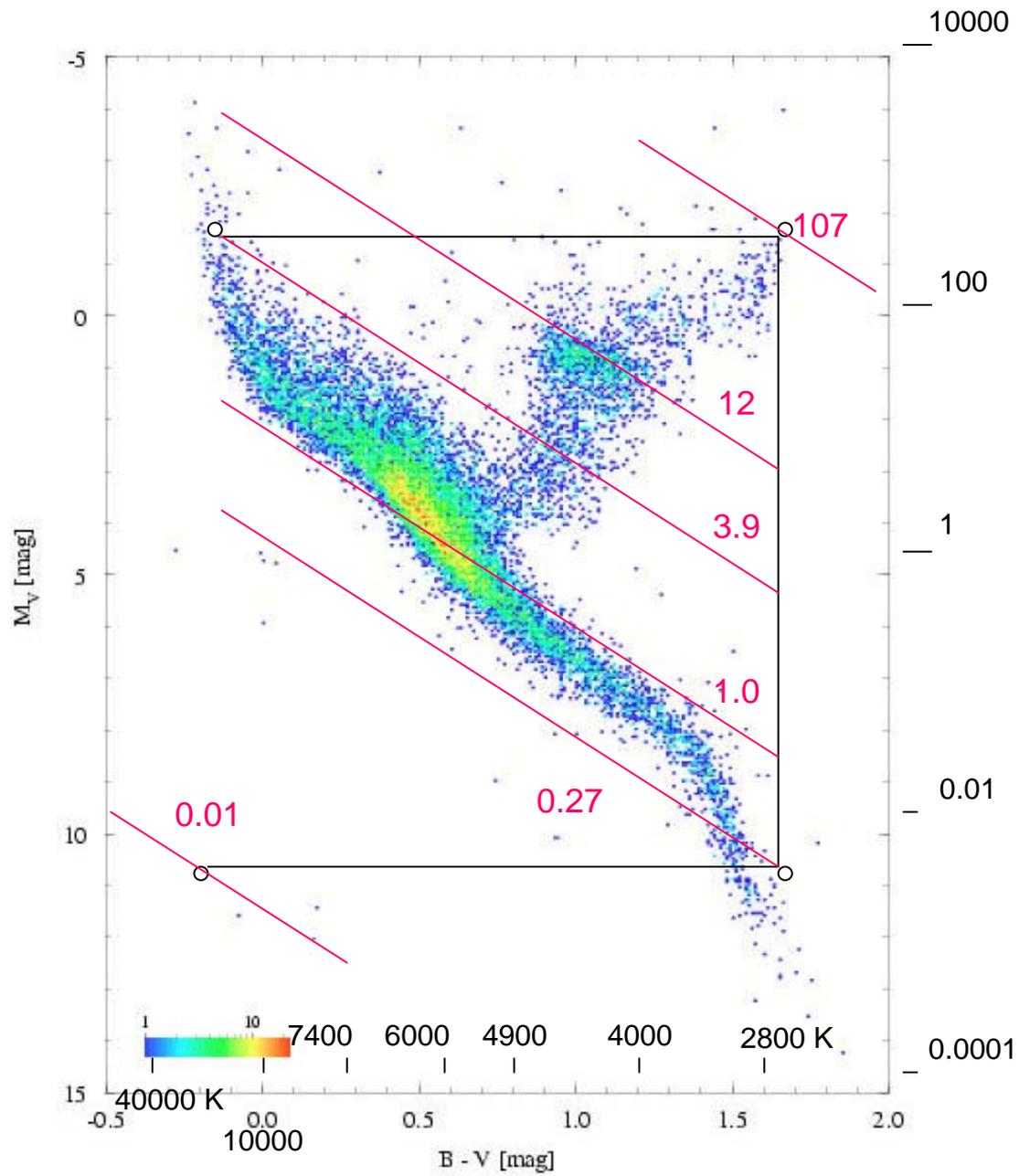
In den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts hatte man endlich genügend Sternparallaxen gemessen, um ein solches Diagramm einigermaßen mit Messpunkten (Sternen) füllen zu können.

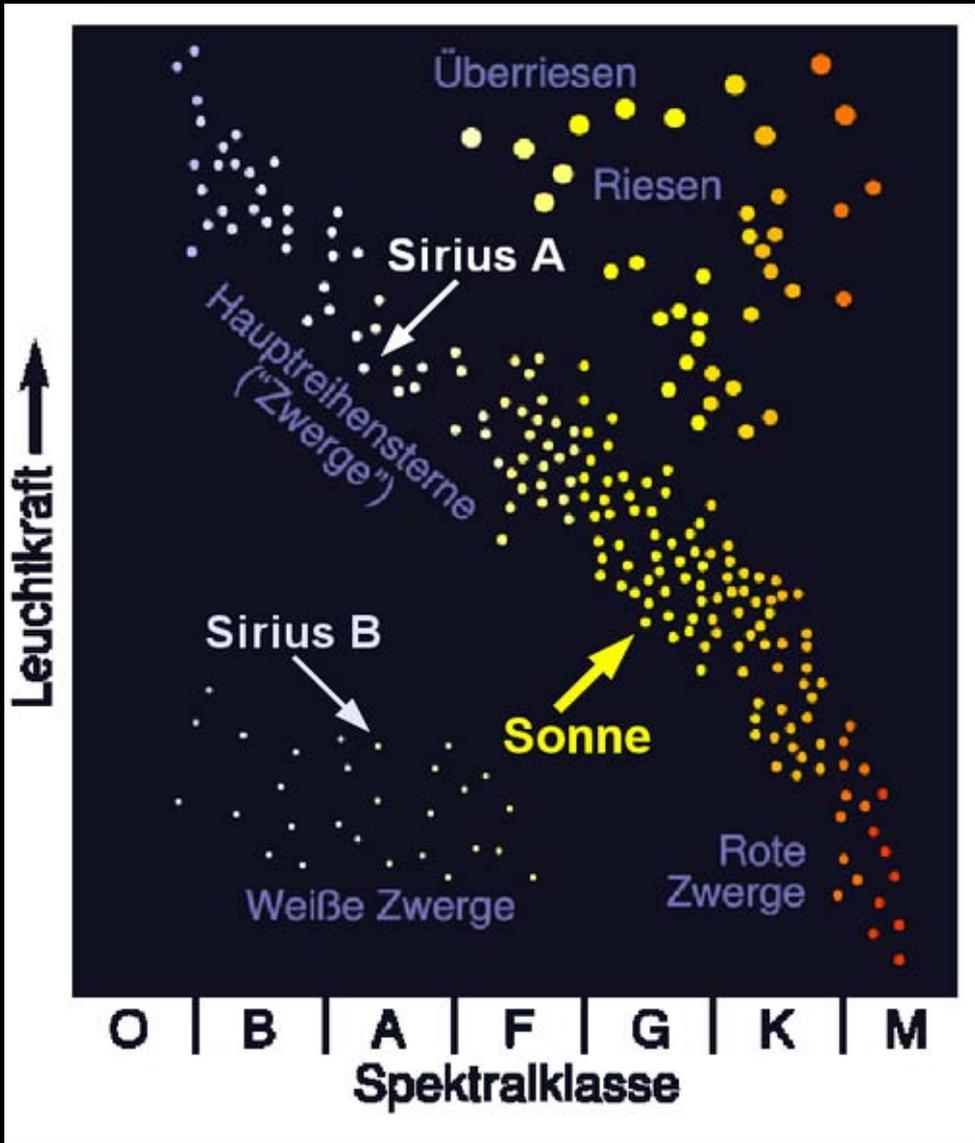
Dieses Diagramm kann heute mit gutem Recht als das Sinnbild der Astrophysik der Sterne im 20. Jahrhundert bezeichnet werden. Aus ihm haben die Astronomen fast unendlich viel über Sterne gelernt.

Hertzprung-Russell Diagramm

Ein wichtiges Diagramm zur Einordnung der Sterne nach bestimmten Sterntypen wurde 1910 von den Astronomen E. Hertzsprung (Dänemark) und H. N. Russell (USA) aufgestellt. Auf der y-Achse ist die Leuchtkraft L der Sterne in Einheiten der Sonnenleuchtkraft in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Damit lässt sich die über neun Zehnerpotenzen reichende Leuchtkraft anschaulich darstellen. Gleichberechtigt ist die Wahl der absoluten Helligkeit als Hochwertskala. Auf der x-Achse ist die Oberflächentemperatur T der Sterne ebenfalls logarithmisch aufgetragen. – Man kann auch die Spektralklasse verwenden. Trägt man alle Sterne, die sich in der Nachbarschaft der Sonne befinden in das Diagramm ein, so ordnen sich fast alle Sterne in einem Band an, das von links oben nach rechts unten verläuft. Oben links stehen die bläulich weißen Sterne hoher Leuchtkraft, in der Mitte die sonnenähnlichen gelben Sterne und rechts unten, dort ist das Band besonders dicht besetzt, die roten Zwergsterne. Dieses Band bezeichnet man als **Hauptreihe** und die Sterne als **Hauptreihensterne**. Sie stellen den größten Anteil der Sterne dar.







Anschauliche Darstellung der Methoden:

http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/grundwissen/12entfernung/index.htm

A composite image featuring a bright, glowing star at the center, surrounded by several planets of varying sizes and colors. The background is dark, with some faint, distant galaxies visible. Overlaid on this scene is a faint, glowing Bohr-style atomic model, with a central nucleus and several concentric electron shells. The text "Die Suche nach der Weltformel" is centered in white.

Die Suche nach der Weltformel

Warum eine Weltformel suchen?

- Notwendigkeit?
- Der Versuch verschiedene Phänomene in der Natur einheitlich zu beschreiben – ästhetisches und pragmatisches Leitprinzip
- Tiefe Einsicht in die Natur: Vieles funktioniert nach wiederkehrenden Prinzipien
- Selbstähnlichkeit ist ein fundamentales Naturgesetz
- Physikalische oder philosophische Frage ?
- Kann es (prinzipiell) eine Weltformel geben?

Etappenziele einer Vereinheitlichung

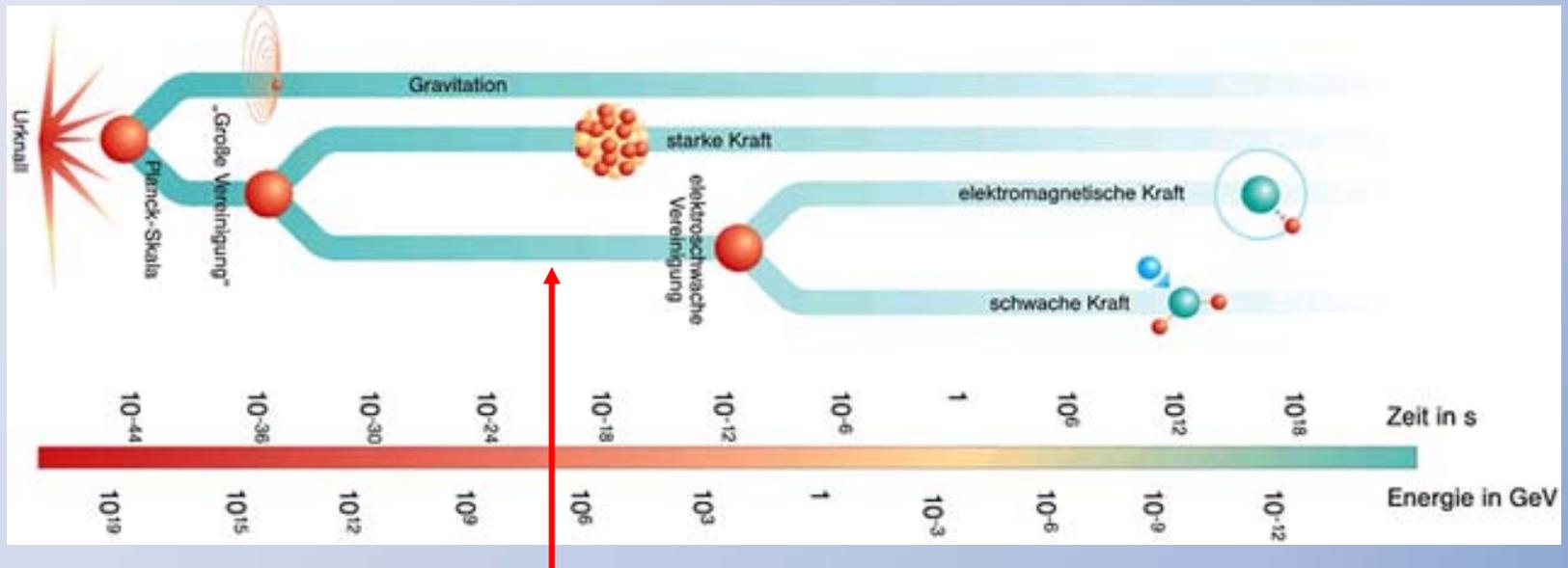
- **Newton:** Gravitationstheorie, *irdische* (fallende Körper) und *kosmische Kräfte* (Planetenbewegung) vereinheitlicht und als wesensgleich erkannt
- **Maxwell:** *elektrische* und *magnetische Phänomene* in den Maxwell-Gleichungen zusammengefasst; magnetische und elektrische Felder können ineinander verwandelt werden und die Unterscheidung ihres Wesens ist hinfällig
- **Einstein:** die physikalischen Begriffe *Masse* und *Energie* vereinheitlicht in der Relativitätstheorie; *Raum* und *Zeit* zur Raumzeit vereinheitlicht

Etappenziele einer Vereinheitlichung

- **Planck & Kollegen:** Quantenelektrodynamik ist *quantisierte* Weiterentwicklung der klassischen *Elektrodynamik* Maxwells; Austauschquant der elektromagnetischen Wechselwirkung – das Vektorboson – ist das *Photon*. QED ist erste Quantenfeldtheorie – auch die anderen fundamentalen WW in der Natur (bis auf die Gravitation) konnten durch Austauschteilchen beschrieben werden, die zwischen verallgemeinerten Ladungen (el. Ladung, schwache Ladung, Farbladung, Masse als gravitative Ladung) vermitteln. Durch den Austausch intermediärer Bosonen ‚spüren‘ (generalisierte) Ladungsträger Kräfte.

Fundamentale Materie- und Kräfte-Teilchen

Details Kräfte-Teilchen



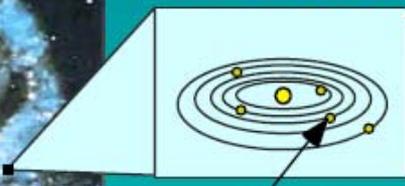
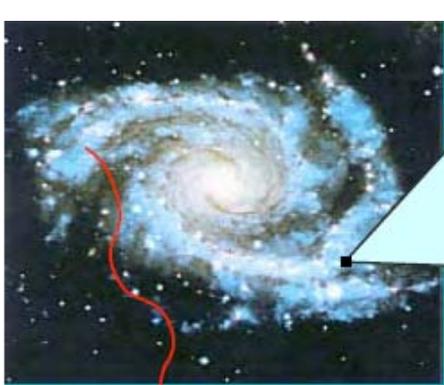
„Elektroschwache Kraft“ (s.w.u.)

„Vereinheitlichung“ der Kräfte (Unification)

A vibrant, multi-colored nebula with a bright central star, set against a dark cosmic background with other galaxies and a comet.

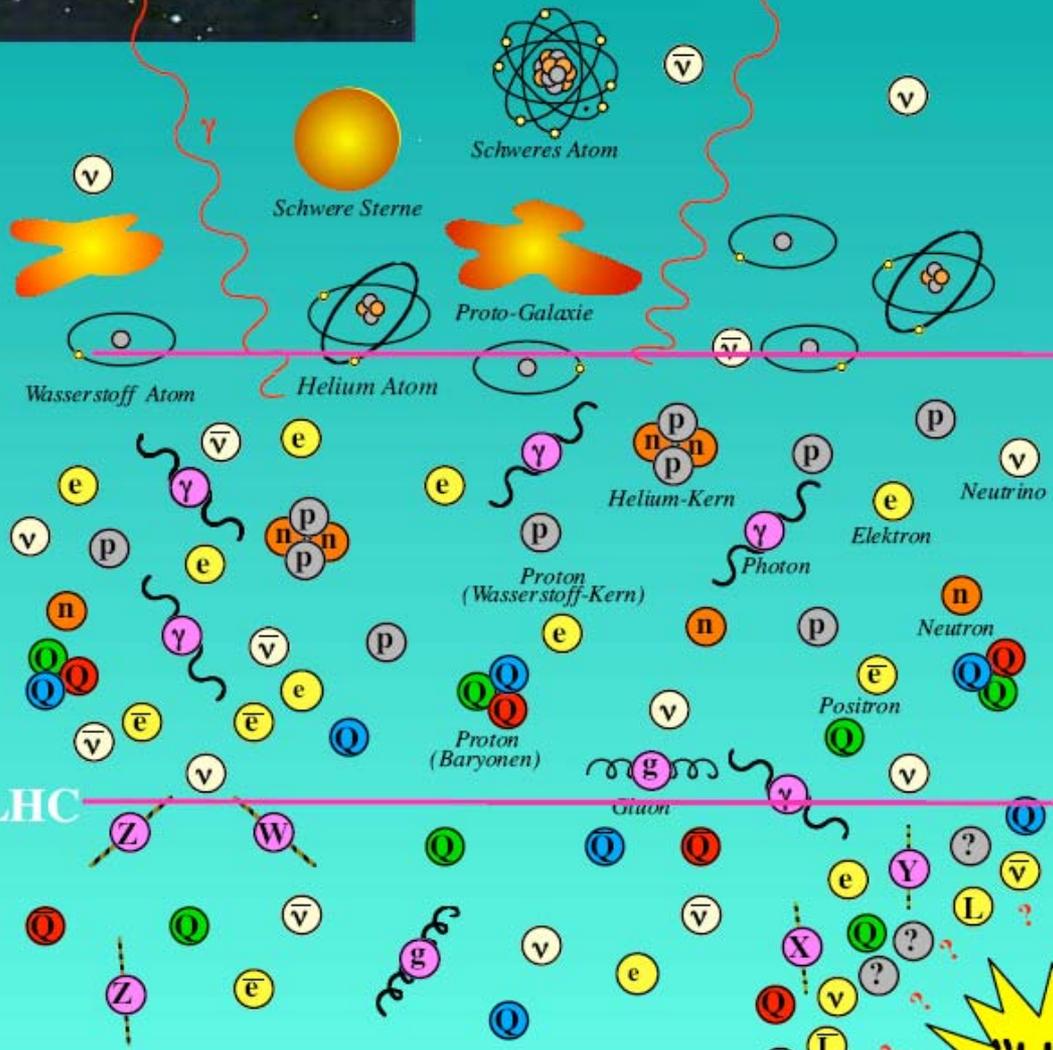
Was haben diese Überlegungen mit dem
Universum zu tun?

Das expandierende Universum



Wir sind hier

Zeit



Temperatur	Alter
2.7 K	13.7 Milliarden Jahre

GEGENWART

erste Supernovae

Entstehung von Sternen und Galaxien

11 K	1 Milliarde Jahre
------	-------------------

UNIVERSUM WIRD TRANSPARENT

Bildung von Atomen.
Entkopplung von Strahlung und Materie.

1.000 K	300 000 Jahre
---------	---------------

Nukleosynthese von Helium
Positronen verschwinden

$10^{10} K$	1 sec.
-------------	--------

Formation von Protonen und Neutronen
Antiquarks verschwinden

$10^{15} K$	$10^{-10} sec$
-------------	----------------

Asymmetry $Q - Q \bar{L} - L$
Inflation

$10^{27} K$	$10^{-34} sec$
-------------	----------------

GROSSE VEREINHEITLICHUNG

$10^{31} K$	$10^{-43} sec$
-------------	----------------

QUANTEN-GRAVITATION



Astronomie

Teilchenbeschleuniger

LHC



Vorbemerkungen: Eichsymmetrien

Eichtheorie / Eichsymmetrie

- Unter einer **Eichtheorie** versteht man eine Feldtheorie, die einer *lokalen* Eichsymmetrie genügt.
- Anschaulich bedeutet dies, dass die von der Theorie vorhergesagten Wechselwirkungen sich nicht ändern, wenn eine bestimmte Größe lokal frei gewählt wird. Diese Möglichkeit, eine Größe an jedem Ort unabhängig festzulegen – zu eichen wie einen Maßstab – veranlasste den deutsch-amerikanischen Mathematiker Hermann Weyl in den 1920er Jahren zur Wahl des Namens **Eichinvarianz** bzw. Eichsymmetrie.
- Die moderne Teilchenphysik ist bestrebt das Verhalten der elementaren Teilchen aus möglichst einfachen ersten Prinzipien abzuleiten. Ein nützliches Hilfsmittel ist dabei die Forderung nach einer Gruppe von Transformationen (z. B. Rotationen) der beteiligten Felder, unter der die Dynamik der Teilchen invariant bleibt. Diese *Symmetrie* oder *Eichfreiheit* hilft so bei der Konstruktion der gesuchten Theorie.

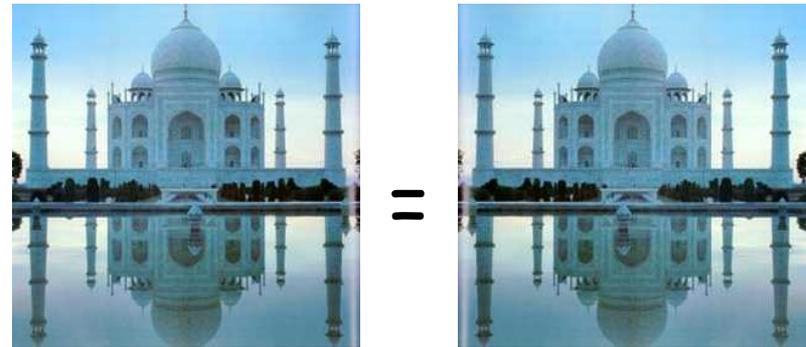
Was ist Symmetrie?

Definition der Symmetrie:

„Nach **(bestimmten)** Änderungen an einem System sieht dieses exakt so aus wie zuvor“

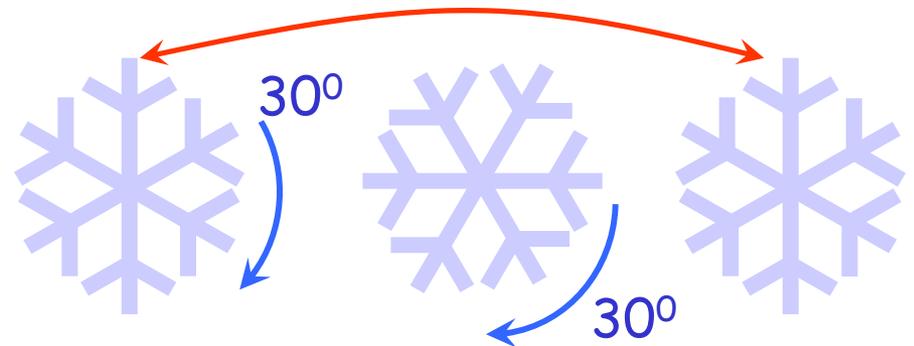
Beispiele:

- Reflexionen (Spiegelsymmetrie)



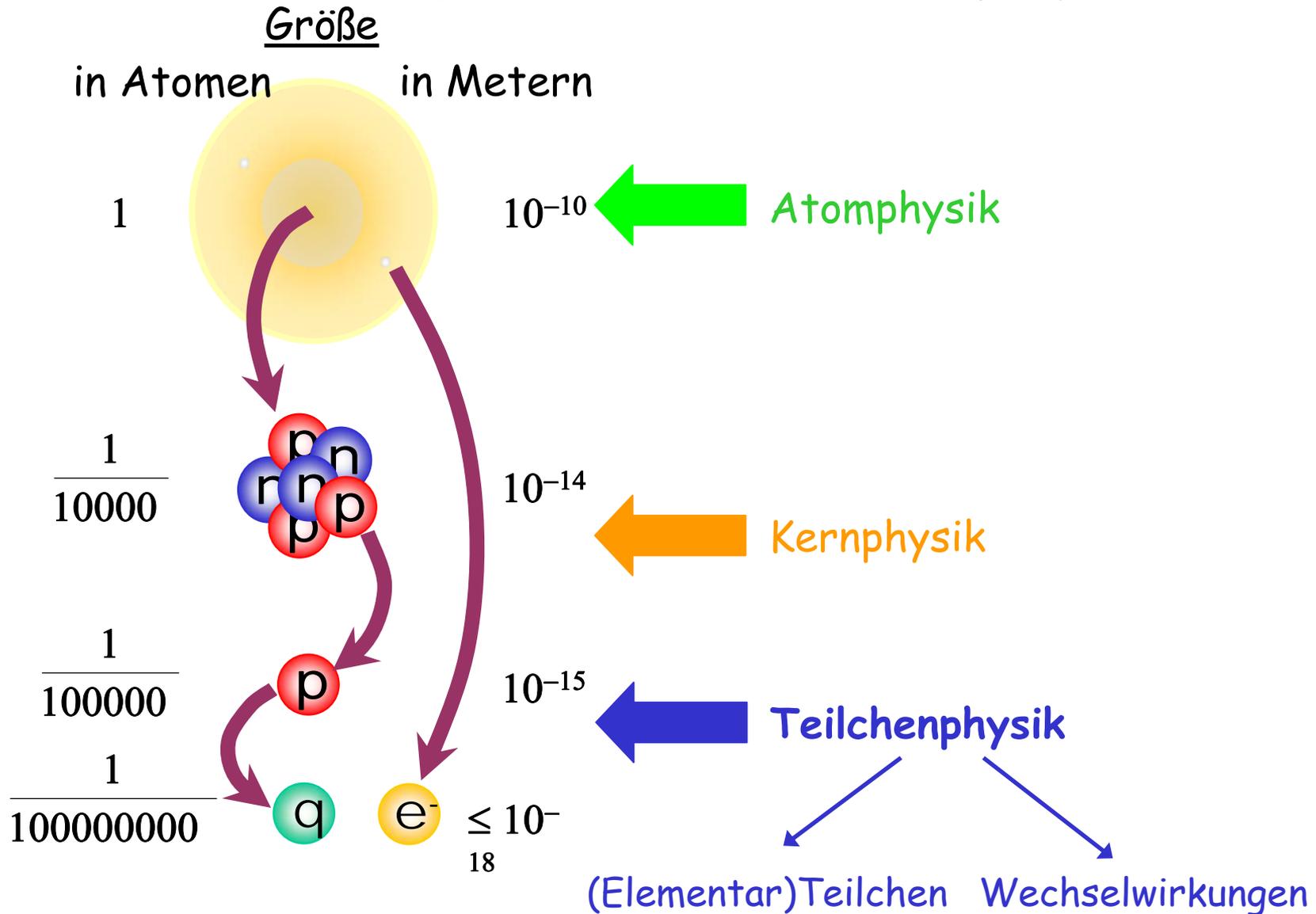
⇒ Taj Mahal: symmetrisch gegenüber Spiegelungen

- Rotationen (Drehungen)



⇒ Schneeflocke: symmetrisch gegenüber Drehungen um 60°

Einführung in die Teilchenphysik



Elementare Bausteine der Materie

Teilchen

Antiteilchen

Leptonen:

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} & \begin{matrix} \text{Ladung} \\ \swarrow \\ \tau^- \end{matrix} & \begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ e^+ \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\mu \\ \mu^+ \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \bar{\nu}_\tau \\ \tau^+ \end{pmatrix}
 \end{array}$$

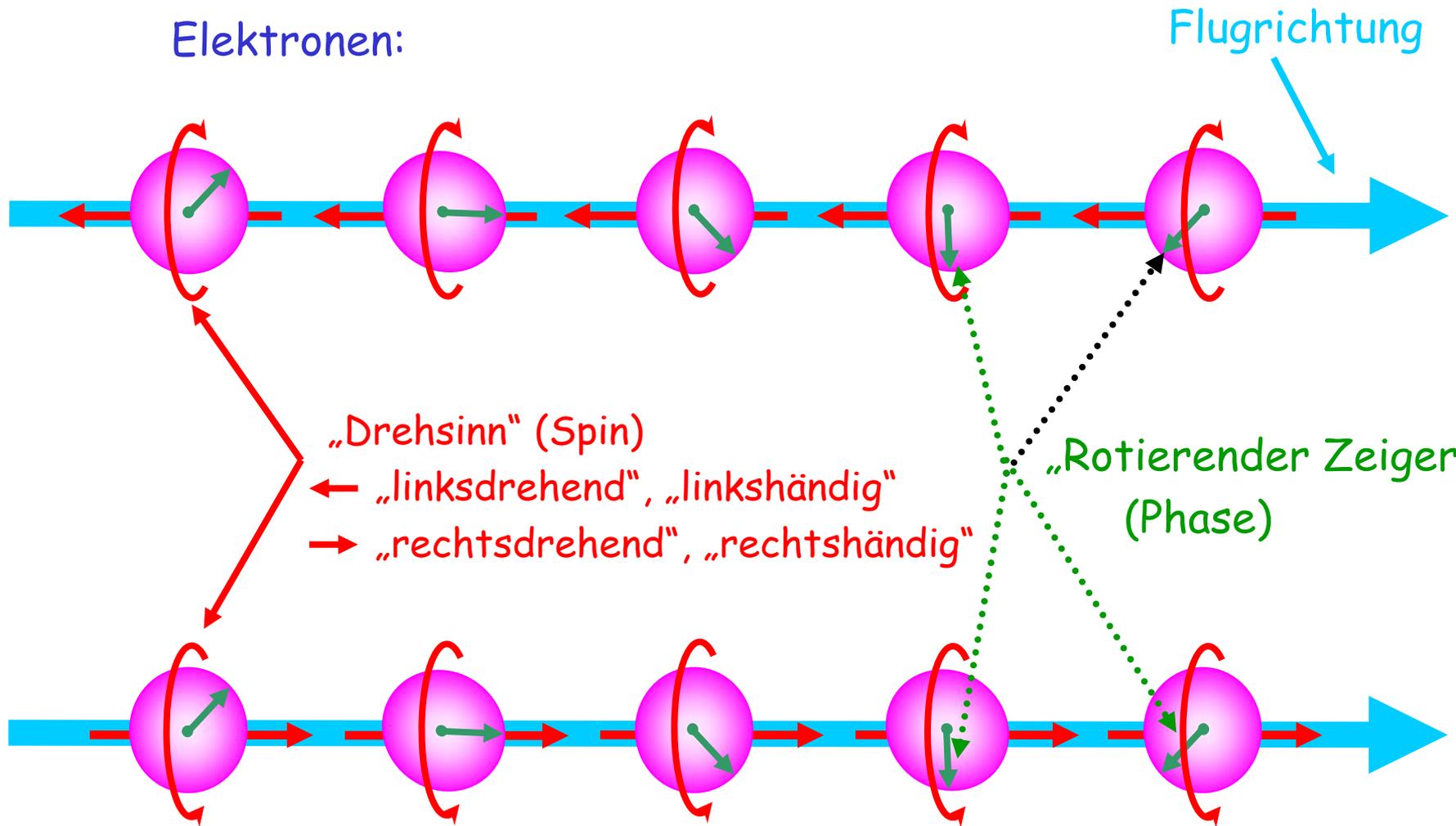
Quarks:

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{pmatrix} u^{2/3} \\ d^{-1/3} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c^{2/3} \\ s^{-1/3} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t^{2/3} \\ b^{-1/3} \end{pmatrix} & & \begin{pmatrix} \bar{u}^{-2/3} \\ \bar{d}^{+1/3} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \bar{c}^{-2/3} \\ \bar{s}^{+1/3} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \bar{t}^{-2/3} \\ \bar{b}^{+1/3} \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Symmetrie:

- Ordnung in **jeweils** 3 Familien (vergl. Periodensystem)
- Zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen
 - mit: gleicher Masse
 - entgegengesetzter Ladung

Weitere Eigenschaften der Teilchen



Wechselwirkungen

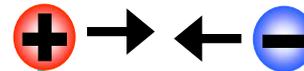
➤ Wechselwirkungen

- Kraftwirkung zwischen Teilchen
- Verantwortlich für Teilchen-Zerfälle und Vernichtungen

➤ Es gibt 4 fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation (Schwerkraft)

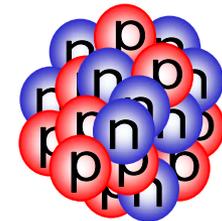
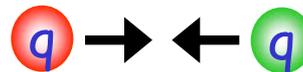
- Elektromagnetismus



- Schwache Wechselwirkung

} Elektroschwache Wechselwirkung

- Starke Wechselwirkung

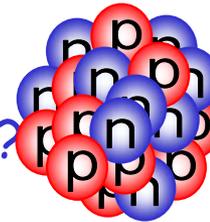


⇒ Ursprung aller bekannten Kräfte!

Wechselwirkungen

Starke Wechselwirkung????? Wofür?

Was hält den Atomkern zusammen?



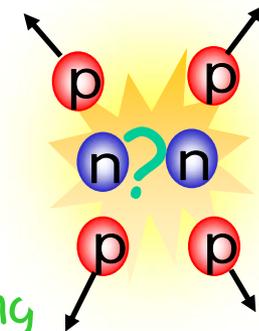
Neutronen: keine Ladung

Protonen: positive Ladung - stoßen sich ab



Es gibt eine weitere Kraft:

- überwindet die elektrische Abstoßung
- wirkt nicht auf Elektronen



⇒starke Wechselwirkung

Wechselwirkung

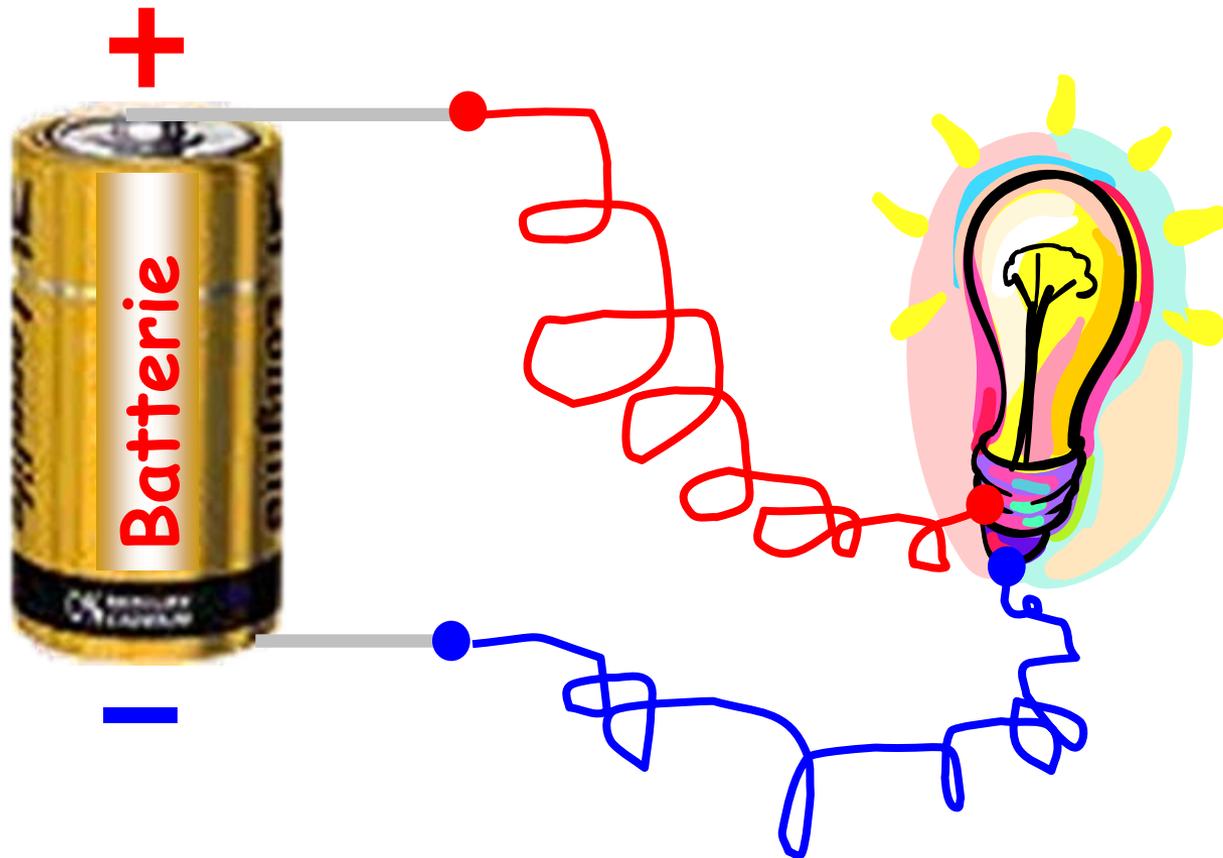


Lokale Eichsymmetrie

(hier: Gravitation wird nicht betrachtet)

Globale Eichsymmetrie

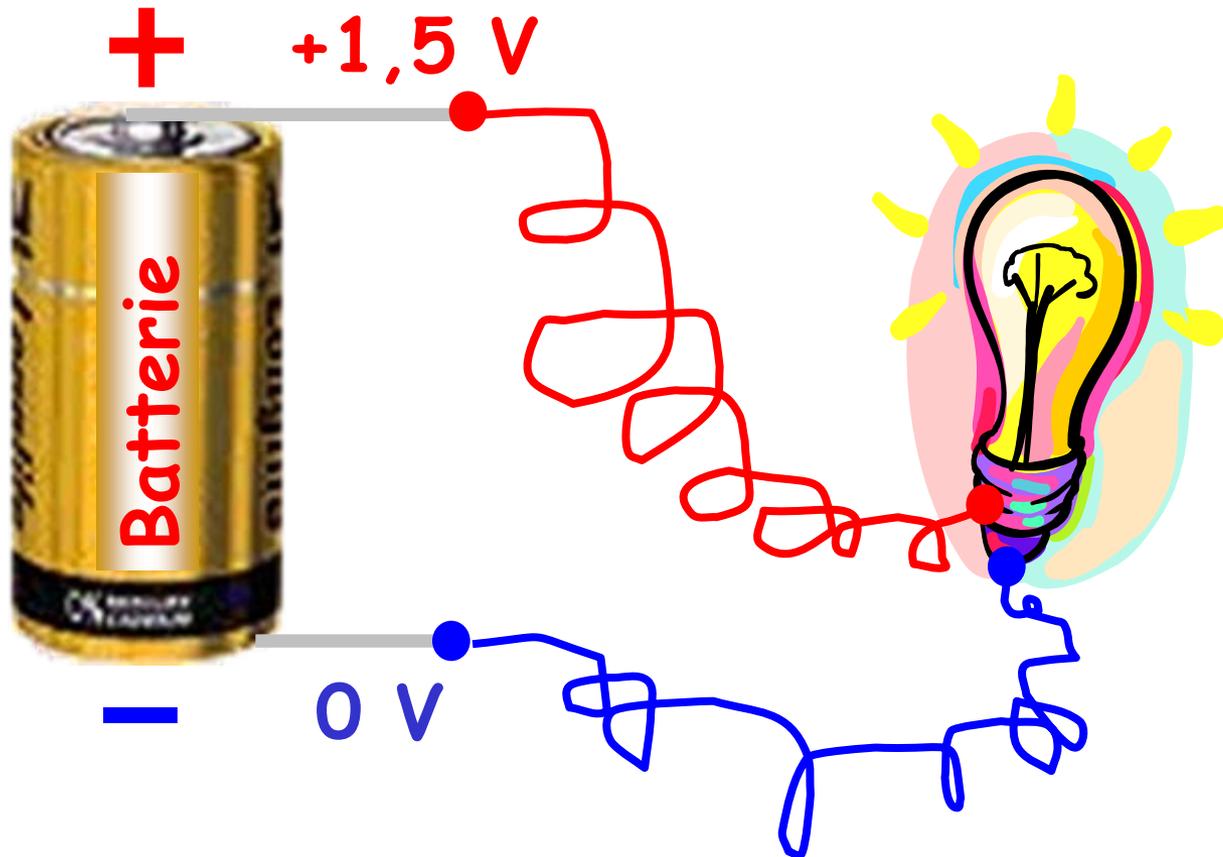
Betrachten: 1,5 Volt Batterie



⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

Globale Eichsymmetrie

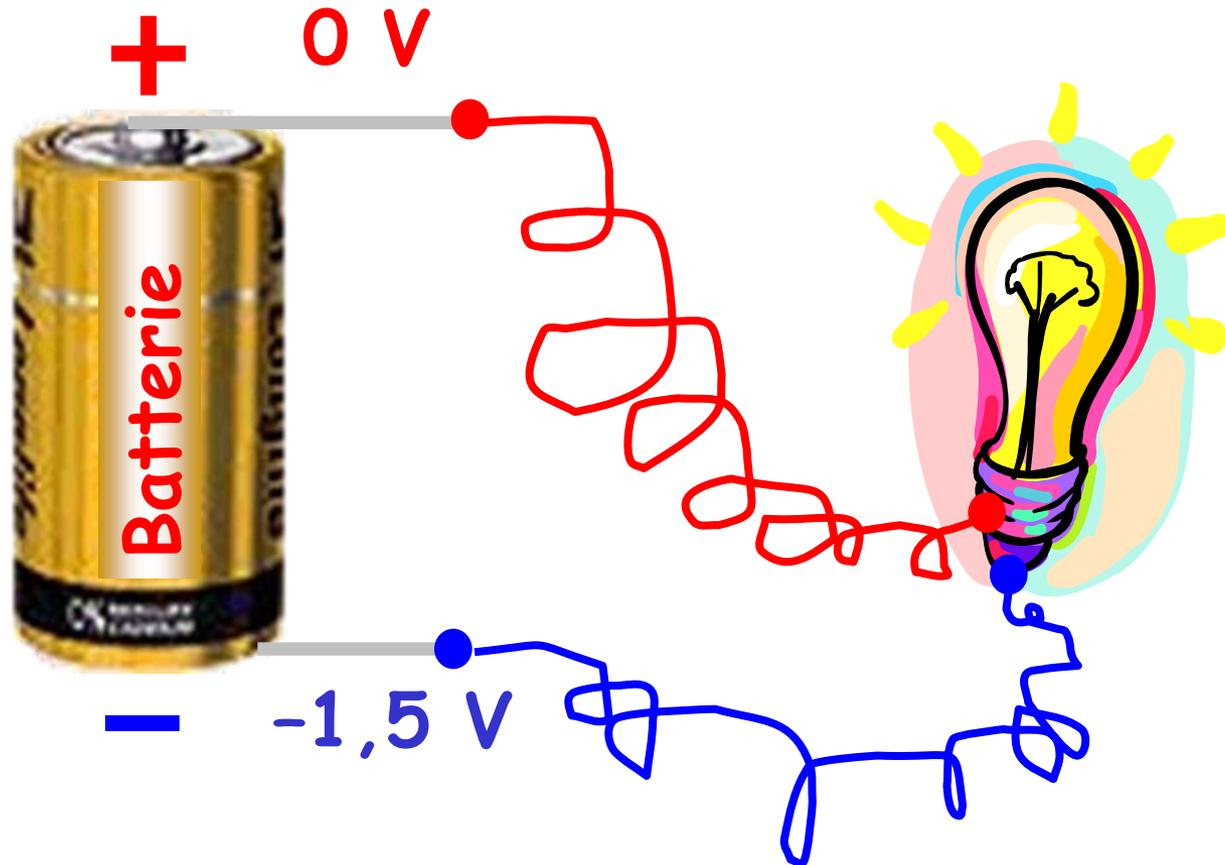
Betrachten: 1,5 Volt Batterie



⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

Globale Eichsymmetrie

Umeichen des Potenzialnullpunktes - gleichartig für + und - Pol !

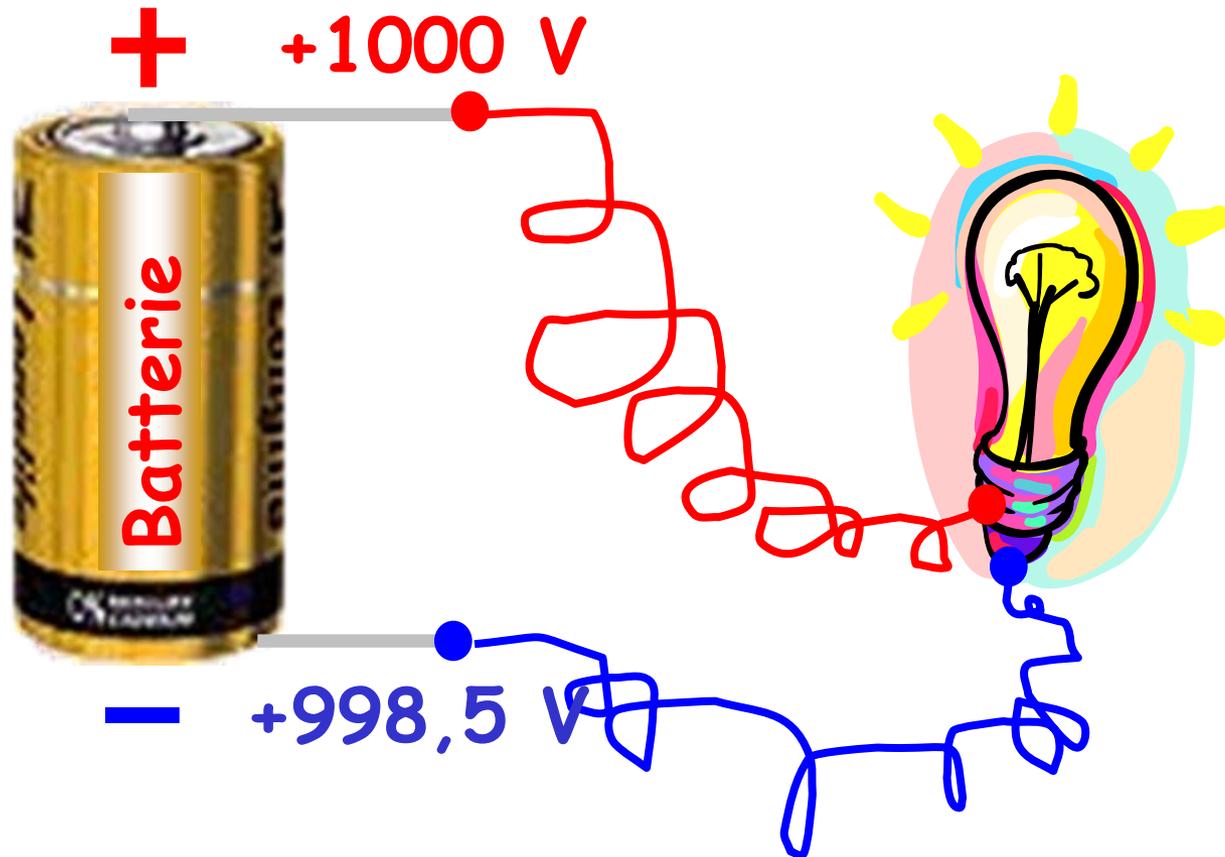


⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

Nichts ist passiert!

Globale Eichsymmetrie

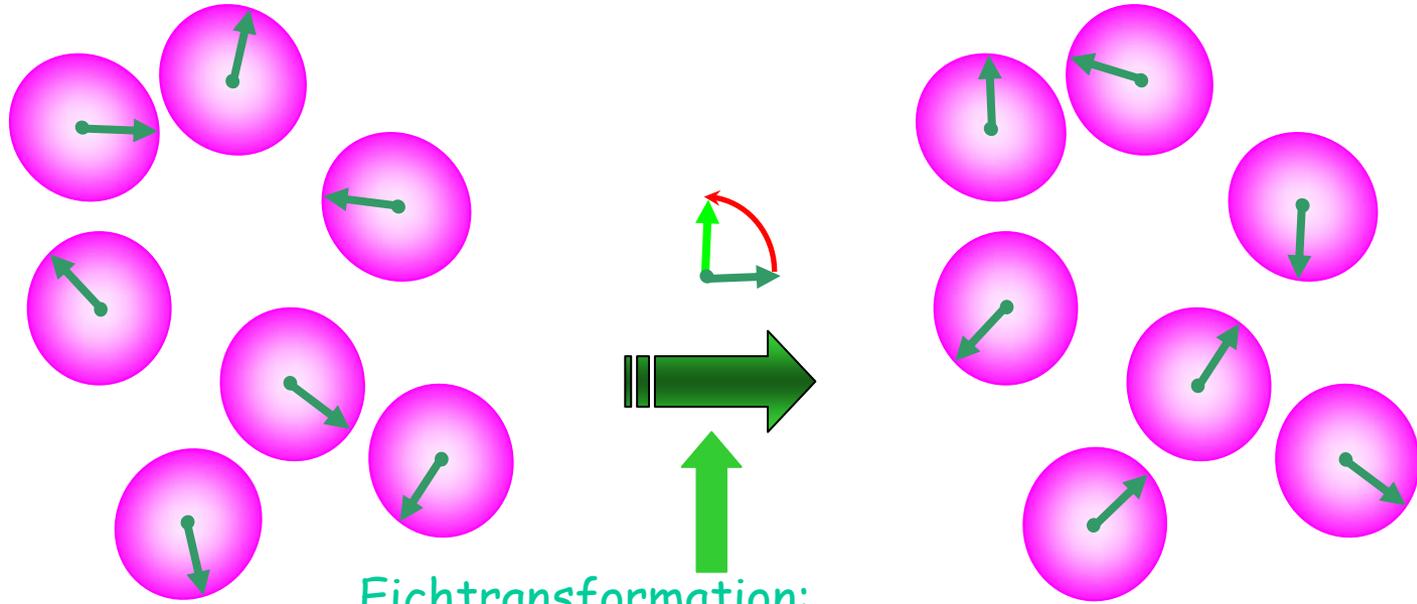
Umeichen des Potenzialnullpunktes - gleichartig für + und - Pol !



⇒ Spannung = Potenzialdifferenz zwischen den Polen : 1,5 V

Nichts ist passiert!

Globale Eichsymmetrie



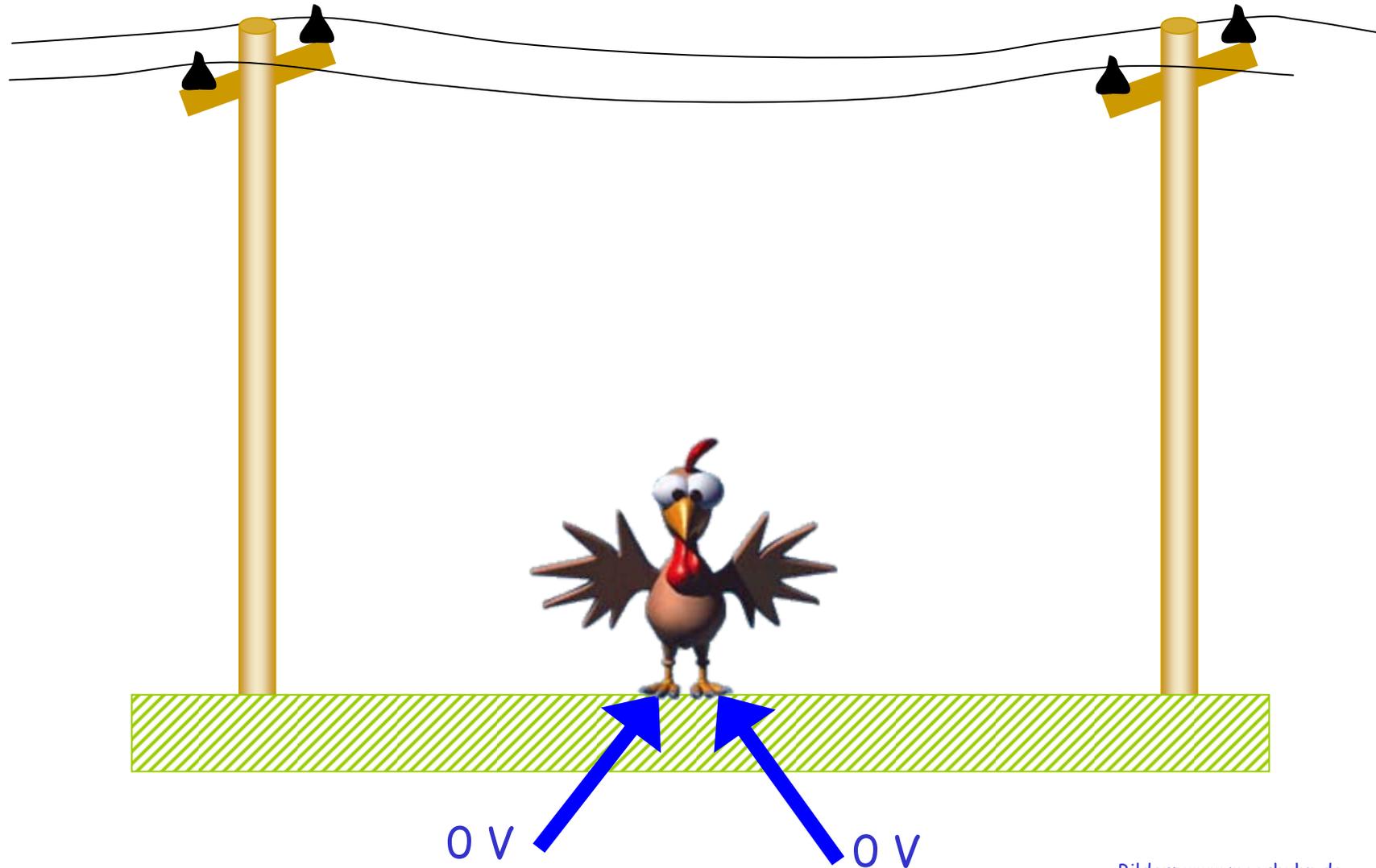
Eichtransformation:

Die Zeiger werden überall um gleichen Winkel gedreht
(Nullpunktverschiebung)

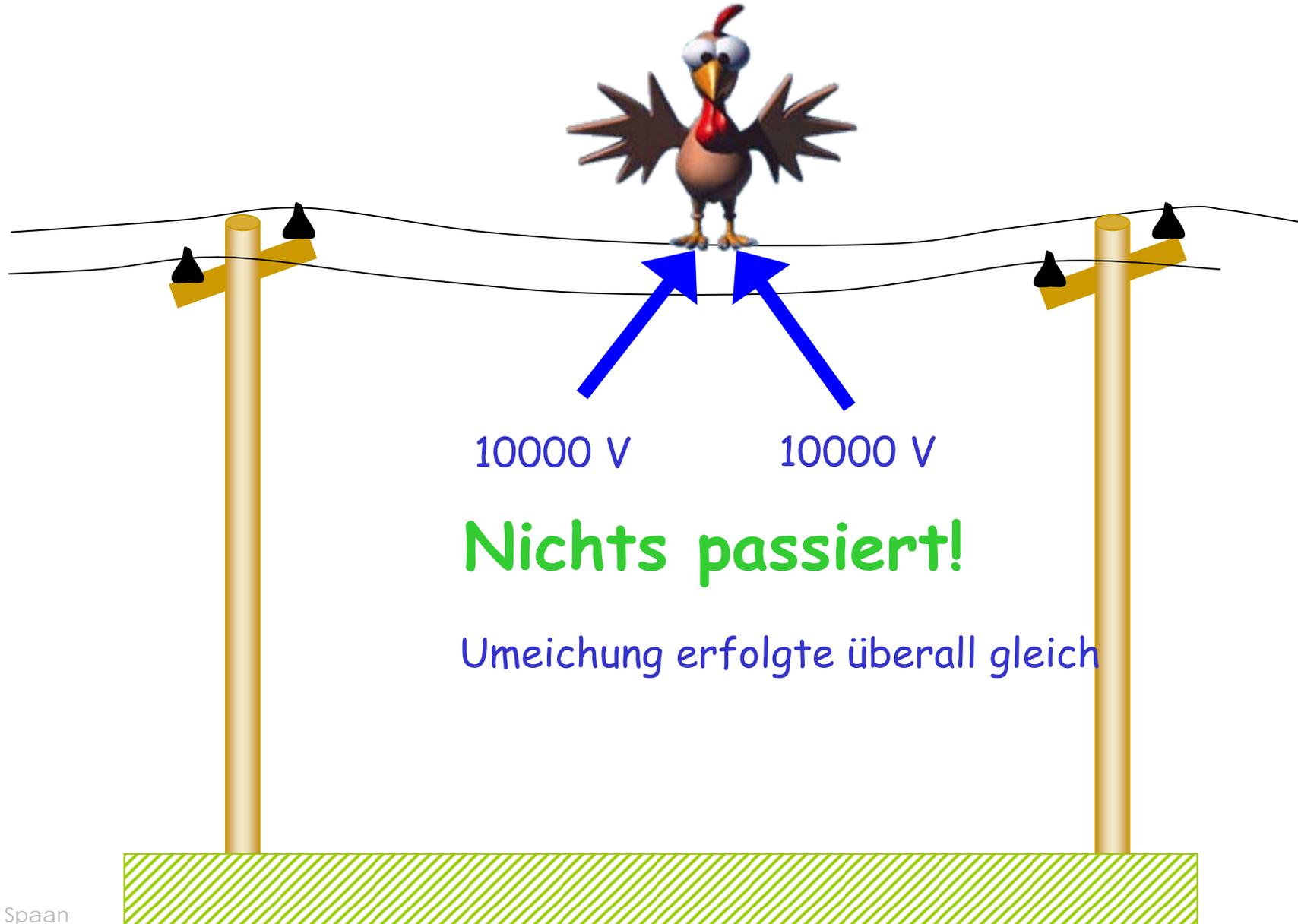
Nichts passiert: Das System ist unabhängig von der Lage
des gemeinsamen Nullpunktes

Elektronen: Zeiger ist verknüpft mit Ladung: **Symmetrie**
Globale Eichsymmetrie \Rightarrow Ladungserhaltung

Globale Eichsymmetrie



Globale Eichsymmetrie



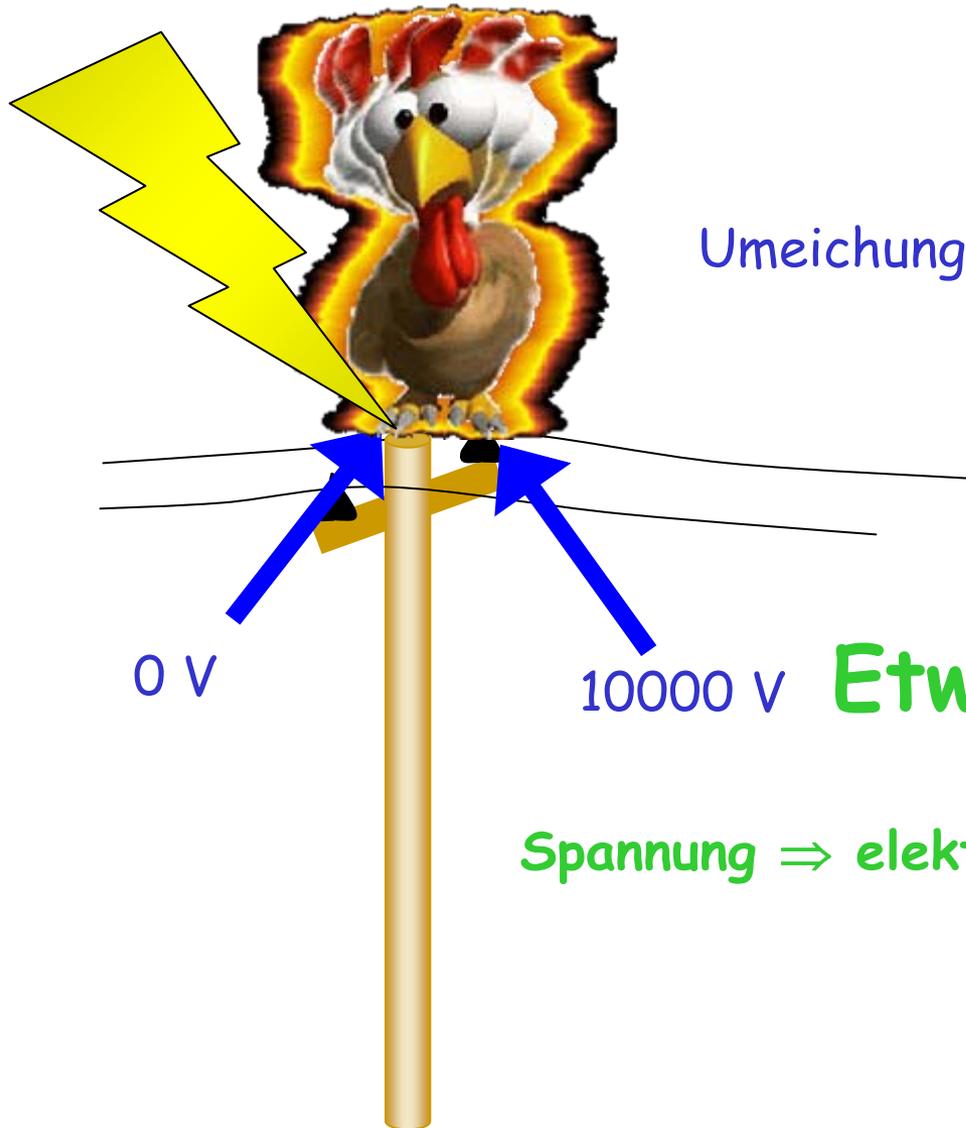
10000 V

10000 V

Nichts passiert!

Umeichung erfolgte überall gleich

Lokale Eichsymmetrie



Umeichung erfolgte überall anders!

0 V

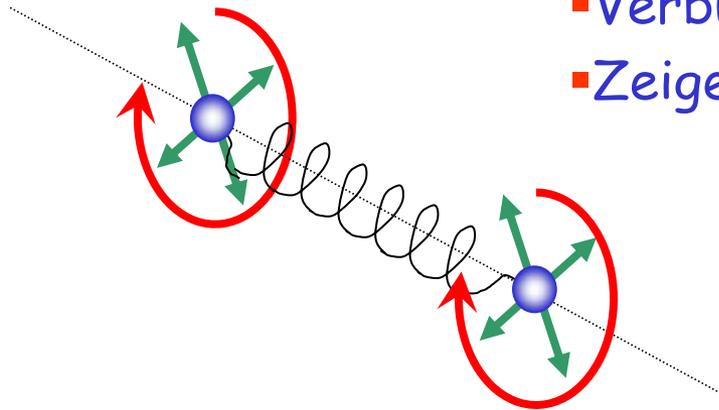
10000 V

Etwas passiert!

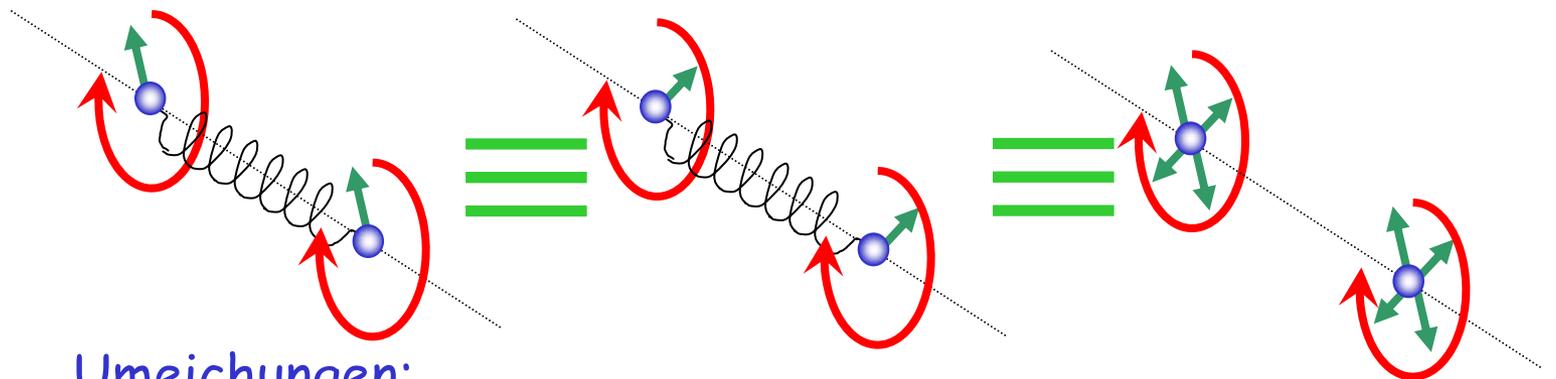
Spannung \Rightarrow elektrisches Feld \Rightarrow Kraft!

Betrachten 2 Elektronen:

- Verbunden mit „gedachter“ Feder“
- Zeiger rotieren senkrecht zur „Achse“



Symmetrie

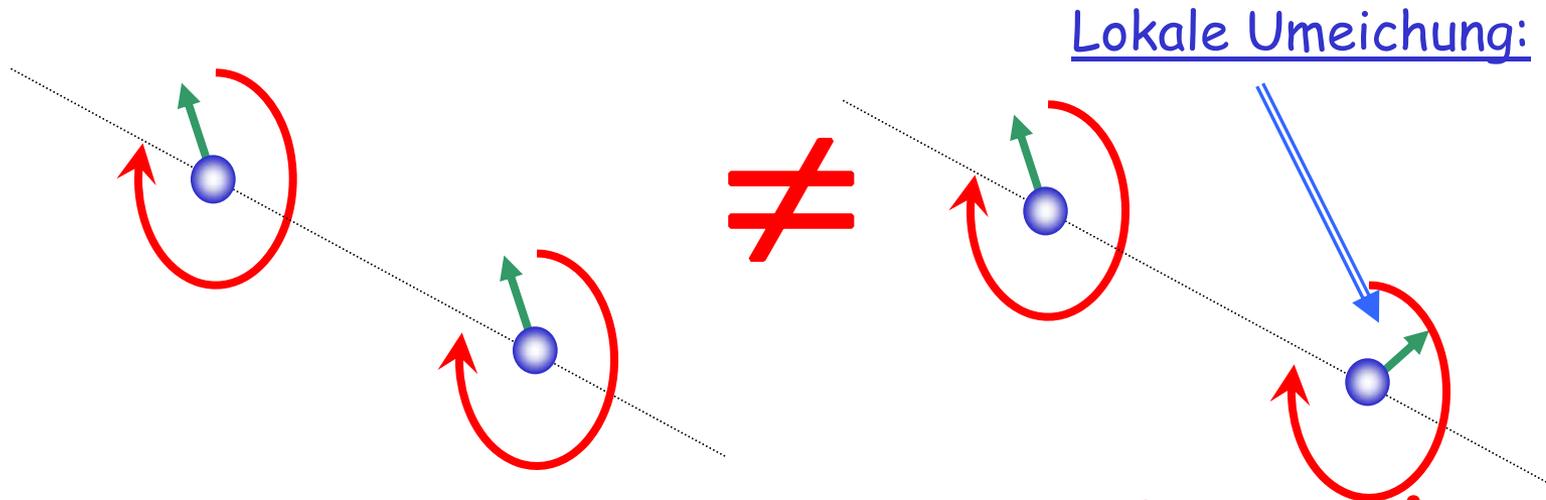


Umeichungen:

Gleichartige Veränderungen aller Zeiger:

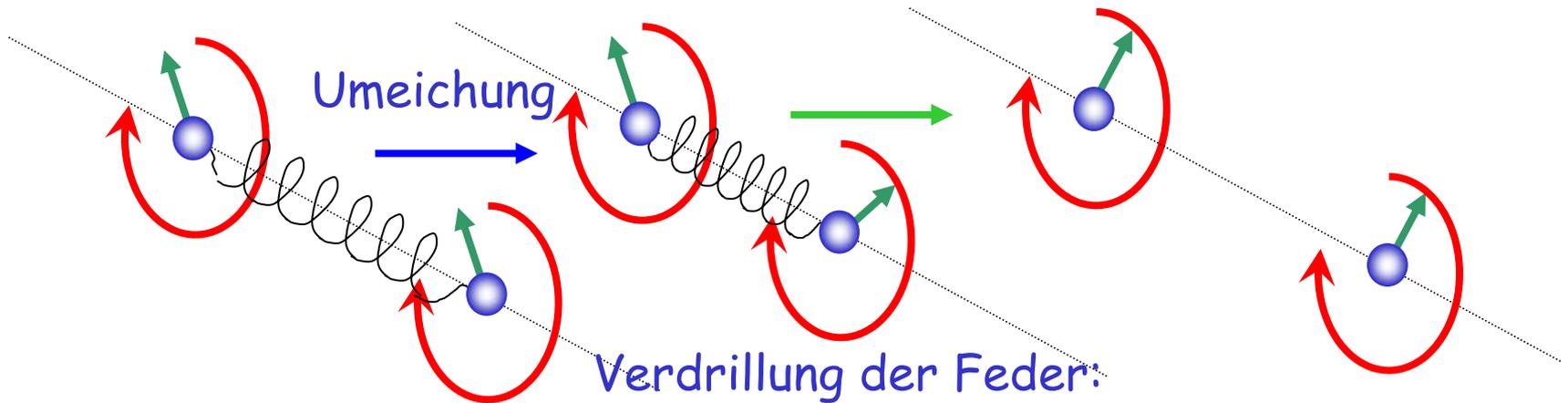
⇒ Keine Kraft auf Feder

⇒ Feder überflüssig



Symmetrie verletzt

Benötigen Feder zur Wiederherstellung der Symmetrie:



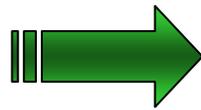
Verdrillung der Feder:

⇒ Es wirkt eine Kraft (anziehend oder abstoßend)

⇒ Wiederherstellung der Symmetrie

Je nach Richtung der Verdrillung sind die Kräfte anziehend oder abstoßend!

⇒ Der Zeiger muss mit der Ladung verknüpft sein!

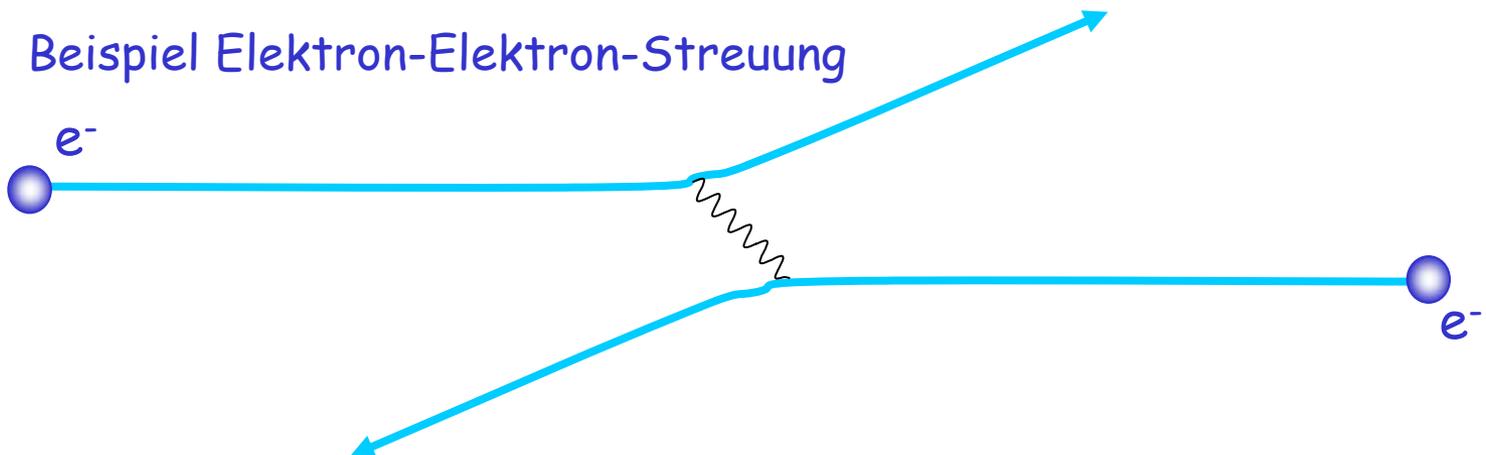


Quantenelektrodynamik (QED)

Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung

Die Rolle der **Feder** wird durch Austauscheteilchen eingenommen!

⇒ Photon (Lichtquant) 



Wechselwirkungen

Ursache aller Wechselwirkungen ist
lokale Eichsymmetrie

Für jede der Wechselwirkungen ist eine entsprechende
Symmetrie gefunden worden (QED: Zeiger)

⇒ Zu jeder Symmetrie (Wechselwirkung) existieren
Austauschteilchen:

1. Elektroschwache Wechselwirkung:

⇒ Photon (QED) (masselos)

⇒ Z^0 , W^+ , W^- (sehr schwer, ca. $90 \cdot m_p$)

2. Starke Wechselwirkung:

⇒ 8 verschiedene Gluonen (masselos)

Ausblick

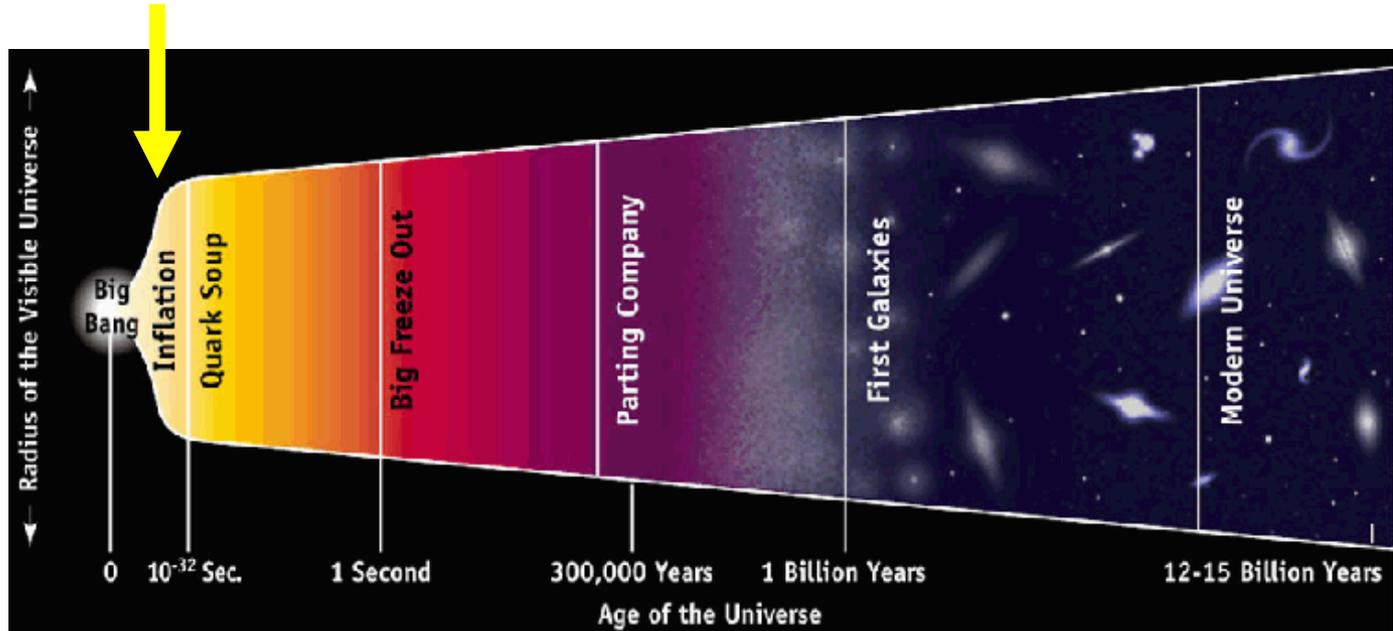
Frage: Gibt es eine gemeinsame Symmetrie für alle Wechselwirkungen?

⇒ Vereinheitlichung der Wechselwirkungen?

Ein erster Erfolg war die Vereinheitlichung von **elektromagnetischer** und **schwacher** Wechselwirkung zur **elektroschwachen** Wechselwirkung.

⇒ „Große“ Vereinheitlichung bei sehr hohen Energien?

⇒ Frühzeit des Universums





Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

Standardmodell

Theoretische Basis

Das S. ist eine Sammlung von verknüpften **Eichtheorien**,
d.h. Quanten-Feldtheorien, die lokale Eichinvarianz besitzen:

ELECTROMAGNETISM: **QUANTUM ELECTRODYNAMICS (QED)**

1948 Feynman, Schwinger, Tomonaga (1965 Nobel Prize)

ELECTROMAGNETISM: **ELECTROWEAK UNIFICATION**

+WEAK

1968 Glashow, Weinberg, Salam (1979 Nobel Prize)

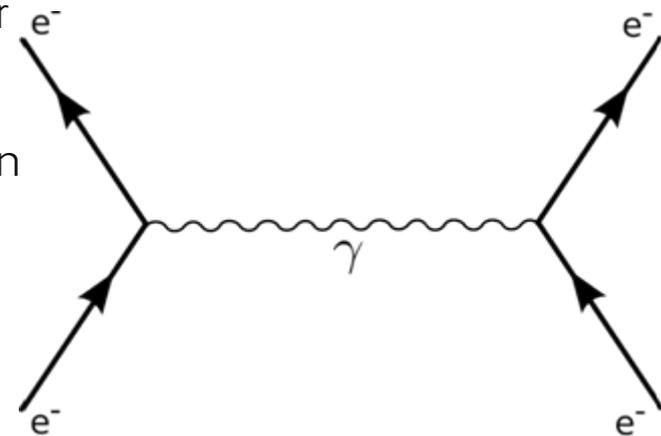
STRONG:

QUANTUM CHROMODYNAMICS (QCD)

1974 Politzer, Wilczek, Gross (2004 Nobel Prize)

Feynman-Diagramme

- **Feynman-Diagramme** (nach Richard Feynman) stellen in der Teilchenphysik und der Festkörperphysik die quantenfeldtheoretischen Beiträge zu Streuvorgängen bildlich dar und veranschaulichen und erleichtern so ihre Berechnung.
- Feynman-Diagramme haben äußere Linien, die in Wechselwirkungspunkte ein- oder auslaufen, und innere Linien, die Paare von Wechselwirkungspunkten verbinden. Den äußeren Linien entsprechen ein- und auslaufende Teilchen. Die inneren Linien nennt man Propagatoren und deutet sie als virtuelle Teilchen. Die Wechselwirkungspunkte, an denen Linien zusammentreffen, heißen auch Vertizes. An ihnen können Teilchen erzeugt, vernichtet oder gestreut werden.
- Geladene Teilchen kennzeichnet man durch Pfeile in Zeitrichtung, Antiteilchen durch Pfeile in Gegenrichtung. Die Pfeile geben also den Ladungsfluss an. Ungeladene Teilchen, die ihre eigenen Antiteilchen sind, wie zum Beispiel Photonen, haben keine Pfeile.



Standardmodell

Quanten-Elektrodynamik (QED) (I)

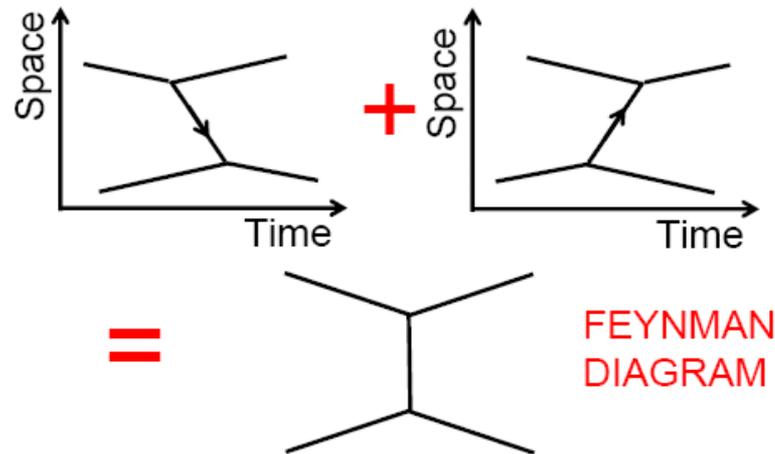
QED ist die Quantentheorie
der **elektromagnetischen Wechselwirkung**:

Kraft vermittelt durch masselose Photonen

Photon koppelt an elektrische Ladung (erhaltene QZ)

Stärke der Wechselwirkung α

The sum of all time orderings are represented by **FEYNMAN DIAGRAMS**



Standardmodell

Quanten-Elektrodynamik (QED) (II)

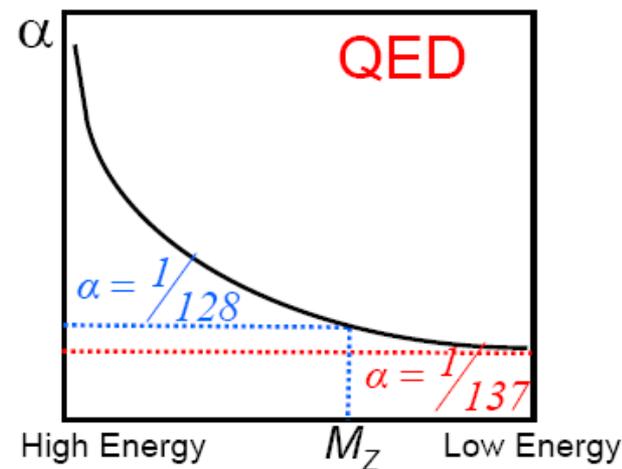
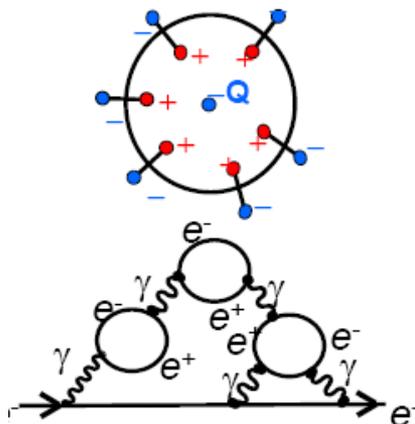
Kopplungskonstante $\alpha = e^2/4\pi \sim 1/137$ beschreibt die Stärke der WW zwischen el. Ladung und Photon; sie ist **keine Konstante**:

Vakuum verhält sich wie dielektrisches Medium

Quantenfluktuationen: Virtuelle e^+e^- Paare sind polarisiert

In großen Abständen (kleinen Energien) ist die Ladung abgeschirmt

Bei kleinen Abständen (hohen Energien) ist die effektive Ladung größer



Kopplungskonstante

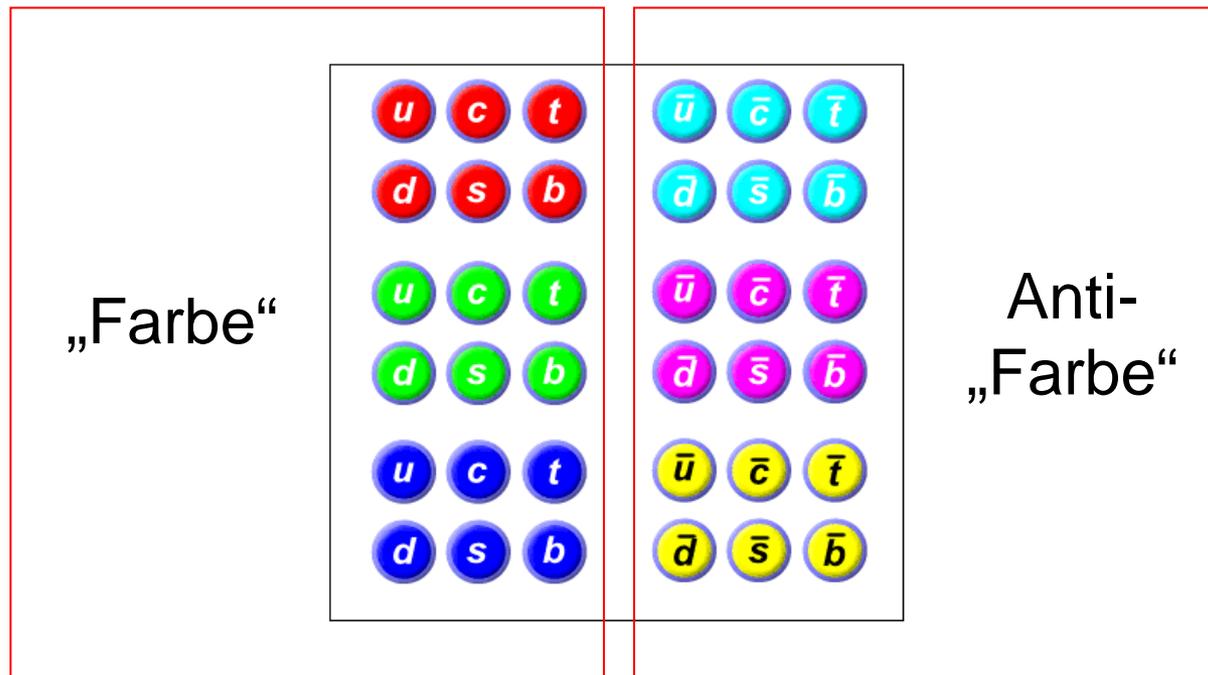
- In der Quantenfeldtheorie ist ein Elektron nicht nur ein '**nacktes**' Elektron, sondern ist von einer Wolke von virtuellen Teilchen (Photonen und Elektron-Positron-Paare, bei höheren Energien auch andere Fermion-Antifermion-Paare) umgeben (**Vakuumpolarisation**), die es ständig emittiert und wieder absorbiert. Diese schirmen die negative Ladung des nackten Elektrons ab: in unmittelbarer Nähe der nackten Ladung werden die Elektron-Positron-Paare polarisiert, d.h. die virtuellen Positronen werden angezogen und die virtuellen Elektronen abgestoßen. Die nackte Ladung wird dadurch zum Teil kompensiert und in größerer Entfernung mißt man nur noch die Differenz zwischen der nackten Ladung und der Gesamtladung der virtuellen Positronen (bzw. Antileptonen, u -, d -, s -, c -, b - und t -Quarks je nach Energie). Die Messung der Testladung hängt also vom Abstand ab. Wenn man sich dem Elektron nähert, durchdringt man die Positronwolke, die die Elektronladung abschirmt.

Standardmodell

Quanten-Chromodynamik (QCD) (I)

QCD ist die Quantentheorie der **starken Wechselwirkung**:

Kraft vermittelt durch masselose Gluonen
Gluon koppelt an „starke“ Ladung (nur Quarks)
[Ladung der QCD nennt man „Farbe“ (Colour)]
Stärke der Wechselwirkung $\alpha_s \sim 1$

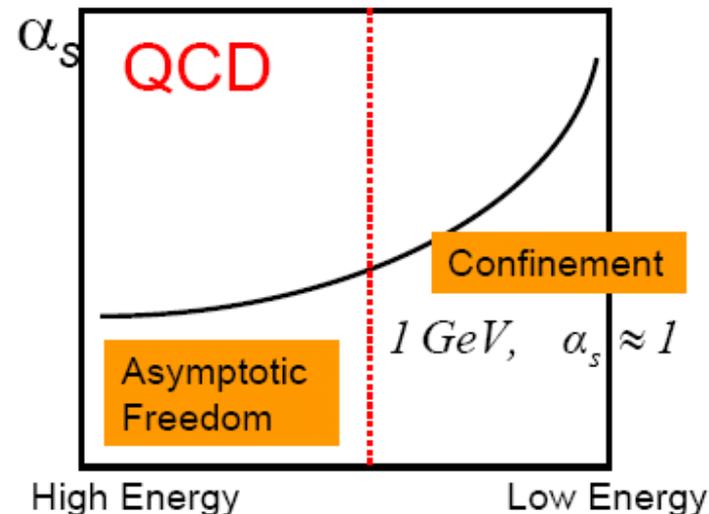
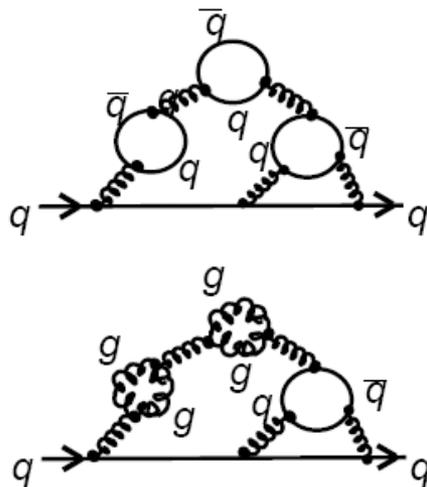


Standardmodell

Quanten-Chromodynamik (QCD) (II)

Kopplungskonstante $\alpha_s \sim 1$ beschreibt die Stärke der starken WW; auch sie ist **keine Konstante**:

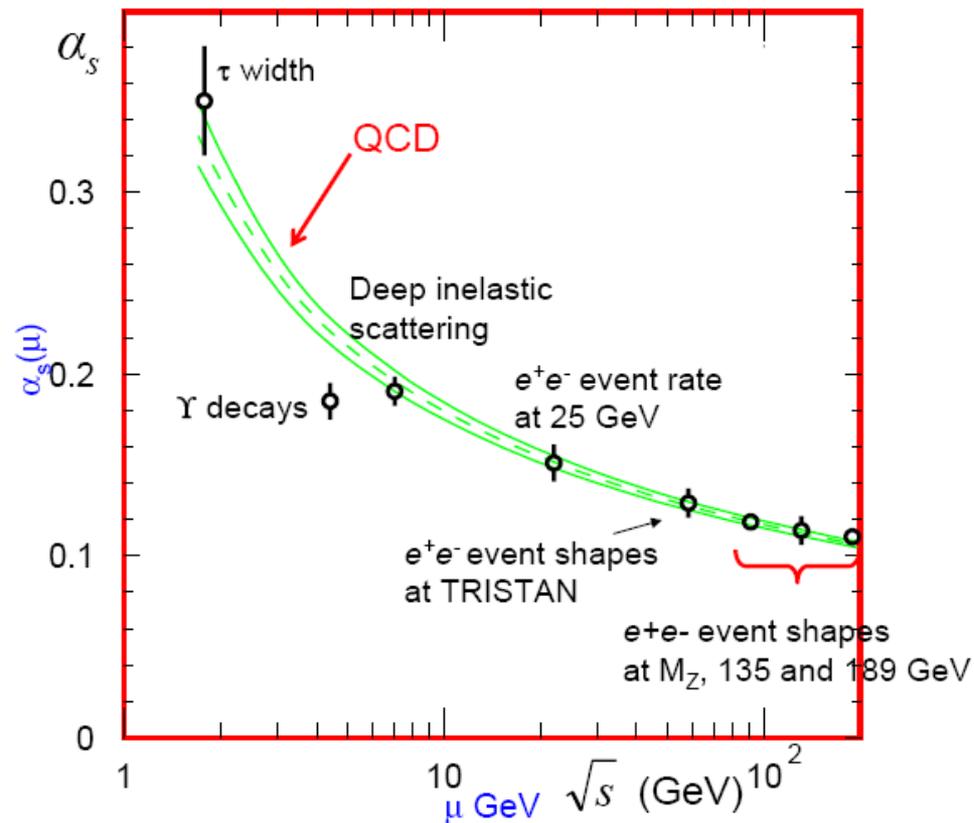
In der QCD führen Quantenfluktuationen zu einer Wolke von virtuellen Quark-Antiquark Paaren
Wegen der Selbstwechselwirkung der Gluonen gibt es zusätzlich auch eine Wolke von virtuellen Gluonen



Standardmodell

Quanten-Chromodynamik (QCD) (III)

Laufende Kopplungskonstante α_s



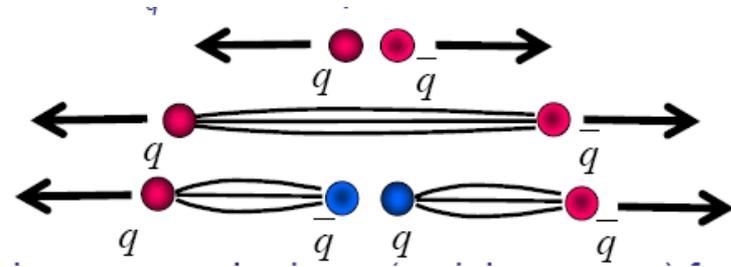
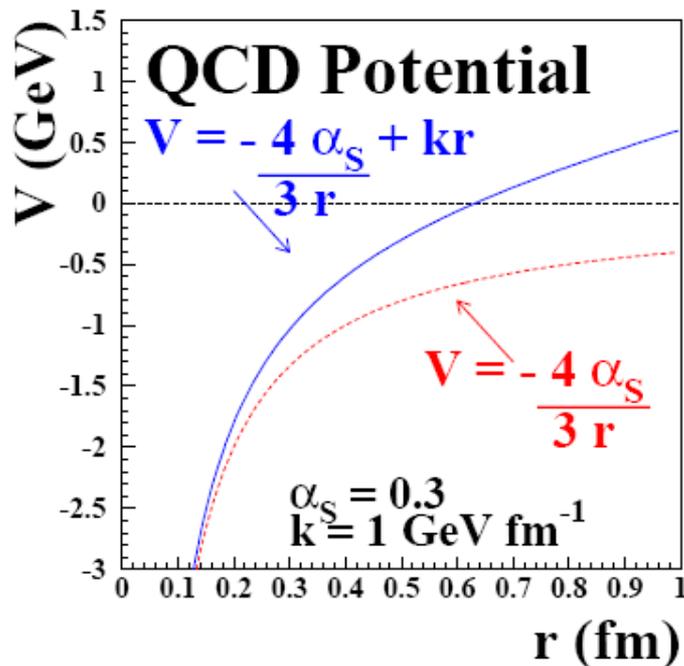
Standardmodell

Quanten-Chromodynamik (QCD) (IV)

QCD Potential hat 2 Komponenten:

Kurzreichweitiger, Coulomb-artiger Term: $- \frac{4}{3} \alpha_s / r$

Langreichweitiger linearer Term: $+ kr$ (Confinement)



Für **Charmonium** ($c\bar{c}$) ist mit $\alpha_s = 0.2$ und $k = 1 \text{ GeV fm}^{-1}$ eine gute Beschreibung der experimentell beobachteten Massenzustände möglich

Standardmodell

Elektroschwache Wechselwirkung (I)

Im Standardmodell sind die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung zur **elektroschwachen WW vereinigt**:

Stärken der elektromagnetischen und der schwachen WW nahezu gleich
Unterschied erwächst aus dem großen Massenunterschied der Austauschteilchen

Interaction	Weak	Electro-magnetic
Electroweak		
Strength for:		
2 quarks { at 10^{-18} m	0.8	1
at 3×10^{-17} m	10^{-4}	1
(relative to e/m)		

Standardmodell

Elektroschwache Wechselwirkung (GWS) (II)

Glashow, **Weinberg** und **Salam** betrachten elektromagnetische und schwache WW als unterschiedliche Manifestierung einer gemeinsamen Kraft:

Ansatz etwas „ad hoc“

Theorie macht konkrete (testbare) Vorhersagen:

Schwache Kopplungskonstante: $e = g \sin \theta_w$

Masse des Z^0 Boson: $M(Z^0) = M(W)/\cos \theta_w$

Nur 3 freie Parameter: α , G_F und $\sin \theta_w$

– bisher **keine Abweichungen** (interne Konsistenz!)

α_{em}

$$G_F = (1.16632 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

$$M_W = (80.423 \pm 0.038) \text{ GeV}$$

$$M_{Z^0} = (91.1875 \pm 0.0021) \text{ GeV}$$

$$\sin^2 \theta_w = 0.23143 \pm 0.00015$$

Standardmodell

Elektroschwache Wechselwirkung (GWS) (III)

Experimentelle Evidenz für GWS:

Neutrale schwache Ströme

Direkter Nachweis der W- und Z-Bosonen

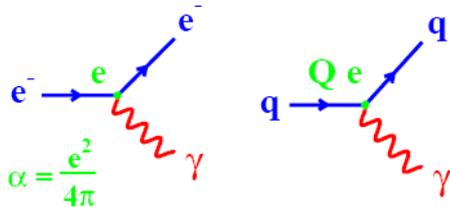
Präzisionsmessungen, z.B des schwachen Mischungswinkels:
unterschiedliche Messungen liefern gleichen Wert für θ_w :

$$\sin^2 \vartheta_w = 0.23113 \pm 0.00015 \quad \vartheta_w \approx 29^\circ$$

Standardmodell

Zusammenfassung der Wechselwirkungen (II)

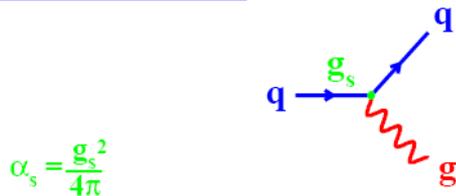
ELECTROMAGNETIC (QED)



Couples to **CHARGE**

Does **NOT** change
FLAVOUR

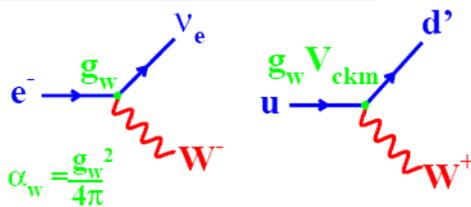
STRONG (QCD)



Couples to **COLOUR**

Does **NOT** change
FLAVOUR

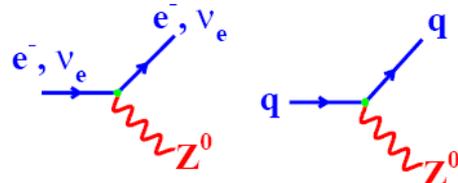
WEAK Charged Current



Changes **FLAVOUR**

For **QUARKS**: coupling
BETWEEN generations

WEAK Neutral Current



Does **NOT** change
FLAVOUR

Quark	Q	g_V	g_A
u, c, t	$+2/3$	$+1 - 8/3 \sin^2 \theta_W$	-1
d, s, b	$-1/3$	$-1 + 4/3 \sin^2 \theta_W$	$+1$

TABLE 1.2: Electromagnetic and Weak charges for the quarks.

Quark	Q	g_V	g_A
u, c, t	$+2/3$	$+1 - 8/3 \sin^2 \theta_W$	-1
d, s, b	$-1/3$	$-1 + 4/3 \sin^2 \theta_W$	$+1$

TABLE 1.2: Electromagnetic and Weak charges for the quarks.



Probleme des Standardmodells der Elementarteilchenphysik

Feynman: „Das Standardmodell ist zu gut um falsch zu sein.“

Probleme des Standardmodells

- SM hat eine große Zahl (19) freier Parameter: Massen, Mischungswinkel, Kopplungskonstanten
- Starke und elektroschwache Kraft sind nur formal vereinigt.
Warum ist $SU(3)_{\text{Farbe}} \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ die relevante Eichgruppe?
Warum sind die Eichkopplungen so verschieden?
Weinbergwinkel muss experimentell bestimmt werden.
- Gravitation ist im SM nicht enthalten
- Mechanismus der elektroschwachen Symmetriebrechung ist unbekannt
- Anzahl der Generationen und Flavormischung ist willkürlich.
- Ursache der Massenhierarchie ist unklar:
Yukawa-Kopplungen des Higgsmechanismus verschieben das Problem nur.

Lösungsschemata

Neue Felder mit
gleichen Wechselwirkungen.



GUT, SUSY, Stringtheorie

Neue Felder mit neuen
Wechselwirkungen



Compositeness,
Technicolour

Hier: nur Diskussion von GUT und SUSY

Erweiterungen müssen SM als Spezialfall beinhalten.

Grand Unified Theory

- Im Standardmodell gibt es nun also **drei Symmetriegruppen für drei Wechselwirkungen**
- Die GUT versucht nun **alle drei Gruppen zu einer zusammenzufassen**
- Man erwartet dann auch nur noch **eine Wechselwirkung**
- Es ergibt sich, dass die kleinstmögliche Gruppe die $SU(5)$ ist.

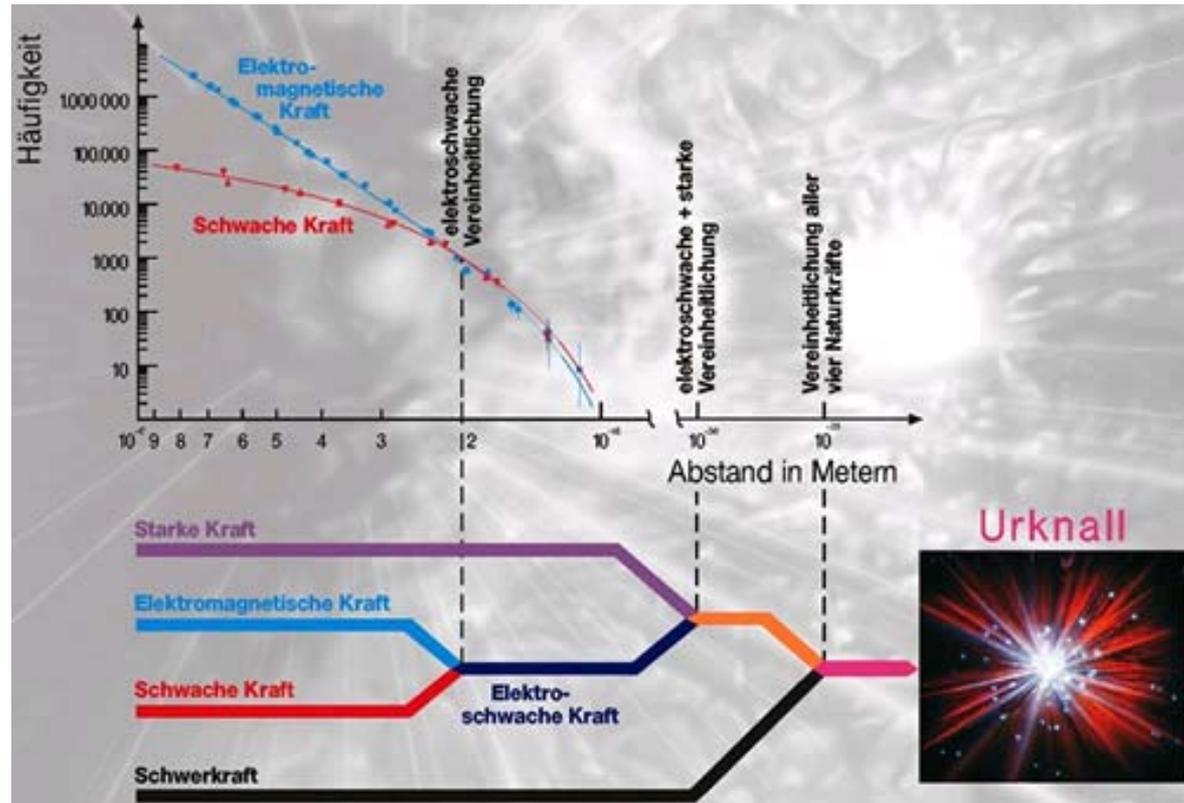
Kein Unterschied mehr zwischen Quarks und Leptonen!



GUT = Grand Unified Theory

Standardmodell

Elektroschwache Wechselwirkung (GWS) (IV)



„Vereinheitlichung“ der Kräfte (Unification)



GUT – Konsequenz:
Protonenzerfall

GUT: Protonenzerfall

- Der **Protonenzerfall** wird von einigen Varianten der Großen Vereinheitlichten Theorie (GUT) der Teilchenphysik vorhergesagt. Dort geht man davon aus, dass ein freies Proton nicht stabil ist, sondern lediglich eine sehr große Halbwertszeit hat. Es sind zahlreiche Arten eines solchen im Standardmodell verbotenen Zerfalls denkbar, ein mögliches Beispiel ist der durch ein hypothetisches X-Boson vermittelte Zerfall in ein Positron e^+ und ein neutrales Pion π^0 , das dann weiter auf bekanntem Weg zu Strahlung (Photonen γ) zerfällt:
 - $p \rightarrow e^+\pi^0$
 - $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
- Da das Positron ein Antilepton ist, bleibt hierbei die Differenz B-L erhalten. Dies ist eine Vorhersage der meisten Varianten der GUT.

GUT: Protonenzerfall

- Trotz intensiver Suche ist bis heute kein Protonenzerfall beobachtet worden. Es wird eine Halbwertszeit von 10^{31} bis 10^{36} Jahren von den Theorien vorhergesagt. (
- Experimente am Super-Kamiokande Detektor in Japan deuten darauf hin, dass eine Halbwertszeit von $> 10^{35}$ Jahren vorliegt. Die Beobachtung von Neutrinooszillation ist ein Hinweis darauf, dass Protonenzerfall prinzipiell beobachtbar wäre.
- Wie Rubakow 1981 entdeckte, können möglicherweise auch magnetische Monopole durch Katalyse zum Protonenzerfall beitragen. Solche magnetischen Monopole müssen (den sie vorhersagenden Theorien zufolge) eine große Masse haben; sie wurden bisher nicht nachgewiesen.
- Ein Zerfall nach demselben Mechanismus wird auch für Neutronen vorhergesagt, die im Atomkern gebunden sind. (Freie Neutronen haben eine mittlere Lebensdauer von etwa 885 Sekunden.)

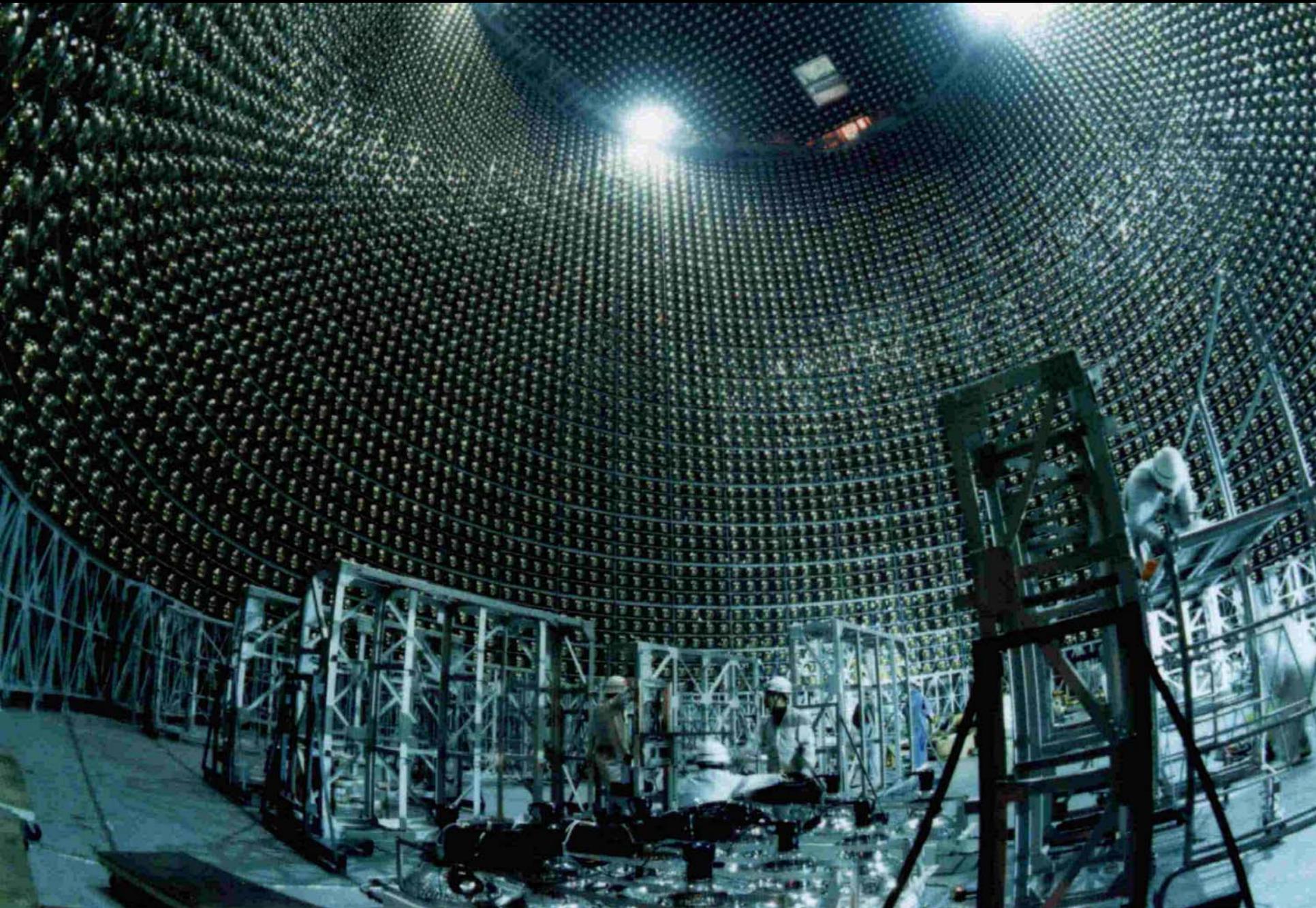
Super-Kamiokande

- Ein 1996 in Betrieb gegangener Neutrinodetektor nahe der japanischen Gemeinde Kamioka (heute Hida)
- Neben der Beobachtung von Neutrinos hofft man den Protonenzerfall zu beobachten
- 1998 lieferten unter anderem Daten von Super-Kamiokande Hinweise auf Neutrinooszillationen
- Detektor ist auch Teil des Supernova Early Warning Systems
- Detektor besteht aus Tank, gefüllt mit 50 000 Tonnen hochreinen Wassers
- Im Tank: 11 200 Photomultiplier, welche die Tscherenkow-Strahlung von freien Elektronen und Myonen registrieren, die durch WW der Neutrinos mit den Wassermolekülen entstehen

Super-Kamiokande

- Im Tank: 11 200 Photomultiplier, welche die Tscherenkow-Strahlung von freien Elektronen und Myonen registrieren, die durch WW der Neutrinos mit den Wassermolekülen entstehen
- Anlage befindet sich 1km unter der Erdoberfläche, um die kosmische Strahlung abzuschirmen
- Tank ist geteilt: im Zentrum befinden sich 32 000 Tonnen Wasser, 18000 befinden sich in einer Hülle um das Zentrum
- Hülle schirmt Radioaktivität aus dem umliegenden Gestein ab und hilft, Myonen aus der kosmischen Strahlung von Elektronen zu unterscheiden: Myonen können die Wand zwischen innerem und äußerem Tank durchdringen und werden so innen und außen beobachtet. Elektronen können die Wand nicht durchdringen. Wahrscheinlichkeit groß, daß es sich um ein Elektron handelt, welches erst im Tank erzeugt wurde, wenn Tscherenkow-Strahlung nur innen registriert wird.

Super-Kamiokande





GUT – Konsequenz:
Neutrinos haben Masse, Neutrinooszillation

Neutrinooszillationen

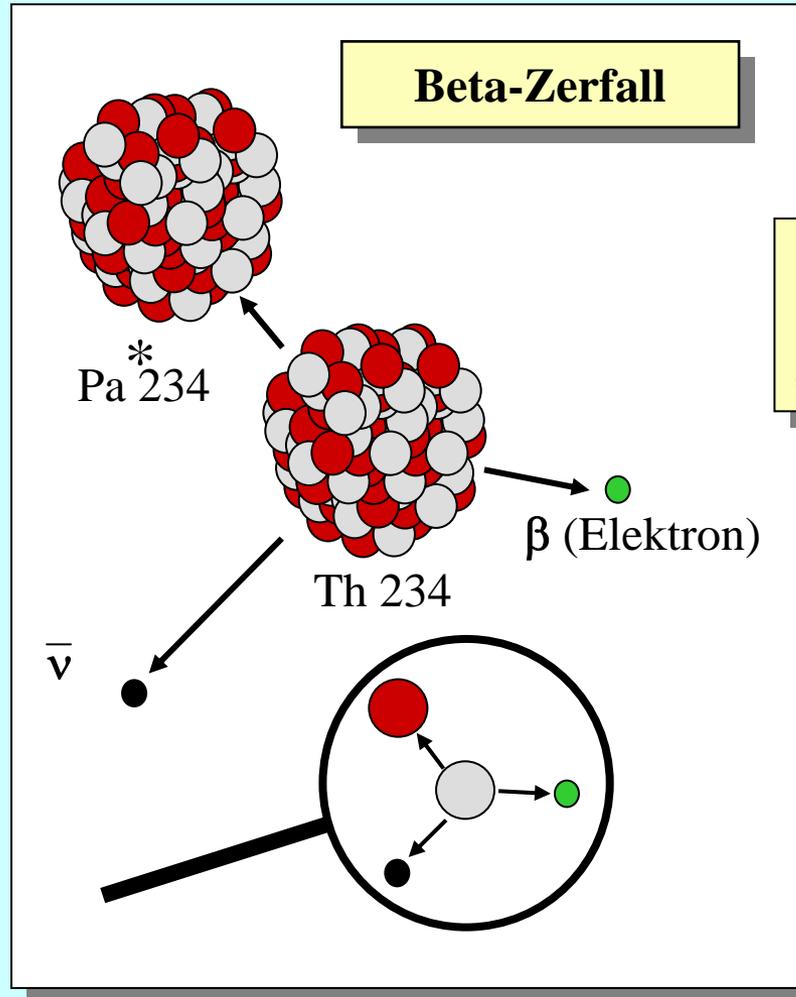
- Als **Neutrinooszillation** wird in der Physik die von Bruno Pontecorvo 1957 theoretisch vorhergesagte **Umwandlung zwischen verschiedenen Elementarteilchen, den Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos, aufgrund quantenmechanischer Prozesse** bezeichnet. D. h. wurde ein Neutrino ursprünglich mit einem bestimmten dieser drei 'Flavours' erzeugt, so kann eine spätere Quantenmessung einen anderen Flavour ergeben (Erhaltung der Leptonenfamilienzahlen ist hier verletzt). Da die **Wahrscheinlichkeiten für jeden Flavour sich periodisch mit der Ausbreitung des Neutrinos ändern, spricht man von 'Neutrinooszillationen'**.
- Für diesen theoretischen Oszillationsvorgang **müssten Neutrinos eine (wenn auch vergleichsweise geringe) Masse besitzen**, was weitreichende Konsequenzen für das Standardmodell der Elementarteilchenphysik hätte.

Unsichtbare Boten aus dem All -



Paulis neues Teilchen

RUDOLF MEIER



Neben dem Elektron entsteht ein
neutrales, leichtes Teilchen, das
die „fehlende Energie“ wegträgt!

Fermi 1934: „Neutrino“

*1930 bekannt:
Proton, Elektron, Photon*

"Heute habe ich etwas getan, was man in der theoretischen Physik nie tun darf. Ich habe etwas, was nicht verstanden ist, durch etwas erklärt, was man nicht beobachten kann!"



- Nachweis von Teilchen:

Wechselwirkung von Teilchen mit Materie (Detektor)

- Wechselwirkung in Materie hängt stark vom Teilchen ab:

Geladene Teilchen: Ionisation der Materie

Photonen: Energieübertrag auf geladene Teilchen

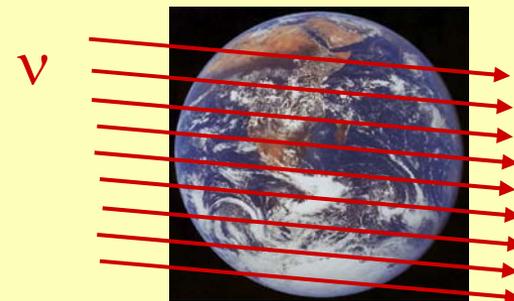
Neutronen: Kernreaktionen liefern geladene Teilchen



- Neutrinos wechselwirken sehr schwach:

Nur **eins von 100 Milliarden Neutrinos** aus einem β -Zerfall bemerkt die Erde.

Berechnet 1934: „Hoffnungslos“



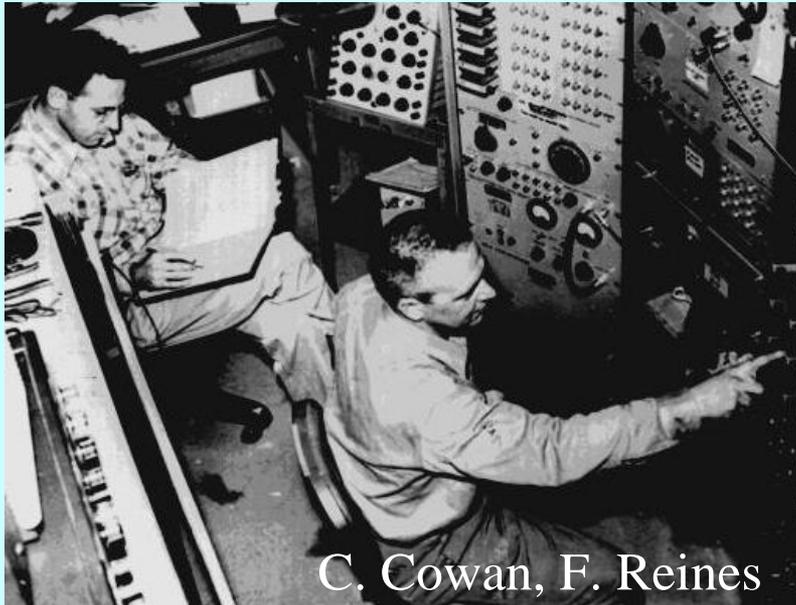
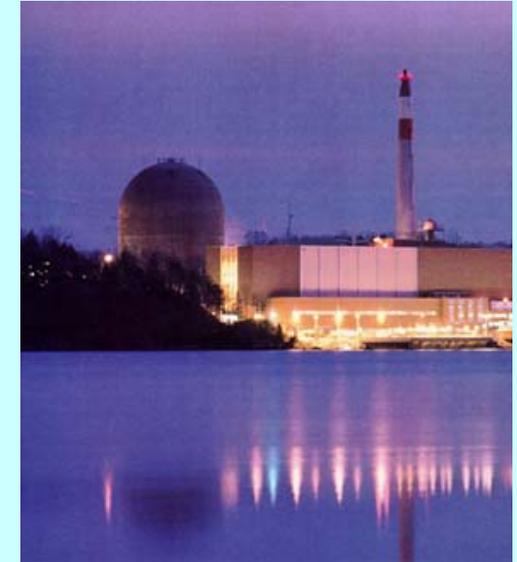
Antineutrinos aus der Kernspaltung



Kernreaktor: etwa 10 Antineutrinos pro Spaltung!
C. Cowan und F. Reines 1956

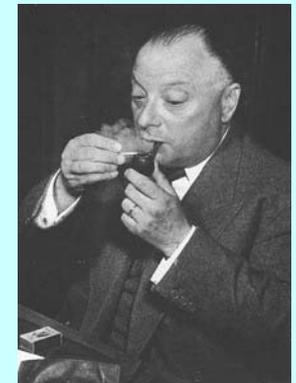
10^{13} Antineutrinos pro cm^2 pro Sekunde (10 m entfernt)

Etwa **3 Antineutrino-Reaktionen pro Stunde** in einem
5 Tonnen - Detektor .



C. Cowan, F. Reines

Nobelpreis 1995



W. Pauli 1956

Neutrinos

Leptonen („leichte Teilchen“)

Elektron e	Myon μ	Tau τ
e-Neutrino	μ -Neutrino	τ -Neutrino

- keine elektrische Ladung
- Masse < Elektronmasse/100000
- Schwache Wechselwirkung

Um Neutrinos von der Sonne abzuschirmen wird 1LJ Blei benötigt!

(Abschirmung von 90%)





Unsichtbare Boten aus dem All - Neutrinos

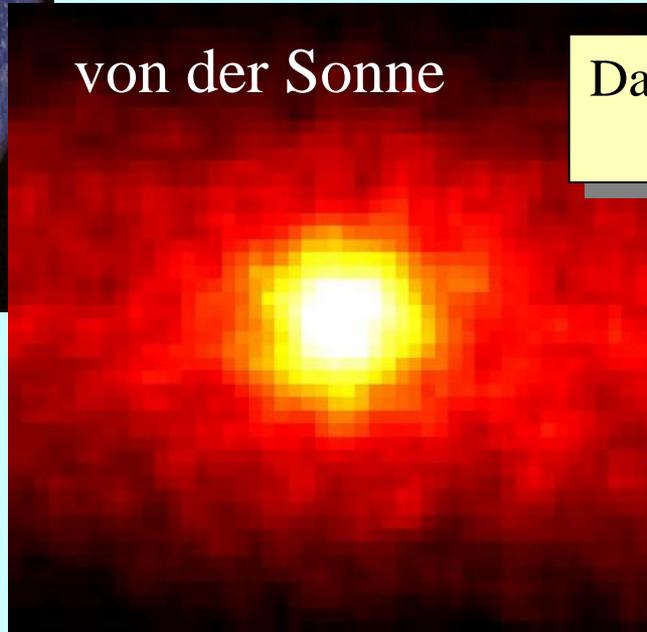
RUDOLF MEIER

auf der Erde



Die Geburt des Neutrinos (1930)
Erster Nachweis (1956)

von der Sonne



Das solare Neutrino-Problem
(1968-2002)

aus dem Kosmos



Die Supernova 1987a
Neutrino-Observatorien



Nobelpreis für Physik 2002



Raymond Davis



Masatoshi Koshiba

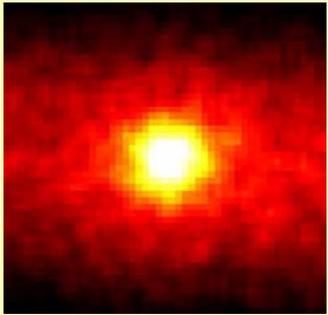


Riccardo Giacconi

„Für bahnbrechende Arbeiten in der Astrophysik,

insbesondere für den Nachweis kosmischer Neutrinos“

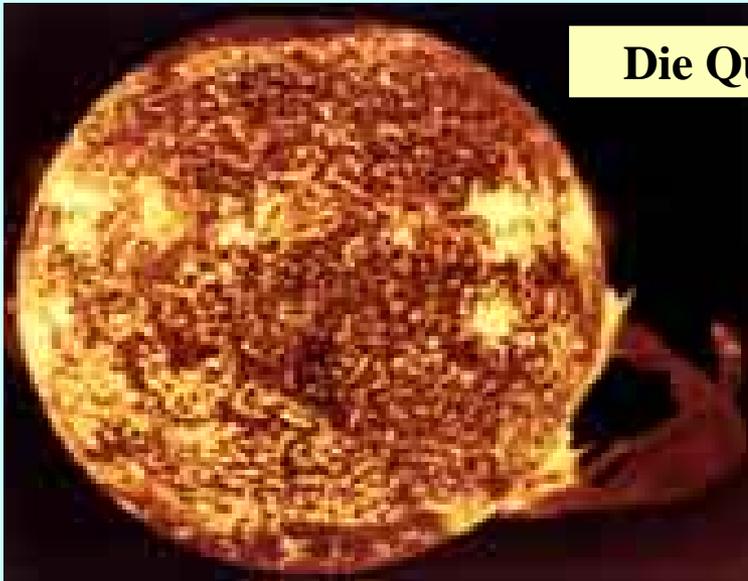
die zur Entdeckung von kosmischen Röntgenquellen geführt haben“



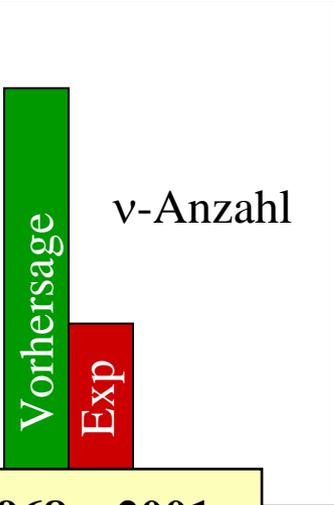
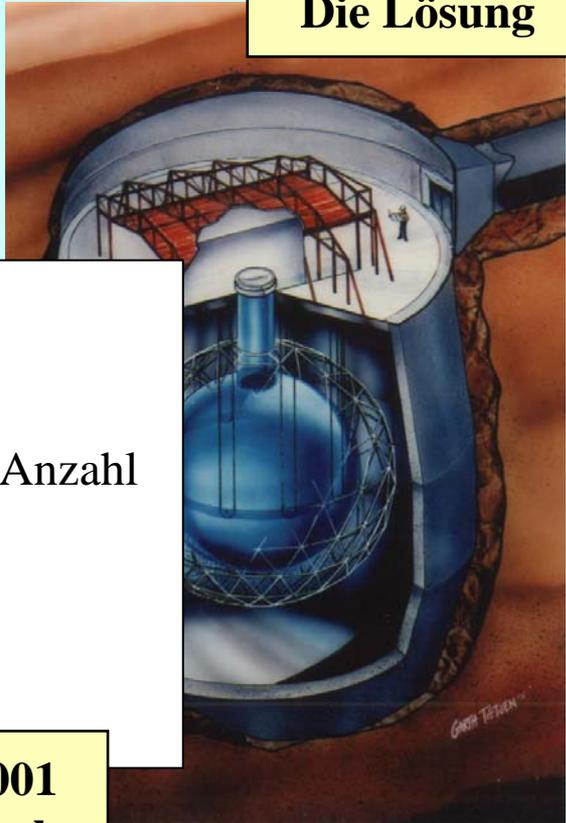


Das solare Neutrino-Problem

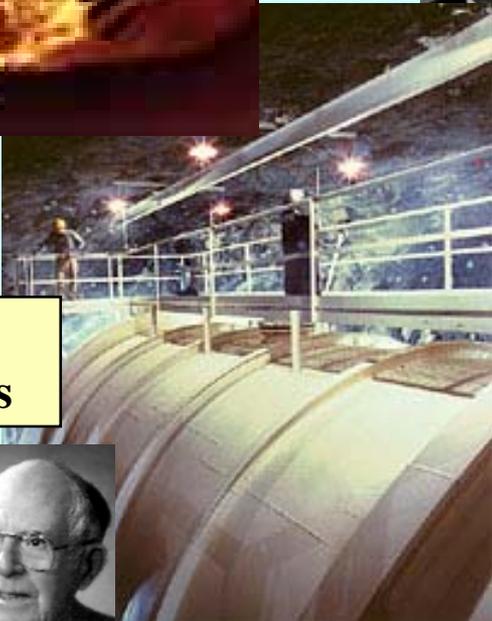
Die Quelle



2002
Die Lösung



1964
Der Nachweis



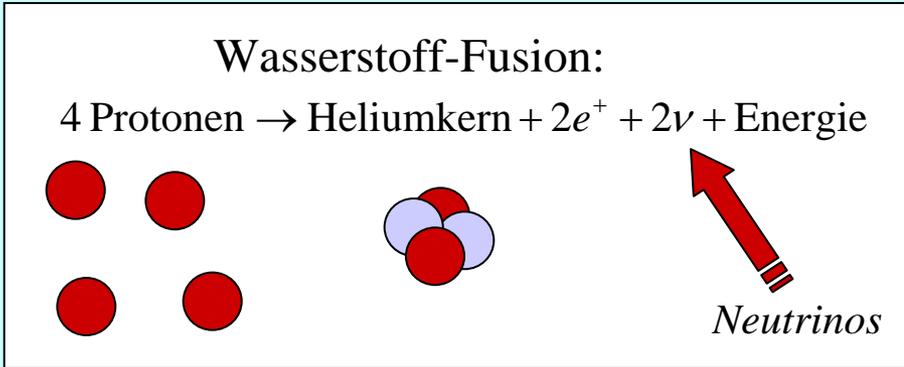
1968 – 2001
Das Rätsel

Energiequelle der Sonne



- Die Sonne strahlt enorme Energiemengen ab
 - seit einigen Milliarden Jahren!
- welche Energiequelle?

Chemische Reaktionen:	2500 Jahre	☹️
Gravitationsenergie:	20 Millionen Jahre	☹️
Kernfusion:	10 Milliarden Jahre	😊



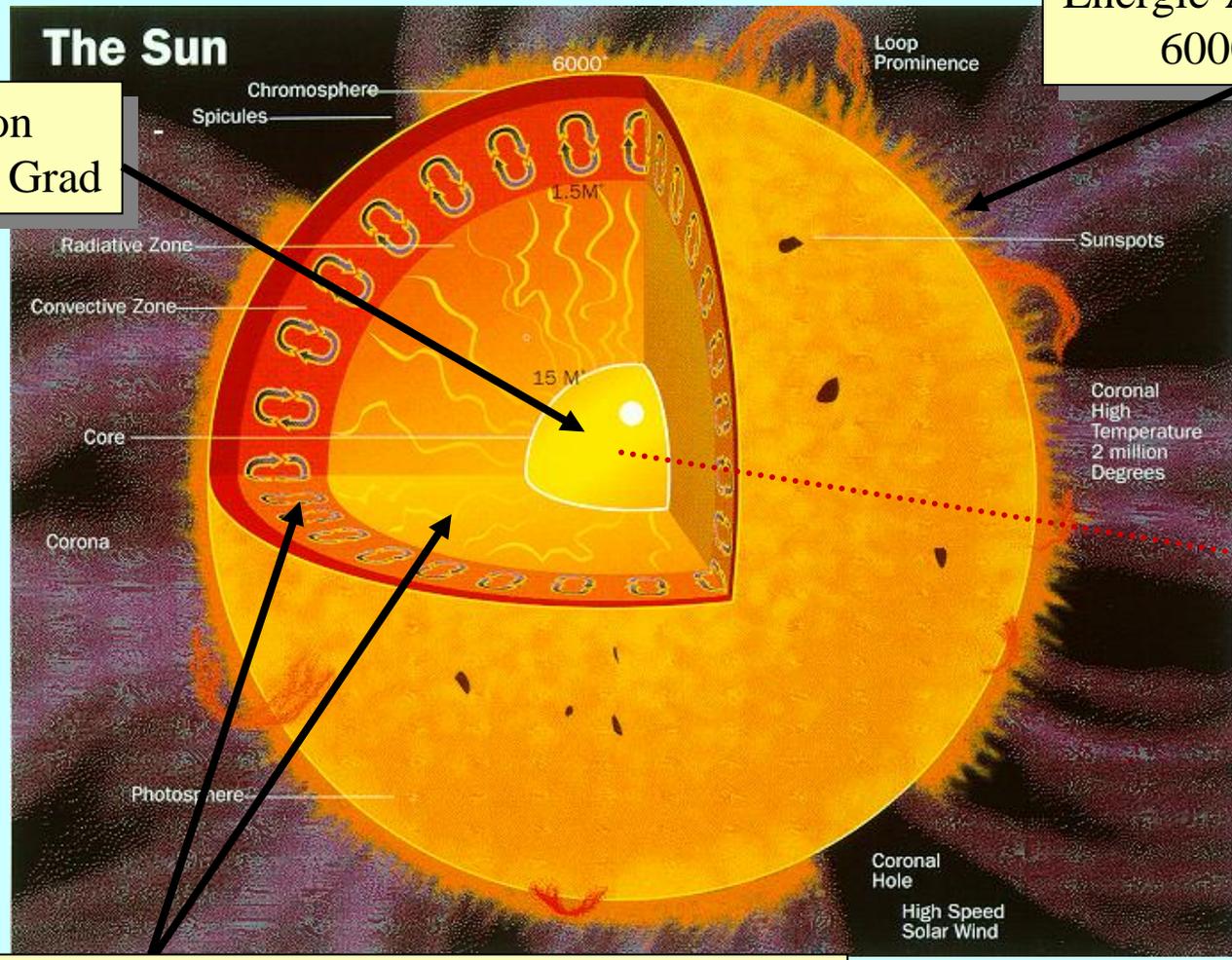
Energie aus 1g Wasserstoff: 200000 kWh

- Protonen tragen elektrische Ladung
 - Protonen stoßen einander ab
- Fusion findet nur bei hohen Dichten und Temperaturen statt
- Im Zentrum der Sonne!

Aufbau der Sonne

Kernfusion
15 Millionen Grad

Energie-Abstrahlung
6000 Grad



Energie-Transport, Dauer: 10 Millionen Jahre

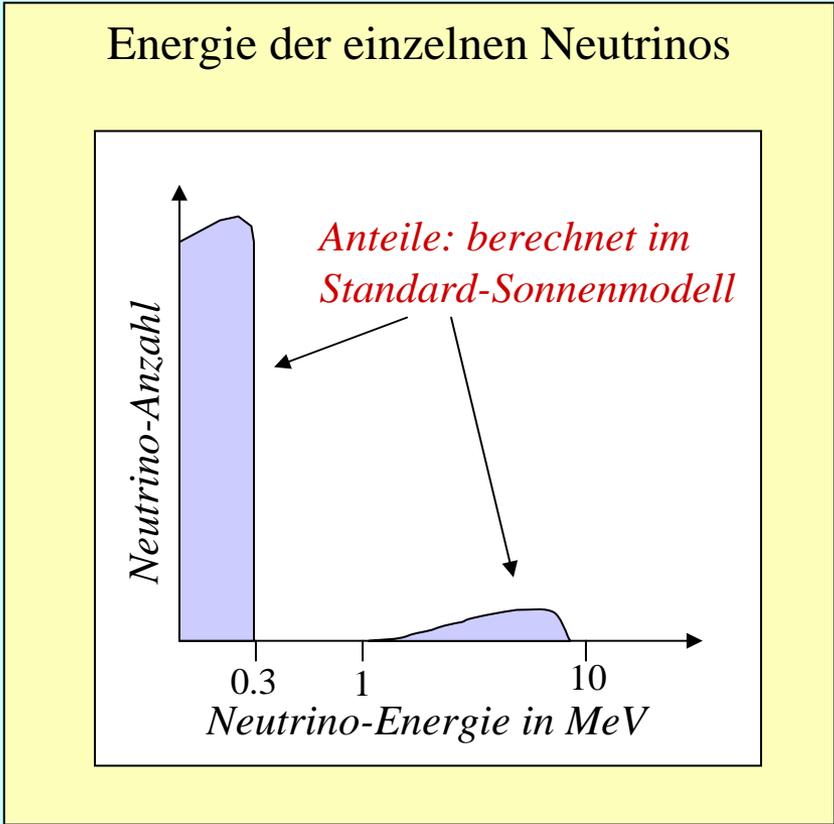
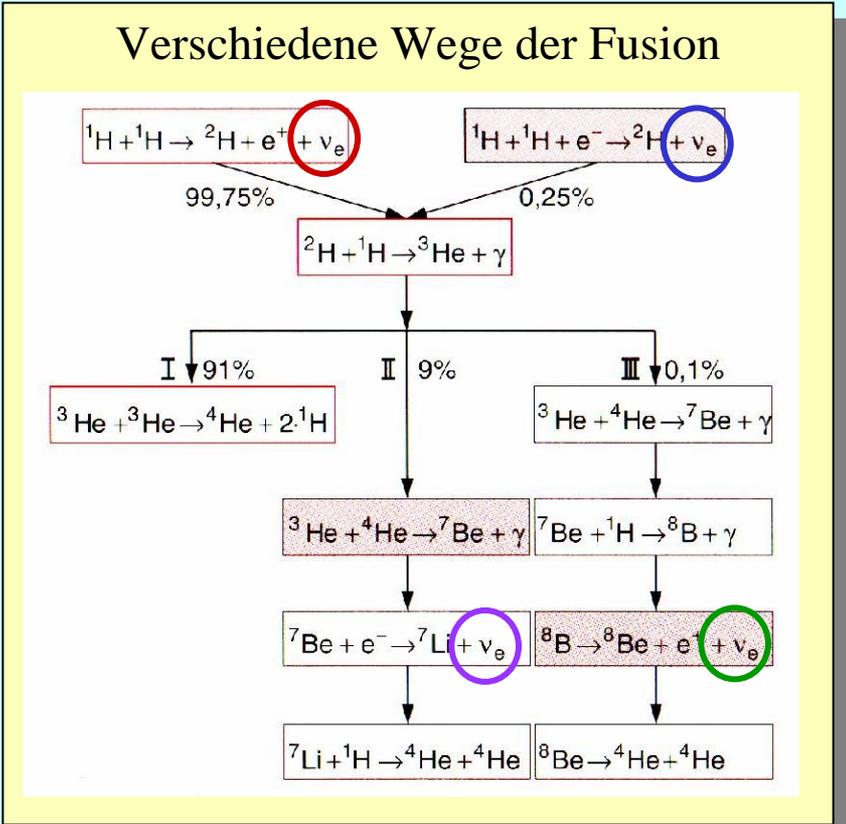
ν
Neutrinos
2,3 Sekunden

Radius: 700 000 Kilometer

Neutrinos aus der Sonne

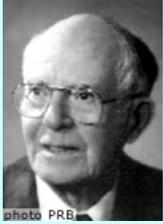
$$4 \text{ Protonen} \rightarrow \text{Heliumkern} + 2e^+ + 2\nu + 26\text{MeV}$$

- Bekannt: insgesamt abgestrahlte Energie
 - Bekannt: Energie pro Fusionsprozess
- Anzahl der pro s erzeugten Neutrinos!
Auf Erde: 66 Milliarden ν pro s pro cm^2





Nachweis von solaren Neutrinos

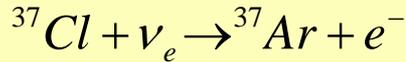


R. Davis
1964 Homestake-Goldmine

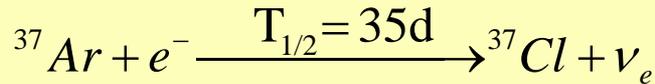


M. Koshiba
1986 Kamiokande

Einfang von Neutrinos an ^{37}Cl -Kernen



Nachweis des radioaktiven ^{37}Ar



Mindest-Neutrinoenergie:

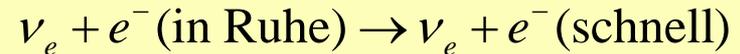
0.8 MeV

5 Milliarden ν /s/cm²

Erwartete Umwandlungen
in 600t C₂Cl₄ pro Tag:

1,5

Stoß von Neutrinos mit Elektronen



Nachweis der schnellen Elektronen

$$v_{\text{Elektron}} > \frac{c}{n_{\text{Wasser}}} \rightarrow \check{\text{C}}\text{erenkov-Licht in Wasser}$$

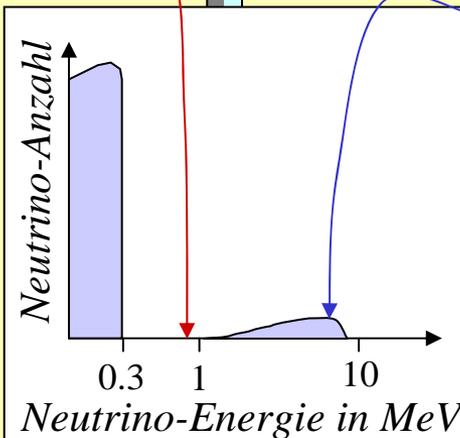
Mindest-Neutrinoenergie:

7.5 MeV

5 Millionen ν /s/cm²

Erwartete Ereignisse
in 4500t Wasser pro Tag:

0,3





Homestake-Goldmine: unter 1400m Fels
Tank mit 600t (380 000l) C_2Cl_4

Verlauf eines Messzyklus (40 Tage):

- Zugabe von 0.2ml ^{38}Ar (6 Trillionen Atome)
- 40 Tage Neutrino-Bestrahlung...
- Erwartet: 60 Atome ^{37}Ar
- Ausspülen des Argon mit Helium
- Trennung des Ar vom He durch Ausfrieren
- Etwa 95% des zugesetzten Argon werden wiedergewonnen, es sollten also auch 95% des entstandenen ^{37}Ar gefunden werden
- Nachweis der Anzahl gefundener ^{37}Ar Kerne durch ihren Zerfall.

Ergebnis: es lassen sich statt der erwarteten 60 nur etwa 20 Umwandlungen nachweisen!

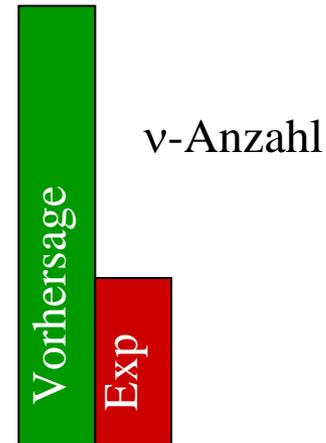


Das solare Neutrino-Defizit

Ergebnis des Homestake-Experiments

erste Veröffentlichung 1968, seitdem viele Messzyklen mit immer höherer Genauigkeit.

Es wird nur etwa ein Drittel der vorhergesagten Sonnen-Neutrinos nachgewiesen!

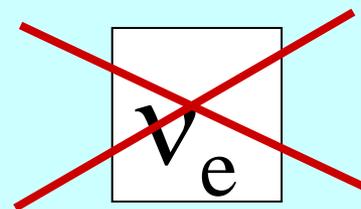


Das solare Neutrino-Defizit: Erklärungs-Ansätze

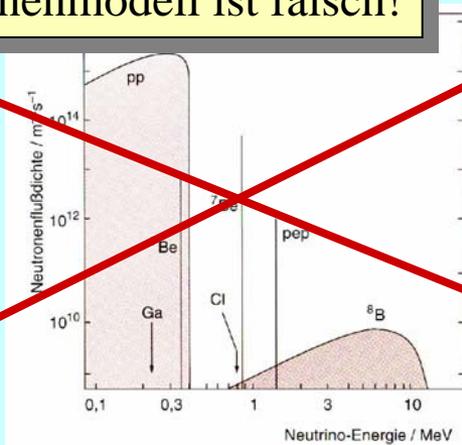
1. Das Experiment ist falsch!



3. Mit den Neutrinos stimmt was nicht!



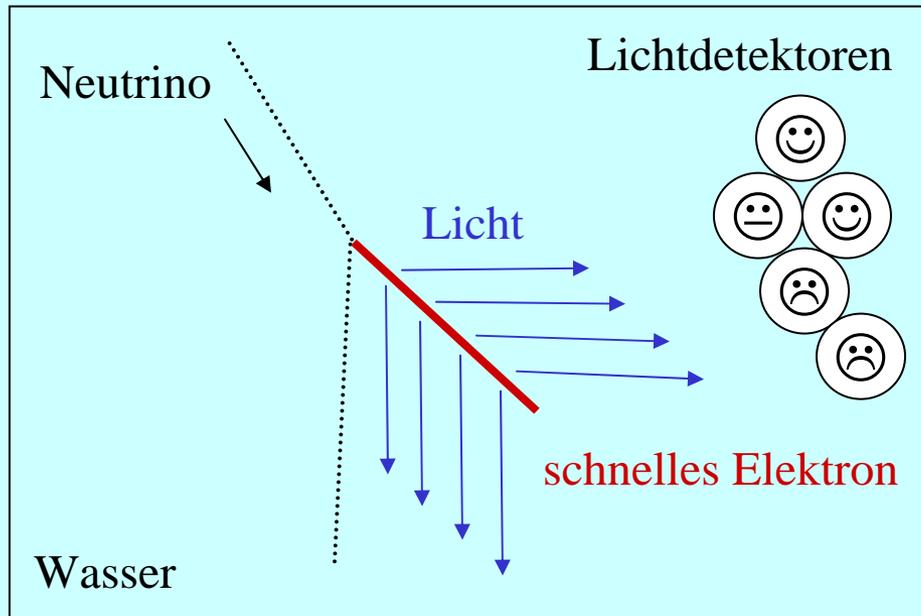
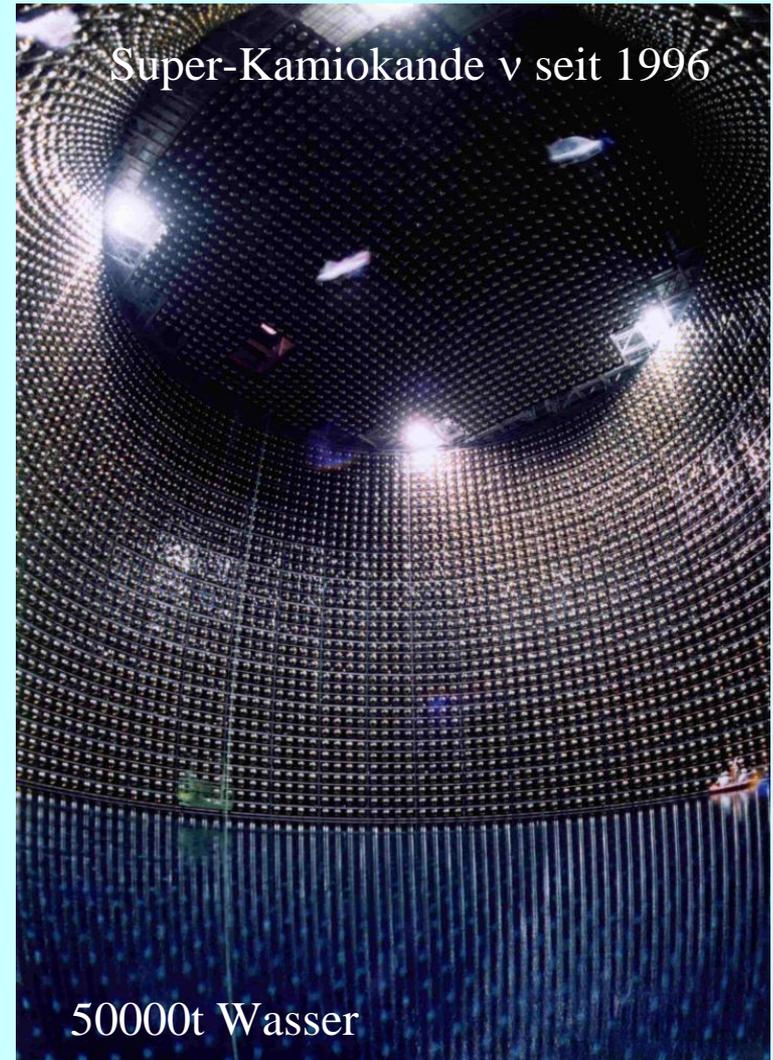
2. Das Sonnenmodell ist falsch!



4. Mit der Sonne stimmt was nicht!

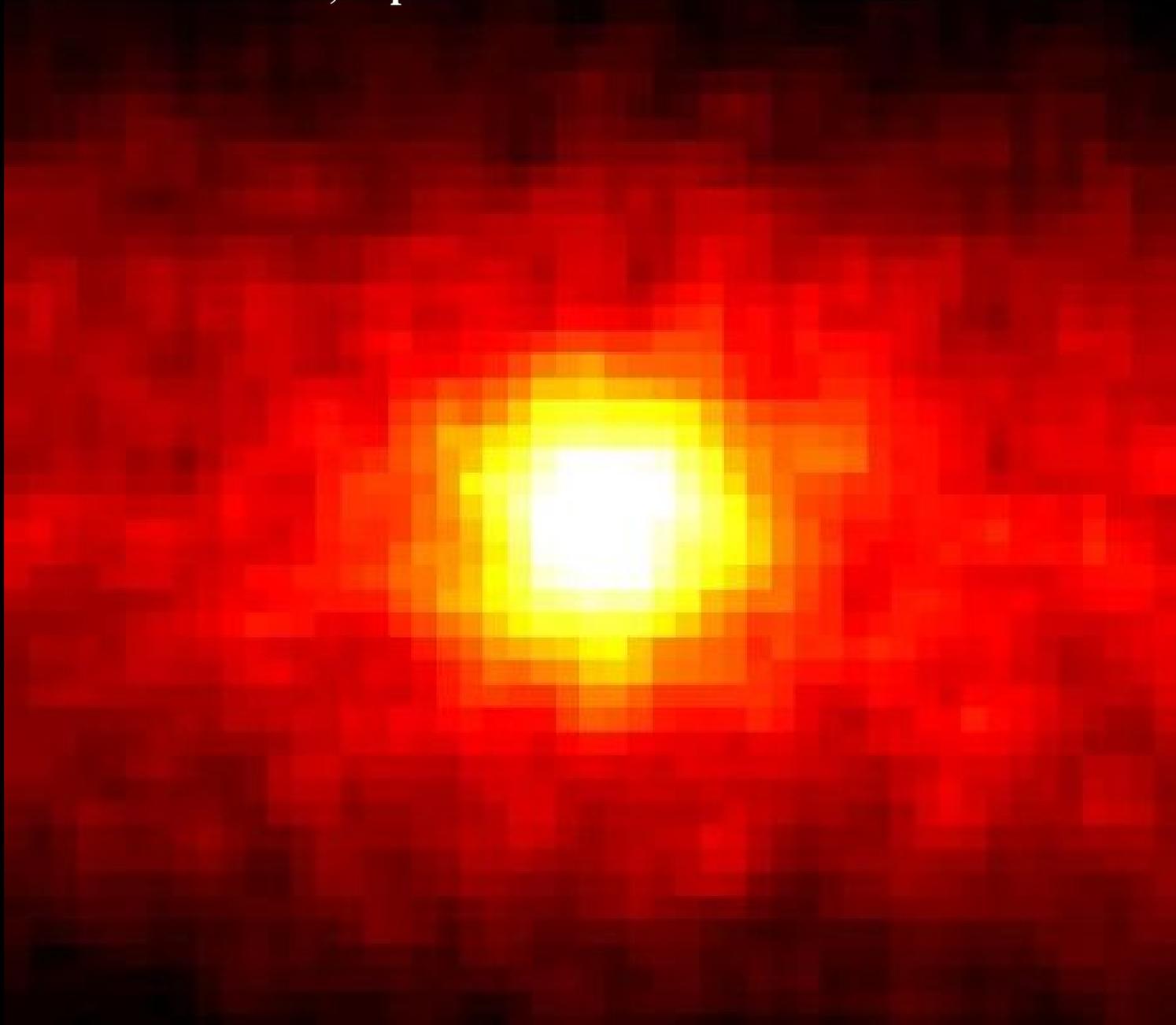


Kamiokande, Super-Kamiokande

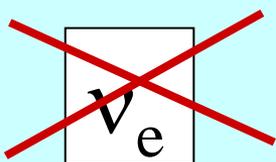


Ergebnis: weniger als die Hälfte der vorhergesagten Sonnen-Neutrino-Ereignisse!

Kamiokande, Super-Kamiokande: Neutrinos in Echtzeit!



Super-Kamiokande: Neutrino-Aufnahme der Sonne



Neutrino-Oszillationen

Elektron e	Myon μ	Tau τ
e-Neutrino	μ -Neutrino	τ -Neutrino

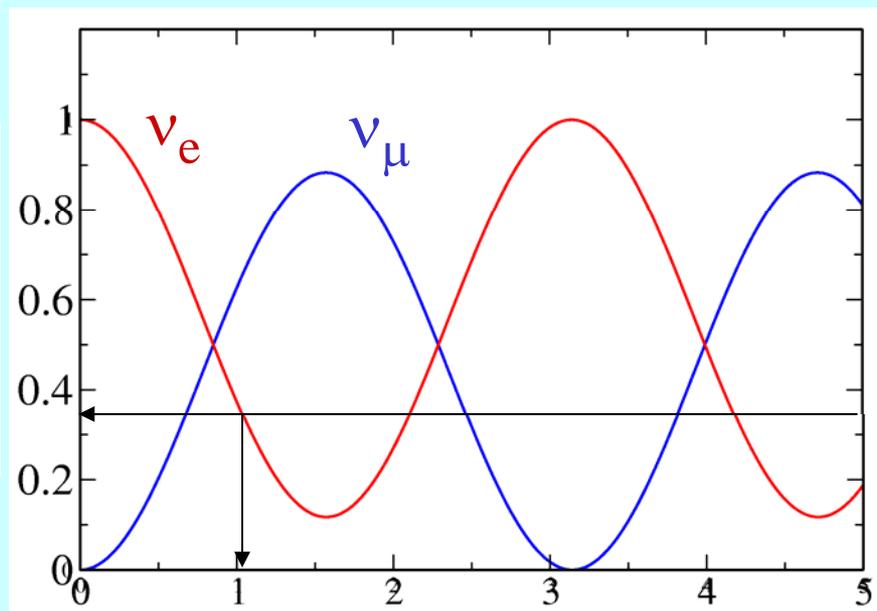
Idee: wenn Neutrinos eine Masse haben, könnten sie sich ineinander umwandeln!

Annahme: Mischung von

ν_e und ν_μ

Veränderung eines Neutrinostrahls mit dem Abstand von der Neutrinoquelle:

Anteil am Strahl

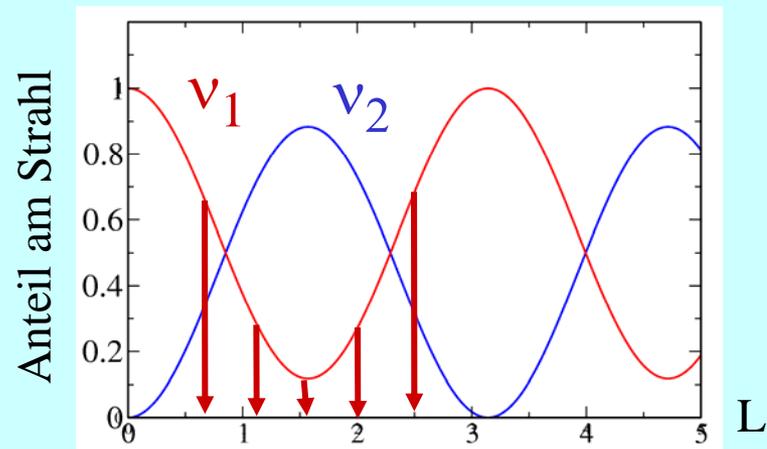


Abstand von der Quelle

Nachweis von Neutrino-Oszillationen

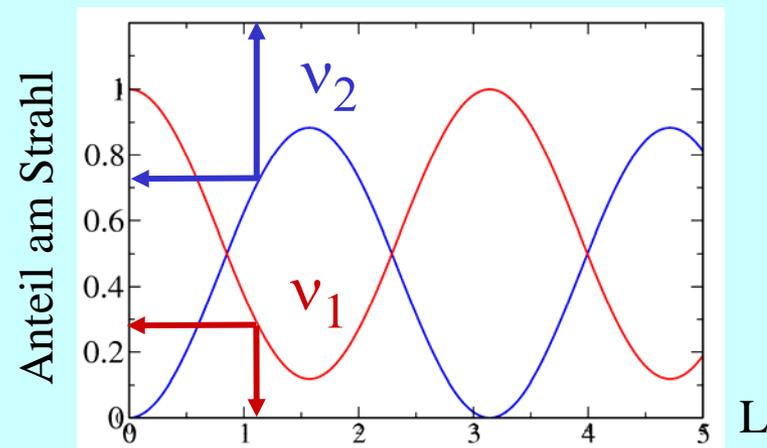
1

Messung der **ursprünglichen** Neutrinosorte in verschiedenen Abständen L von der Quelle



2

Messung der **ursprünglichen** und der **entstehenden** Neutrinosorte im Abstand L

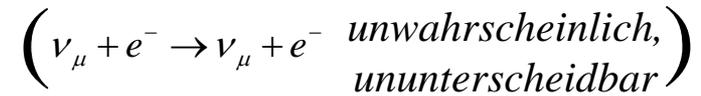
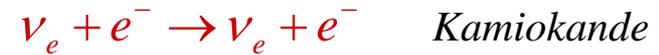


1998: Nachweis der Oszillation zwischen Myon- und Tau-Neutrinos mit Methode durch Super-Kamiokande (Myon-Neutrinos aus der Atmosphäre)

1

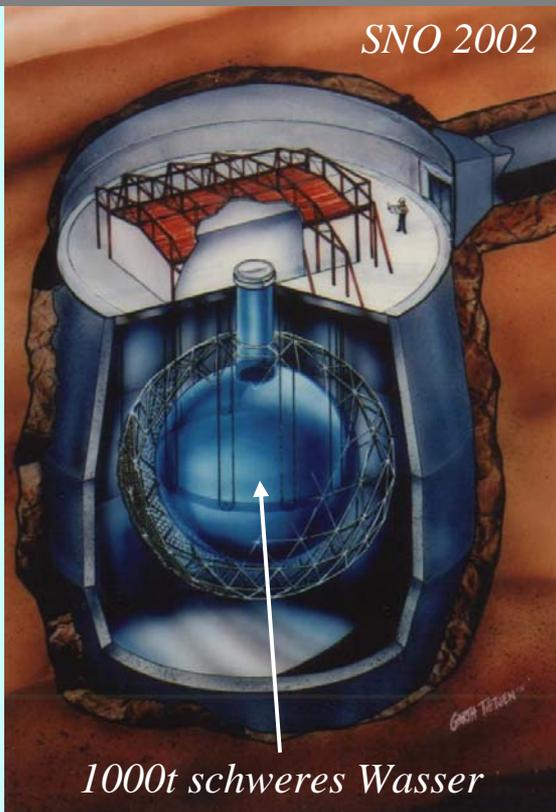
Überprüfung der Oszillations-Hypothese für solare Neutrinos

Bisher: Nachweis nur der **Elektron-Neutrinos**

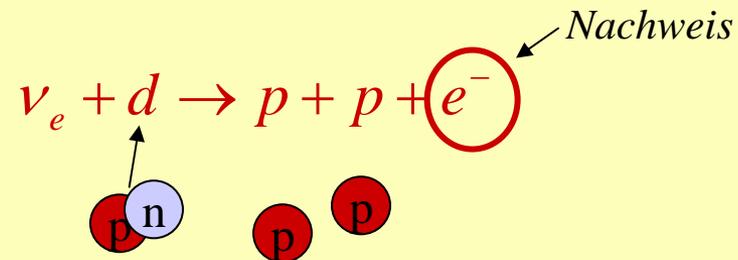


SNO: Nachweis **verschiedener Neutrino-Sorten** durch verschiedene Reaktionen an D_2O

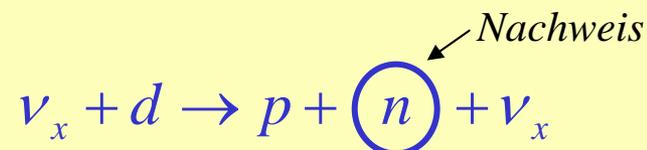
Sudbury Neutrino Observatory, Kanada



Nur **Elektron-Neutrino**:



Mit gleicher Wahrscheinlichkeit für **alle Neutrinos**:

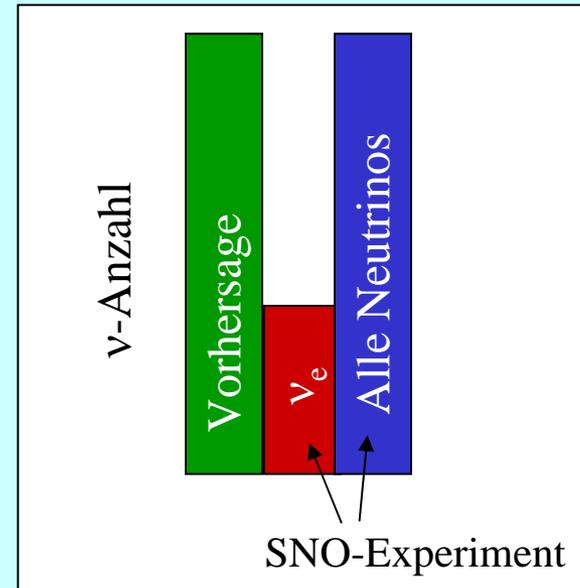


Rätsel gelöst – solare Neutrinos

Resultat SNO 2002:

Physical Review Letters 89, 011301 (2002)

Solares Neutrino-Defizit
erklärt durch Neutrino-Oszillationen!



Neutrinos haben eine Masse!

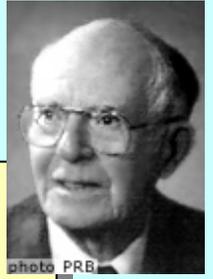
Masse klein: nicht strukturbildende dunkle Materie

Das solare Neutrino-Problem



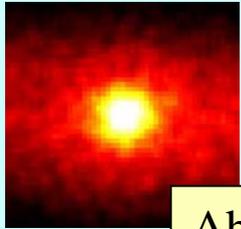
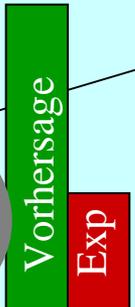
Sonne
Seit 4.5 Mrd Jahren
Fusion

66 Mrd Neutrinos/s/cm²



Ab 1964: Nachweis im
Homestake-Experiment
Erwartet: 1,5 Reaktionen/d
Gefunden: 0.5 Reaktionen/d

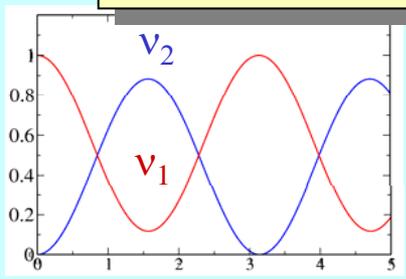
Solares
Neutrino
Problem



Ab 1986 Kamiokande:
Bestätigt Homestake



Mögliche Erklärung:
Neutrino-Oszillation



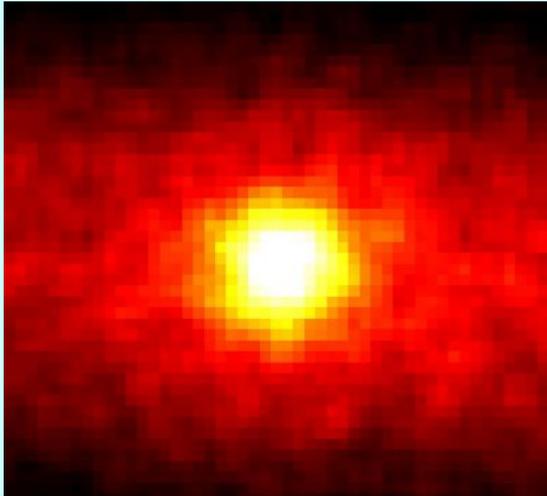
2002 SNO-Experiment:
Prüft Neutrino-Oszillation

Solares
Neutrino
Problem
Gelöst!

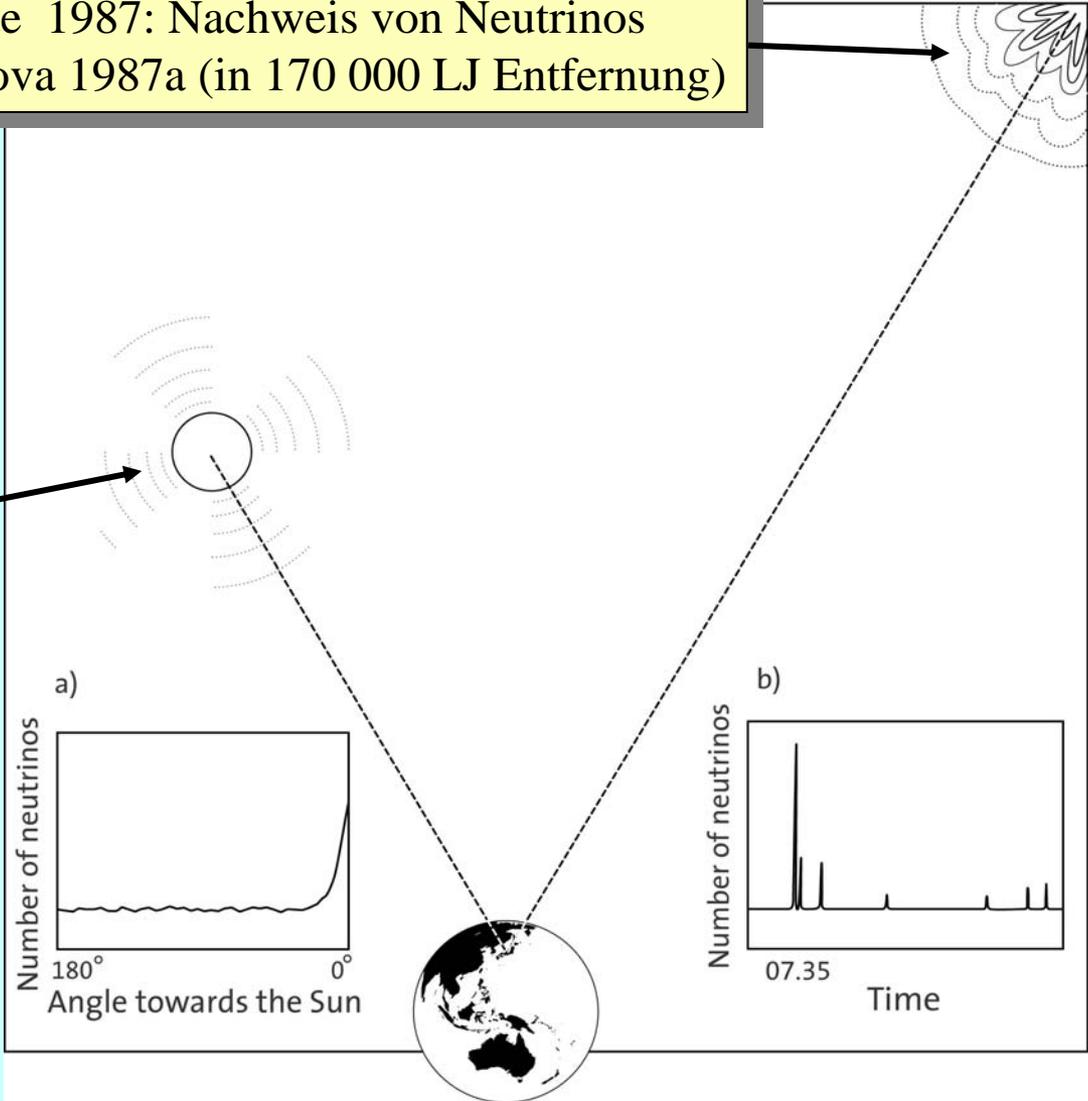


Kamiokande, SK: Beginn der Neutrino-Astronomie!

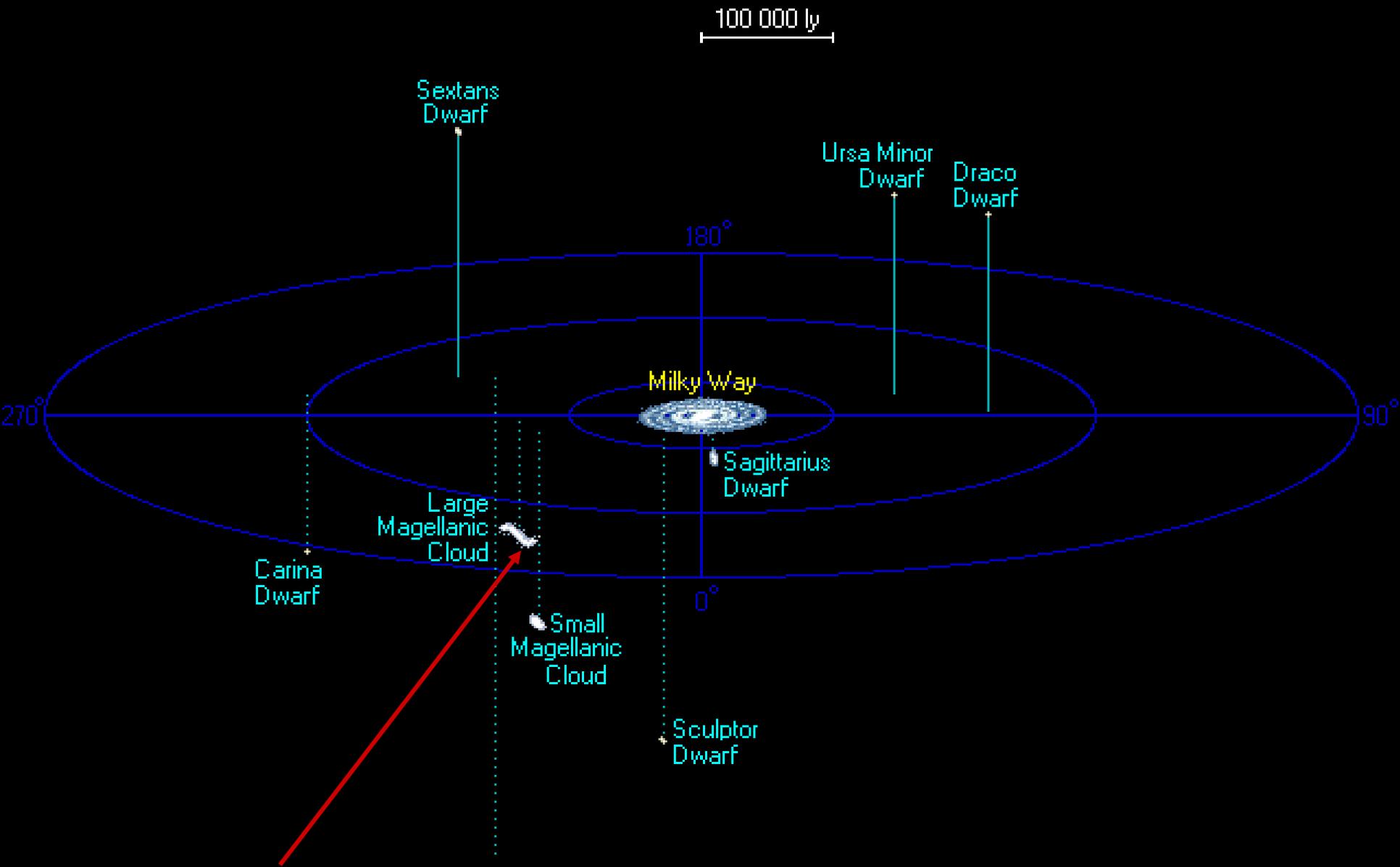
Kamiokande 1987: Nachweis von Neutrinos der Supernova 1987a (in 170 000 LJ Entfernung)



Super-Kamiokande
Neutrino-Aufnahme der Sonne



Umgebungskarte der Milchstraße



23. Februar 1987: Supernova in der Grossen Maggelanschen Wolke beobachtet



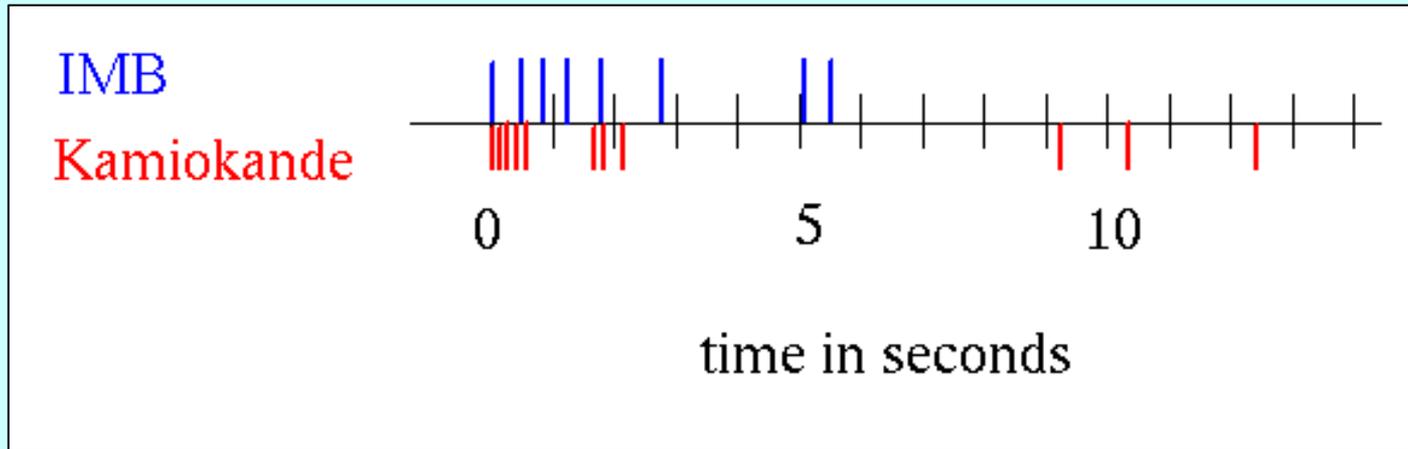
Ausbruch der Supernova 1987a: mit bloßem Auge gerade noch sichtbar

Entdeckung: Ian Shelton *am Las Campanas Observatory, Chile*: 6:30 Uhr 24. Februar

Letzte Beobachtung ohne Supernova: 9:30 Uhr 23. Februar

Erste Beobachtung (auf Fotoplatte): 10:30 Uhr 23. Februar

Neutrino-Ereignisse in Kamiokande, IMB, Baksan 7:35 Uhr 23. Februar



Größe des Signals: 11 Neutrino-Ereignisse in 13 Sekunden in Kamiokande
Zum Vergleich: erwartet wird 1 Sonnenneutrino-Ereignis alle 3 Tage

Sichtbares Licht:

SN1987a überstrahlt alle
Sterne der Mag. Wolke

Gerade noch sichtbar mit
bloßem Auge

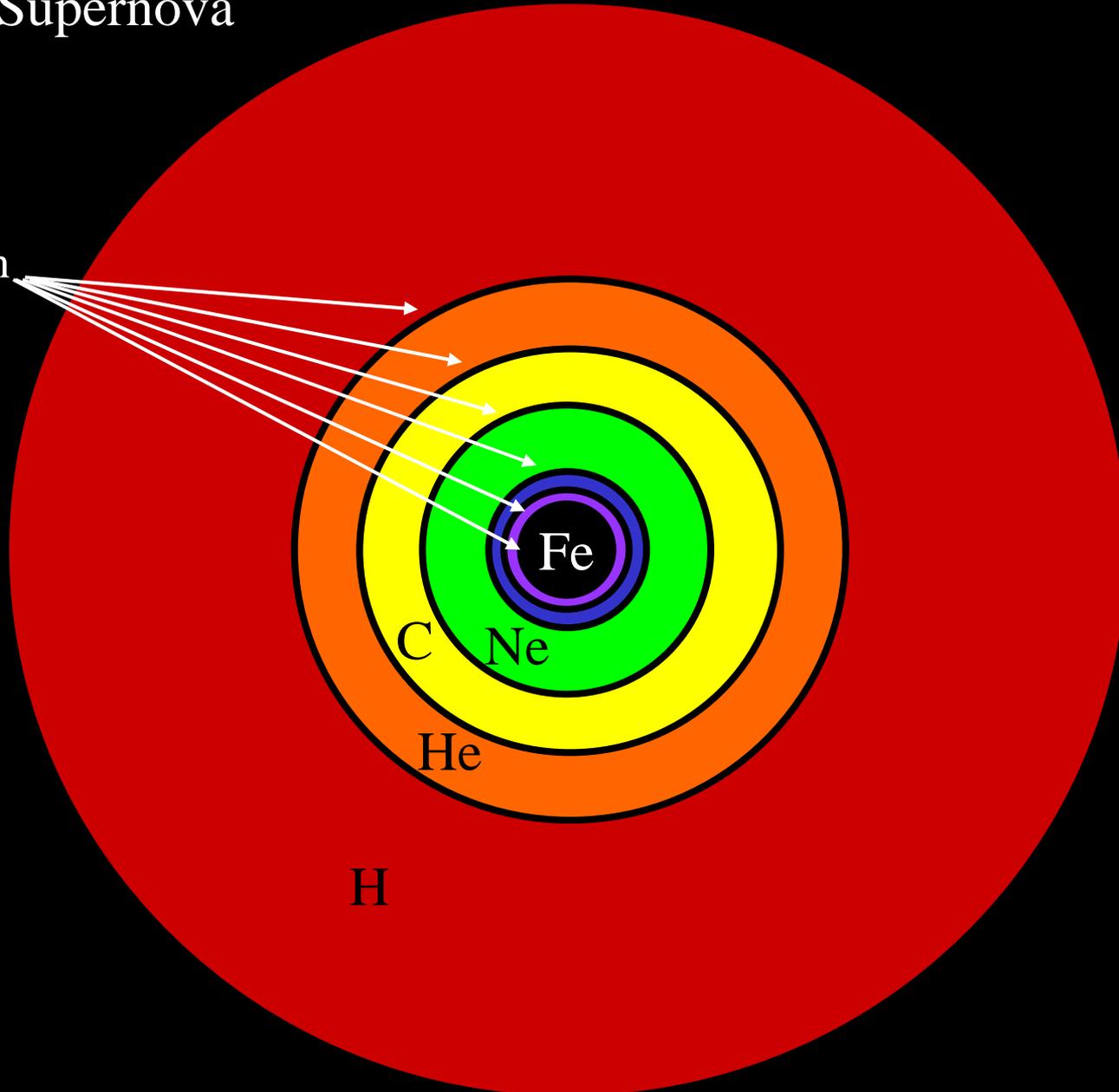
Neutrinos:

SN1987a überstrahlt für
einige Sekunden die Sonne
um viele Größenordnungen!

Neutrinos kommen >2h früher

Stern vor Supernova

Brennzonen



H
He
C
Ne
O
Si
Fe

Masse des Eisenkerns wächst über die Grenzmasse: Kollaps des Eisenkerns

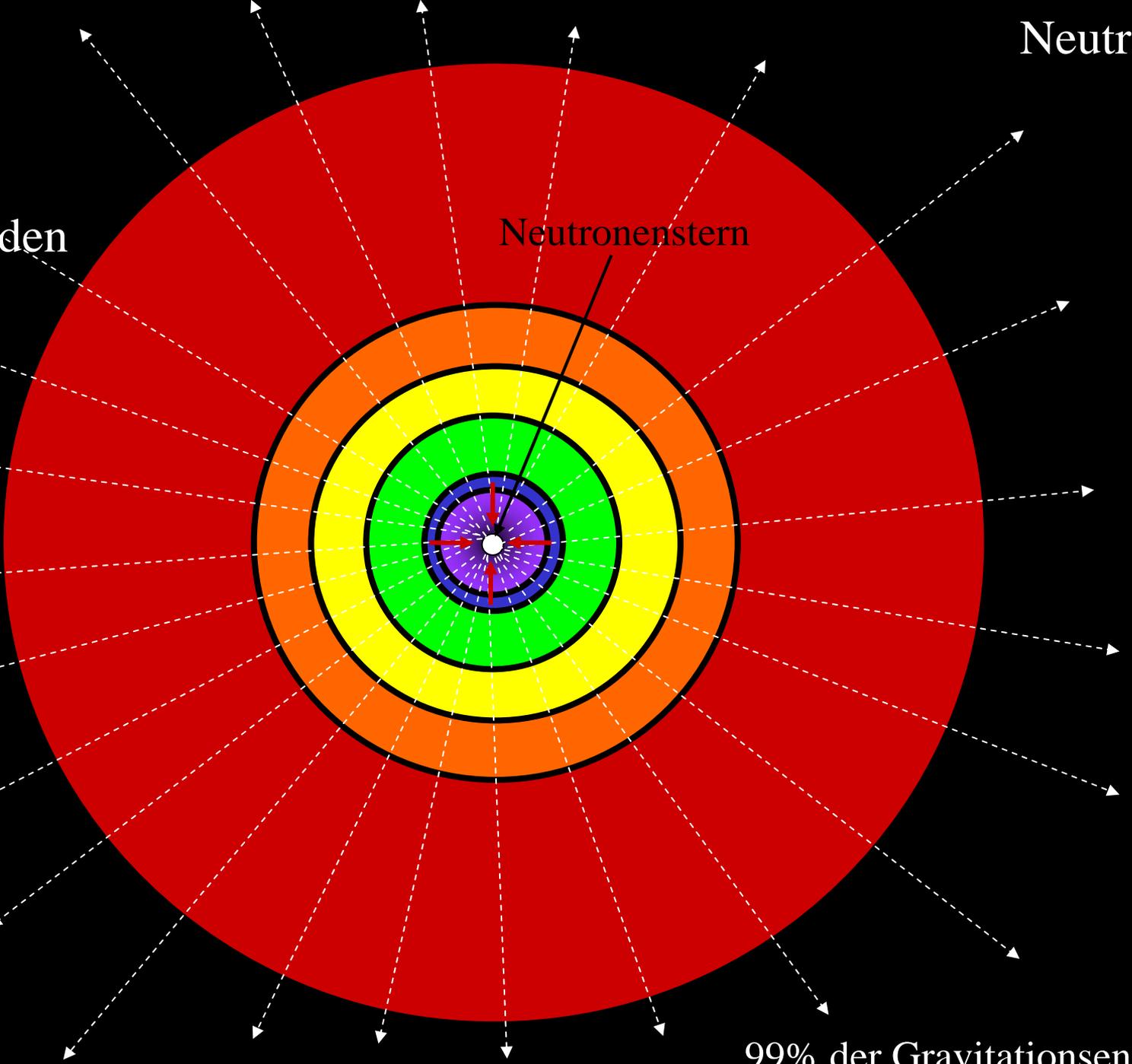
Kern-
Kollaps

Neutrinos

1-10 Sekunden

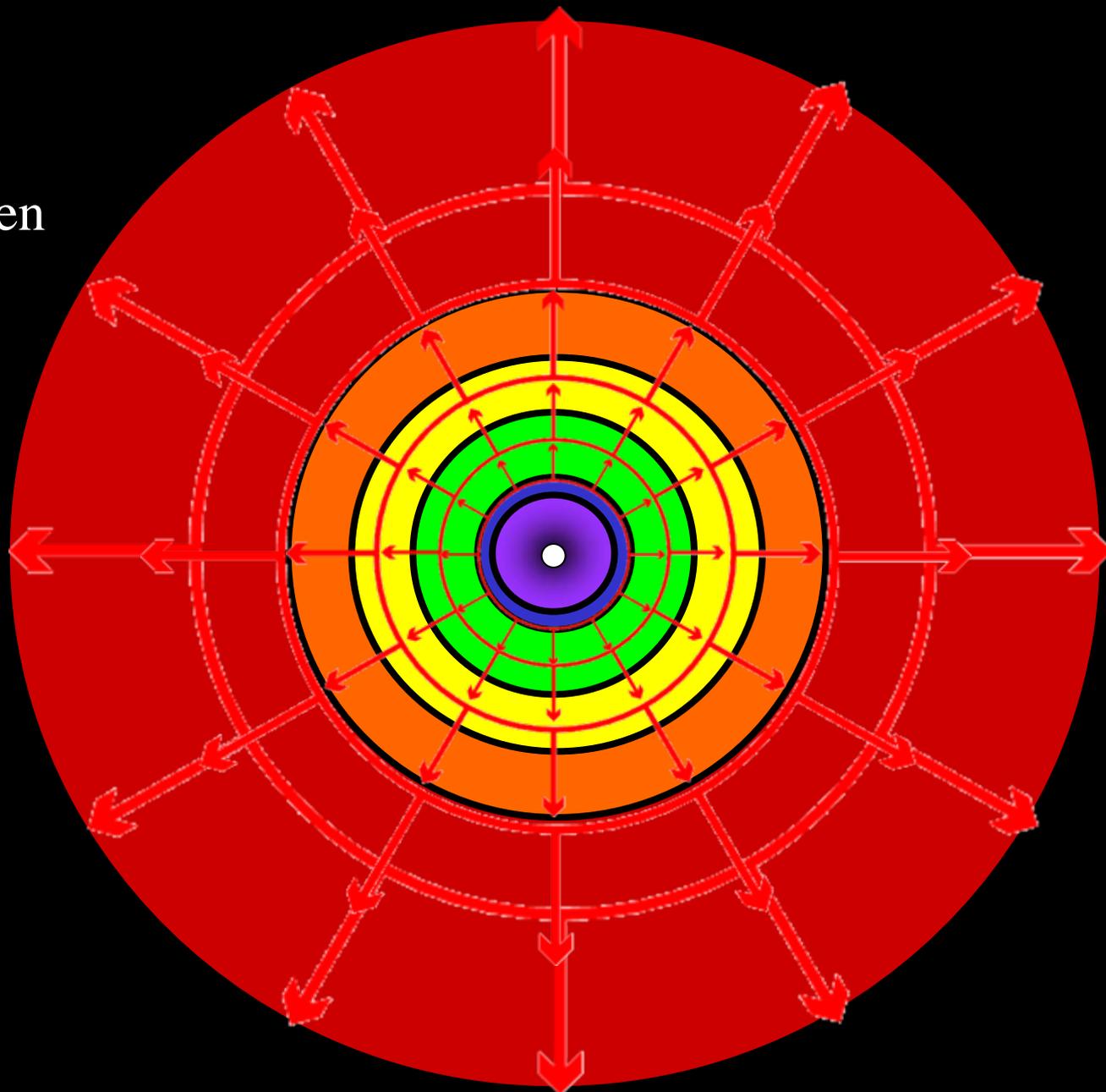
Neutronenstern

99% der Gravitationsenergie



Schock-
Welle

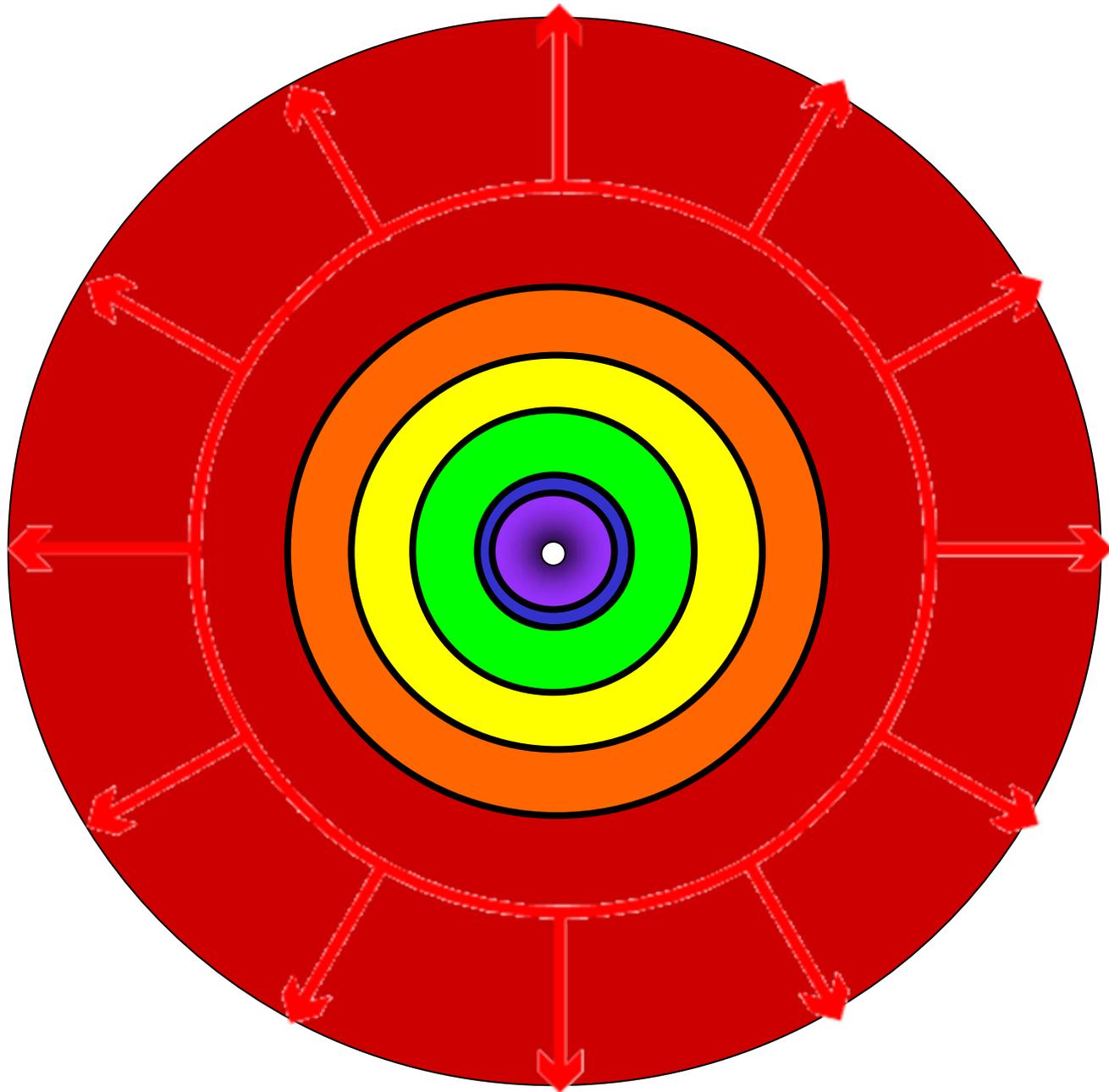
1-10 Stunden



1% der Gravitationsenergie

Optisches
Signal

100 Tage



0.01% der Gravitationsenergie

Neutronen- Stern

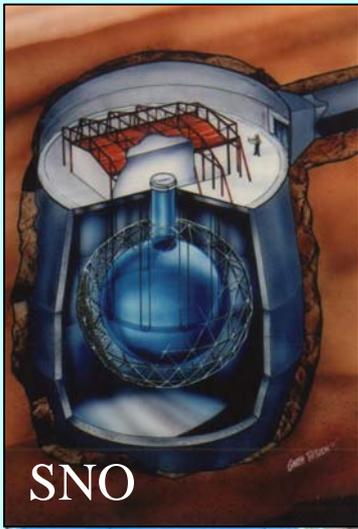


Neutrinos liefern wichtige Informationen zum Kern-Kollaps

Heute: Neutrinodetektoren als Frühwarnsystem für Supernovae

SuperNova Early Warning System

RUDOLF MEIER



SNO

Sudbury

Gran Sasso

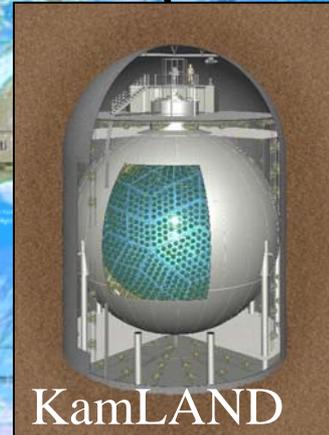


MACRO

Kamioka



Super-Kamiokande

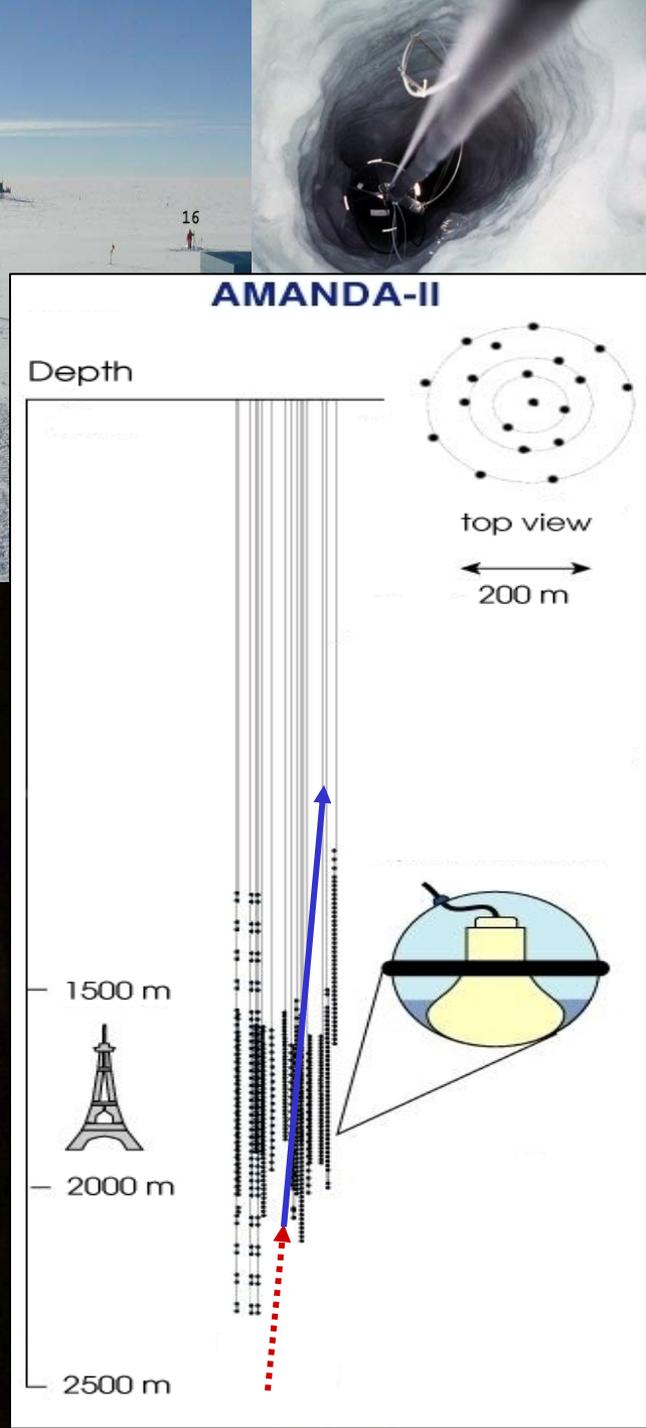


KamLAND



Amundsen

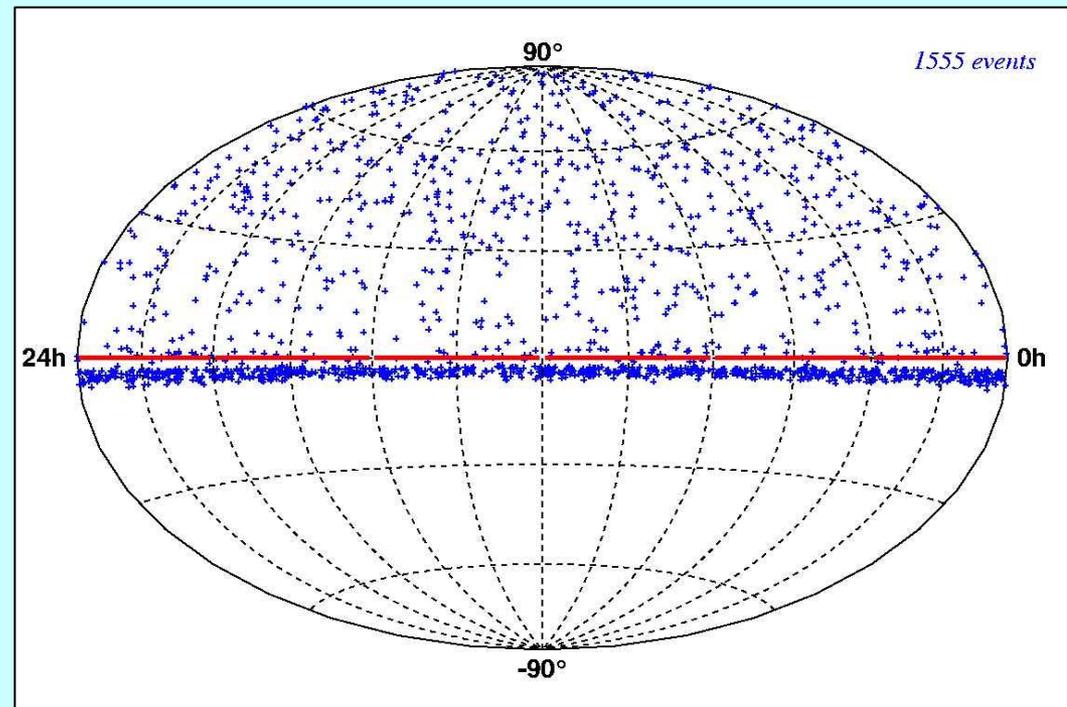
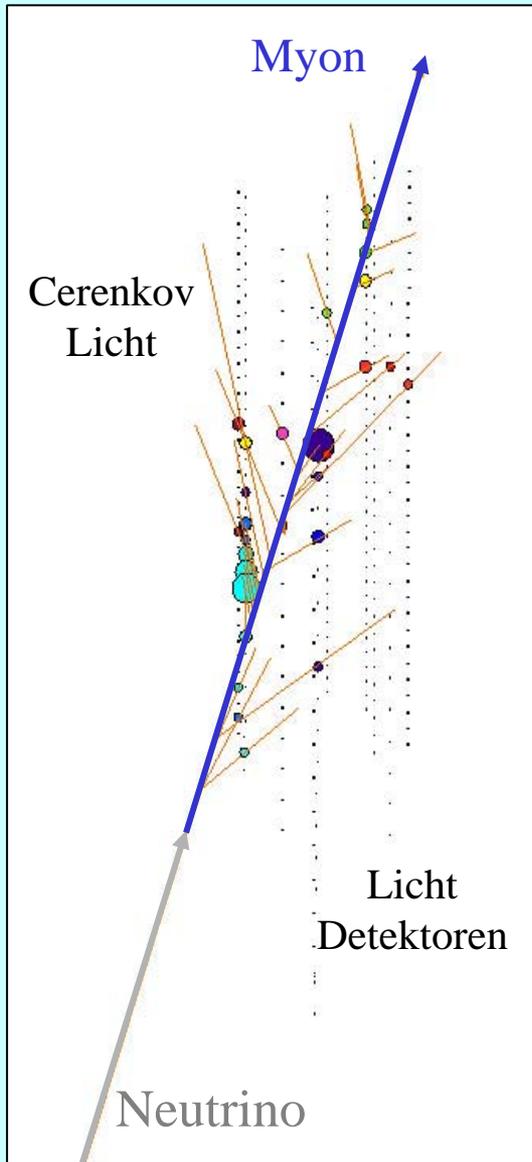
Südpol



Amanda:
Neutrino-Observatorium
für den Nordhimmel
... am Südpol!

Neutrino

Ereignis in Amanda



Amanda: Neutrino-Himmelskarte

- Supernova-Frühwarn-Netzwerk
- Neutrino-Punktquellen
- Neutrinos höchster Energien

Heute: ein Ereignis alle 7 Stunden

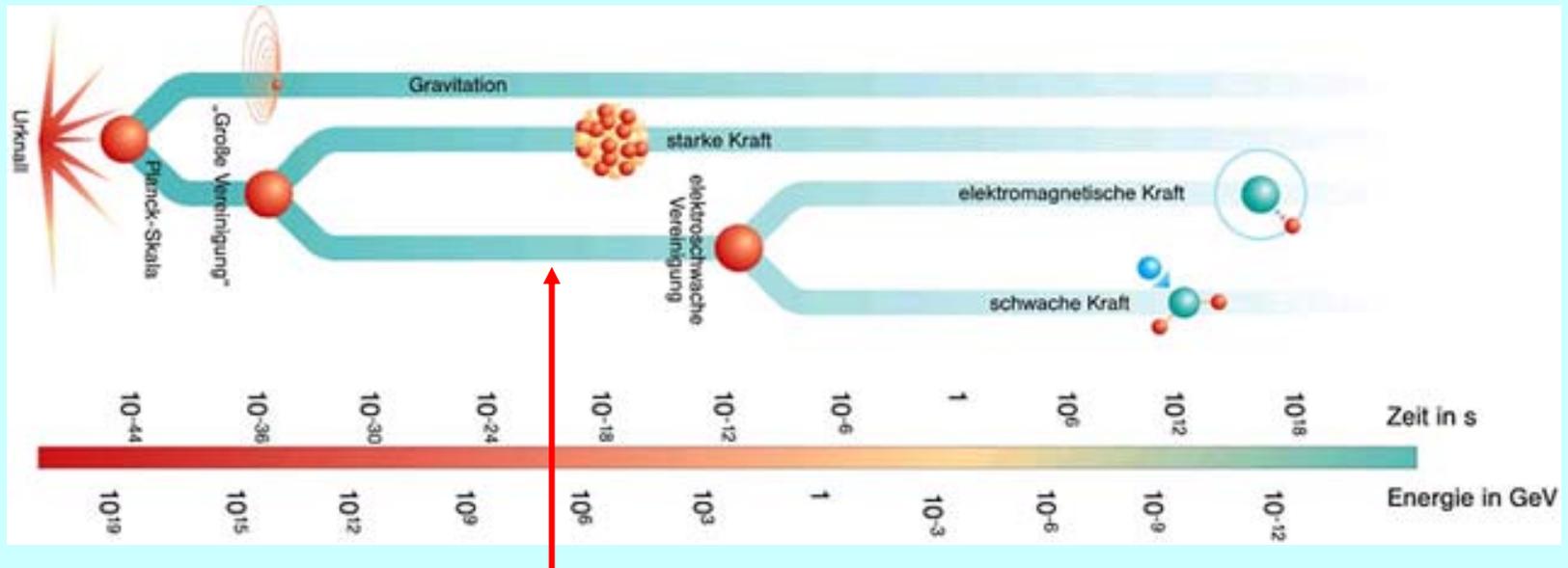
Zukunft: **Ice Cube**



Wo sind wir?

Fundamentale Materie- und Kräfte-Teilchen

Details Kräfte-Teilchen



„Elektroschwache Kraft“ (s.w.u.)

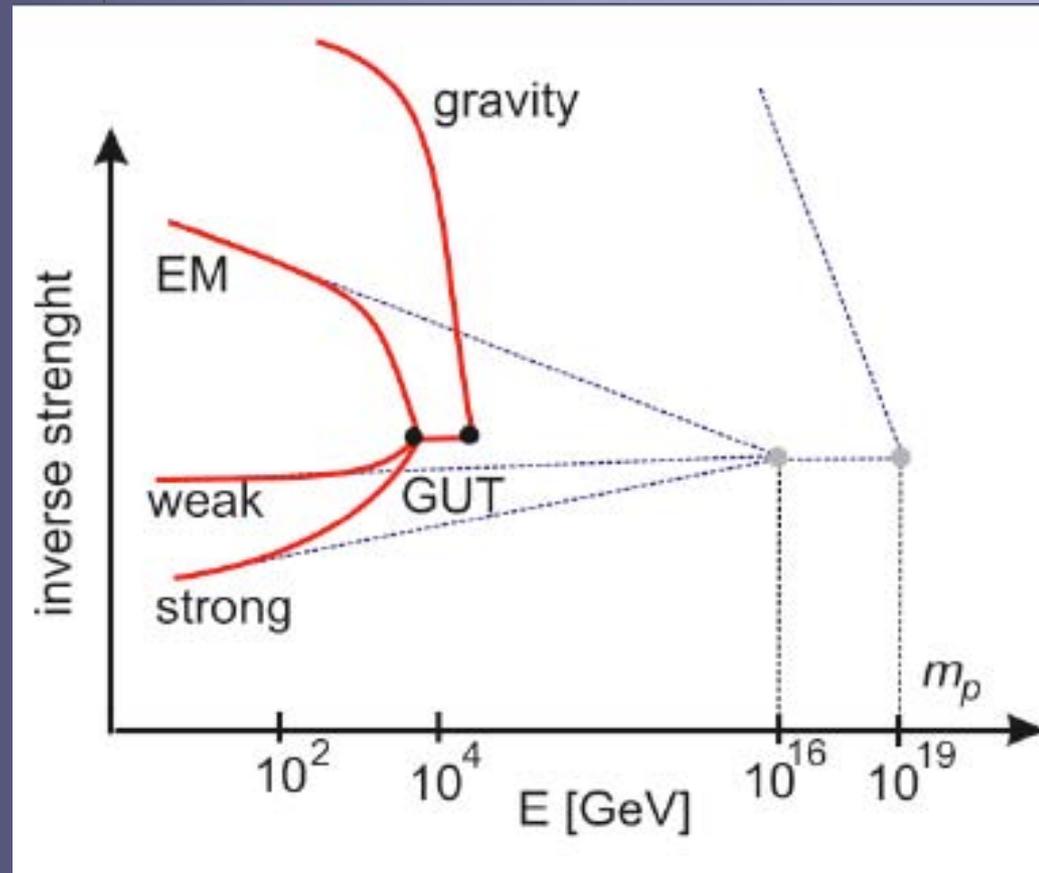
„Vereinheitlichung“ der Kräfte (Unification)

Quantum Black Holes

Quantum Black Holes at the LHC

$$M_{\text{BH}} \sim 10^{-24} \text{g}$$

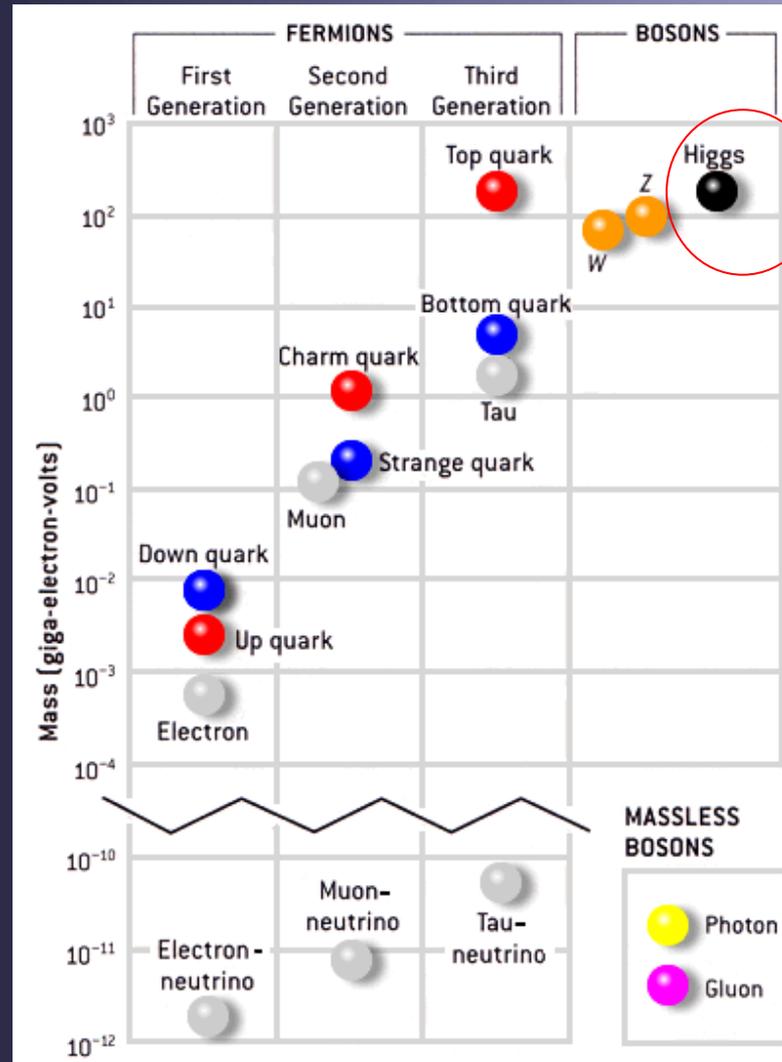
- The Theory of Everything
- Constraints about the energy scale of the Universe
- How many dimensions ?





Standardmodell

Masse



Noch nicht gefunden!

In 14 Tagen...

- Die Themen des Semesters – Überblick

- 30.10. Gamma-Ray Bursts

- 13.11. GUT & TOE

- **27.11. LHC & HIGGS**

- 11.12. Stringtheorie, Supersymmetrie, Quantengravitation

Winterferien: 23.12.-06.01.10

- 08.01.10 Vor dem Urknall

- 22.01.10 Zeit & Lichtgeschwindigkeit

- 05.02.10

