

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modulübersicht

- Modul 1: Sonne - Stern unter Sternen - 2010 Februar/März**
- Modul 2: Aufbau des Planetensystems und innere Planeten (Merkur und Venus) - 2010 Mai/Juni**
- Modul 3: Erde und Mond - 2010 August/September**
- Modul 4: Mars - 2010 November/Dezember**
- Modul 5: Jupiter, seine Monde und die Kleinen Körper
2011 Februar/März**
- Modul 6: Saturn und die faszinierende planetarer Monde
2011 Mai/Juni**
- Modul 7: Gasriesen am Rand des Sonnensystems
(Uranus, Neptun und die Welt dahinter)
2011 Juli/September**
- Modul 8: Kometen, Heliosphäre und die Entstehung des
Sonnensystems - 2011 November/Dezember**

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modulübersicht

- Modul 9:** Interstell. Materie und die Entstehung von Sternen
2012 Februar 1, 15, 29
- Modul 10:** Aufbau u. Entwicklung v. Sternen u. ihre Strahlung
2012 Mai 9, 23, Juni 13
- Modul 11:** Die Sonne als Stern in der Milchstraße
2012 Juli 25, September 12, 26
- Modul 12:** Endstadien und Sonderfälle der Sternentwicklung
2012 November 7, 21, Dezember 5
- Modul 13:** Milchstraße
2013 Februar 6, 20, März 6
- Modul 14:** Galaxien, Galaxienhaufen, Dunkle Materie und die
großräumige Struktur des Kosmos
2013 Mai 15, 29, Juni 19

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modulübersicht

- Modul 15:** Radiogalaxien, Quasare und supermassive Schwarze Löcher
2013 November 13, 27, Dezember 11
- Modul 16:** Dimensionen des Weltalls
2014 März 26, April 9, 23
- Modul 17:** Die Struktur des Kosmos
2014 Mai 14, 28, Juni 11
- Modul 18:** Raum-Zeit-Kontinuum, Dunkle Materie und Teilchen
2014 August 27, September 10, 24
- Modul 19:** Modelle des Kosmos
2014 Oktober 22, November 5, 19
- Modul 20:** Entwicklungsphasen des Weltalls, Gesamtschau
2015 (*noch festzulegen*)

**J. Wirths Aktuelle Astronomie -
Einführungskurs**
Entgelte für ein Modul

9 €

**Schüler, Studenten, Auszubildende, Bonn-Ausweis,
Schwerbehinderte: 6 €**

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modul 18: *Raum-Zeit-Kontinuum, Dunkle Materie und Teilchen*

(Themen 4.4, 4.6, 4.7)

Modul 18

Themen

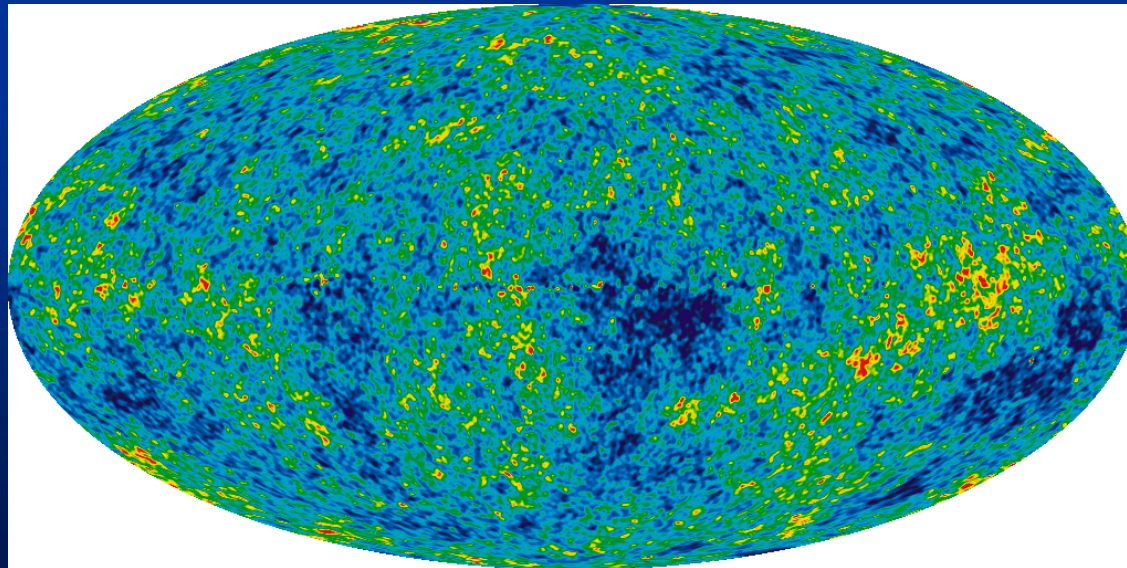
- 4.4 *Was die Welt zusammenhält –
Kräfte und Teilchen*
- 4.6 *Ein Scheibchen Vergangenheit –
Raum-Zeit-Kontinuum und Relativität*
- 4.7 *Absolut relativ –
Einführung in die Relativitätstheorie*

Kräfte und Teilchen

Astronomie und Elementarteilchenphysik

Je mehr man sich dem Urknall annähert,
umso geringer ist die Ausdehnung des Universums und
umso höher ist die Energiedichte, die in ihm herrscht.

Die Zeit, die hier behandelt wird, liegt dabei weit
vor der Entstehung des Mikrowellen-Hintergrundes.

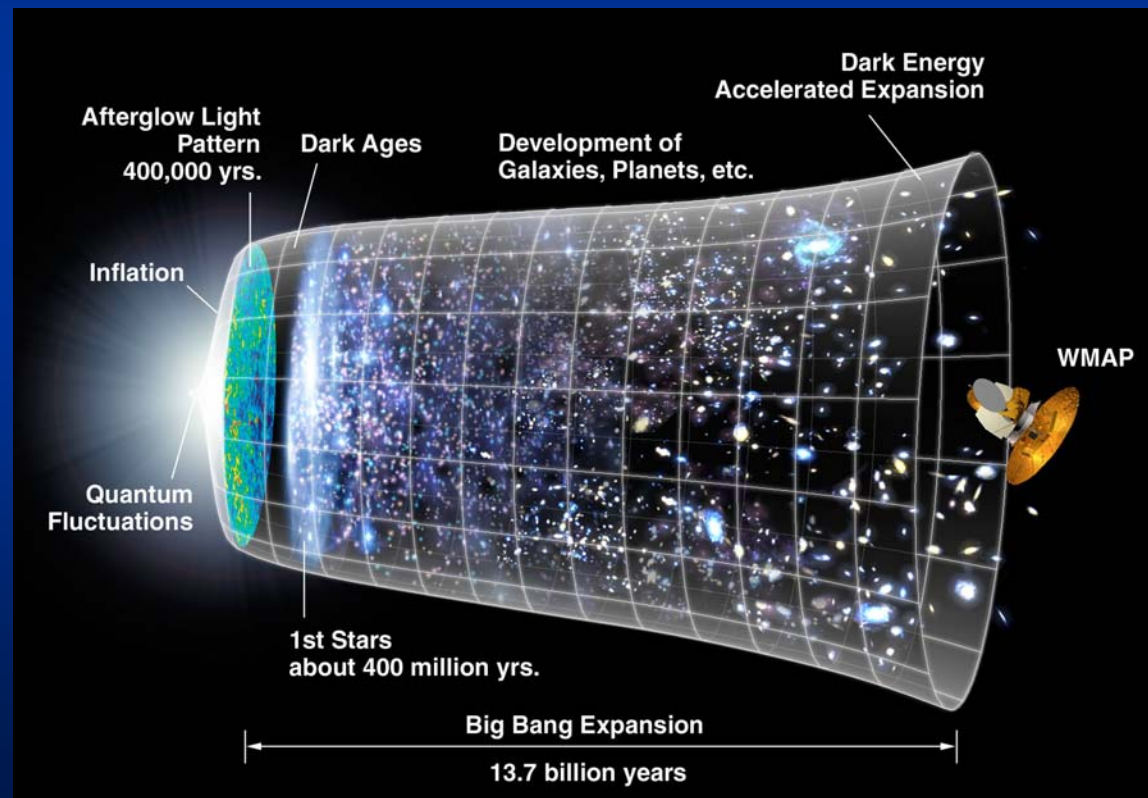


WMAP-Anisotropie

Kräfte und Teilchen

Astronomie und Elementarteilchenphysik

Je mehr man sich dem Urknall annähert,
umso geringer ist die Ausdehnung des Universums und
umso höher ist die Energiedichte, die in ihm herrscht.

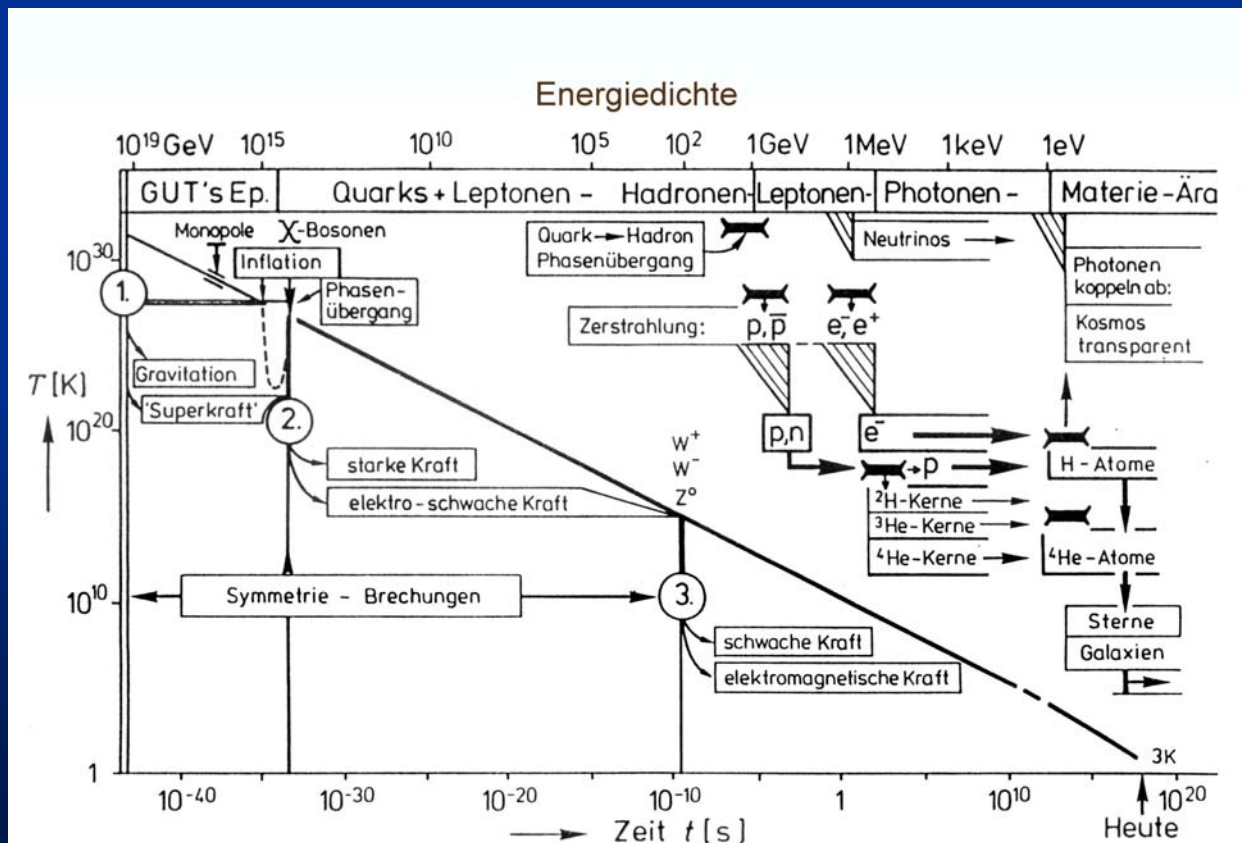


Quelle: NASA

Kräfte und Teilchen

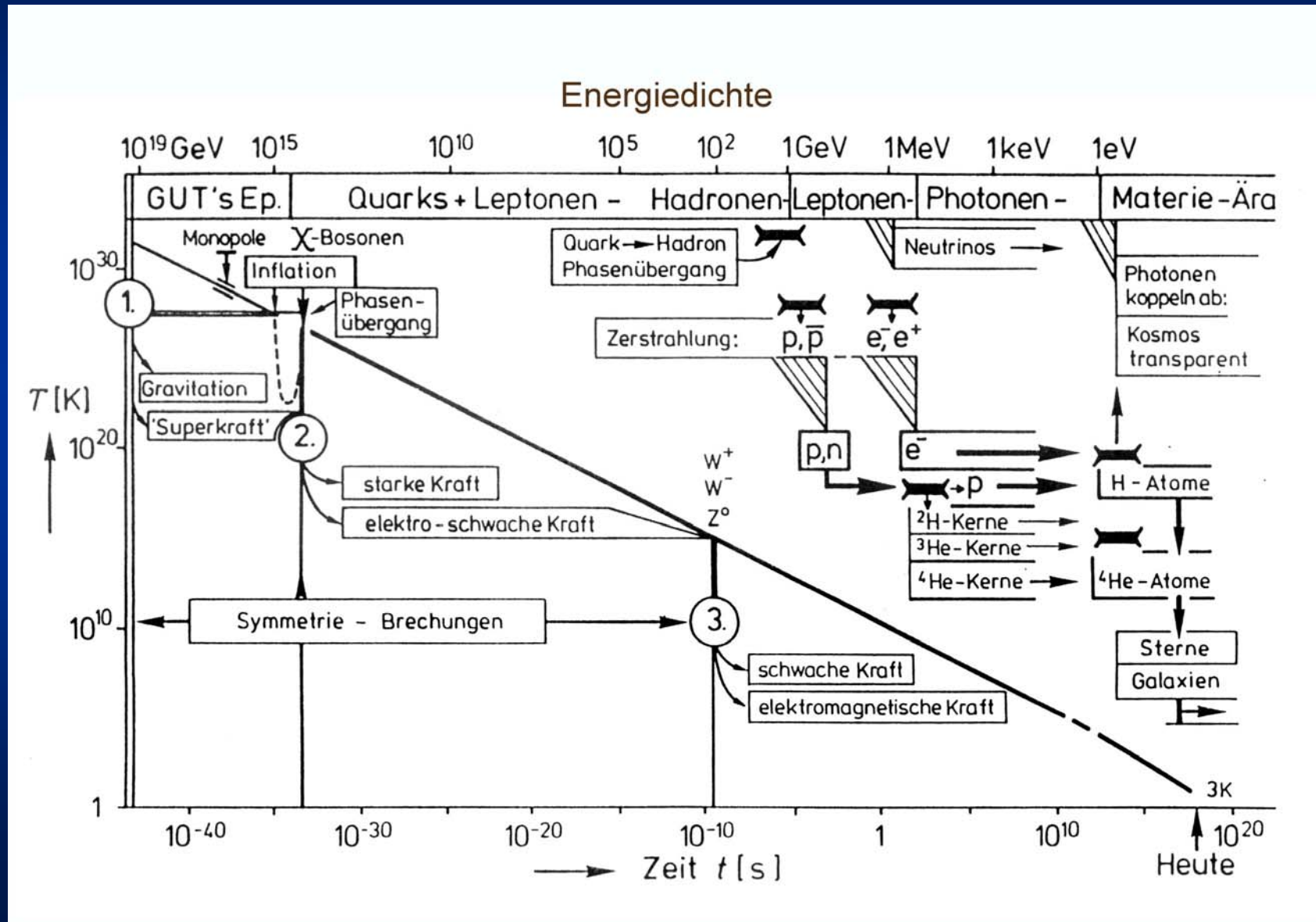
Astronomie und Elementarteilchenphysik

Hier wird jedoch nicht die räumliche Expansion des Universums betrachtet, sondern die zeitliche Entwicklung von Temperatur und Energiedichte.



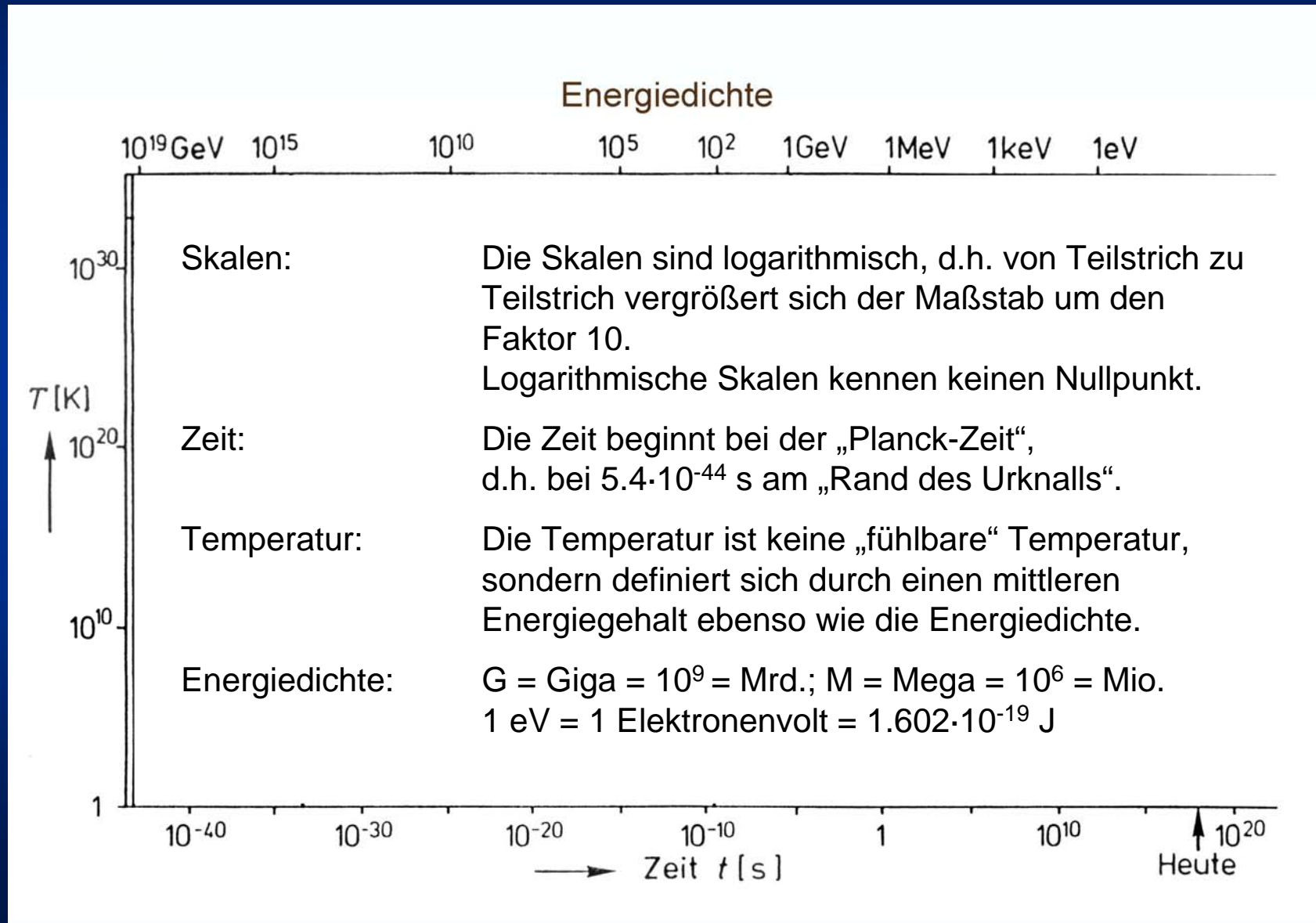
Kräfte und Teilchen

Astronomie und Elementarteilchenphysik



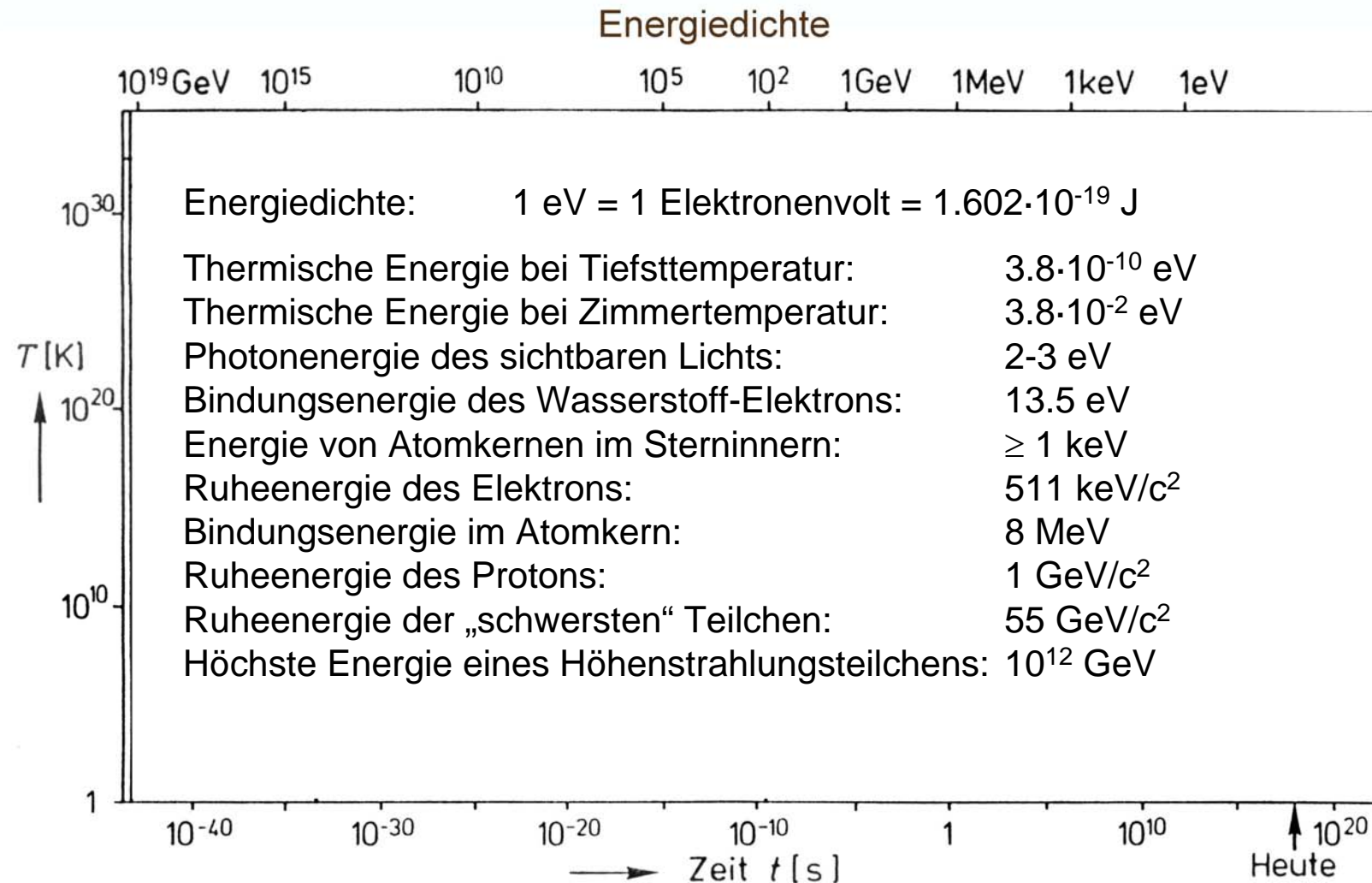
Kräfte und Teilchen

Astronomie und Elementarteilchenphysik



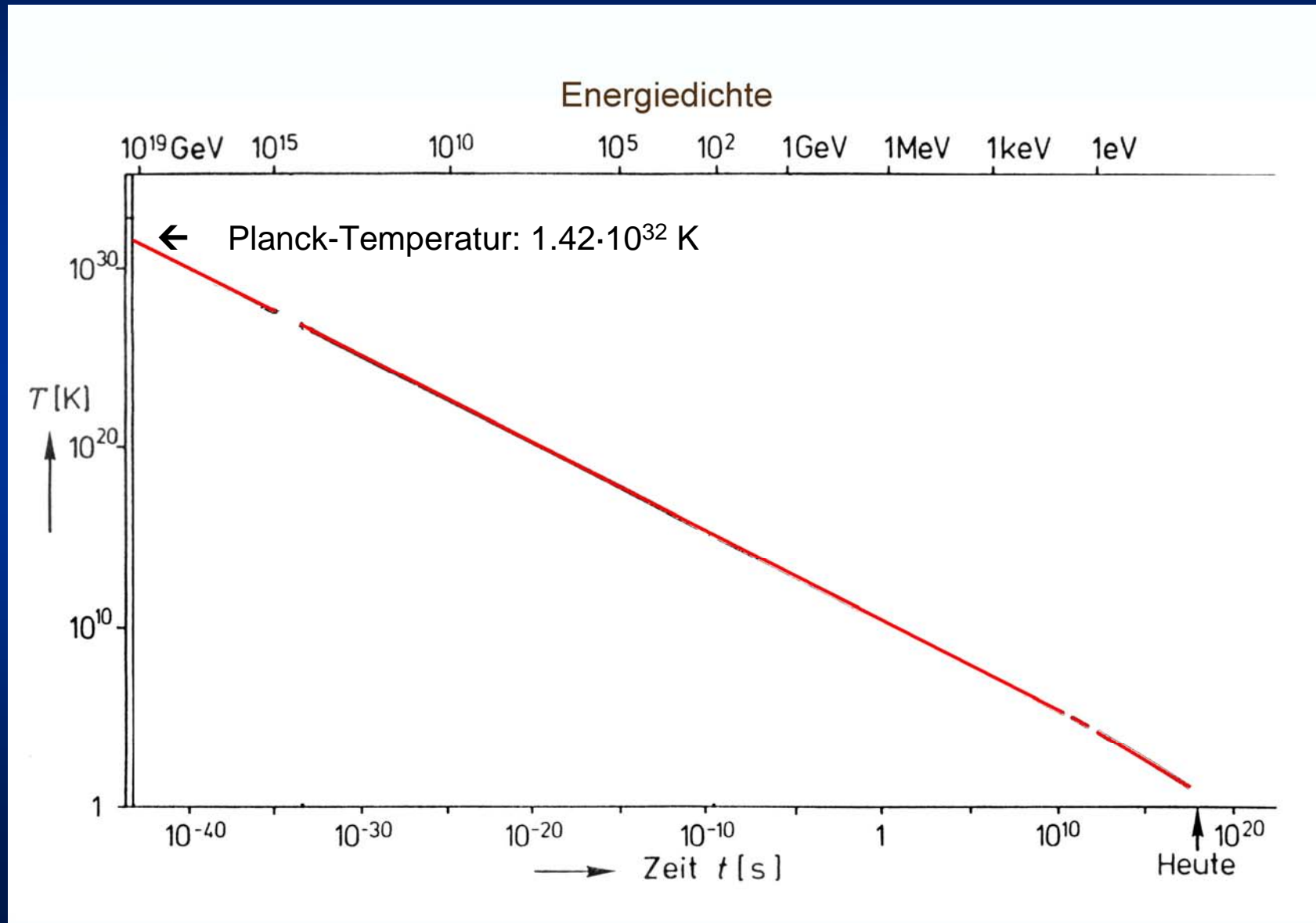
Kräfte und Teilchen

Astronomie und Elementarteilchenphysik



Kräfte und Teilchen

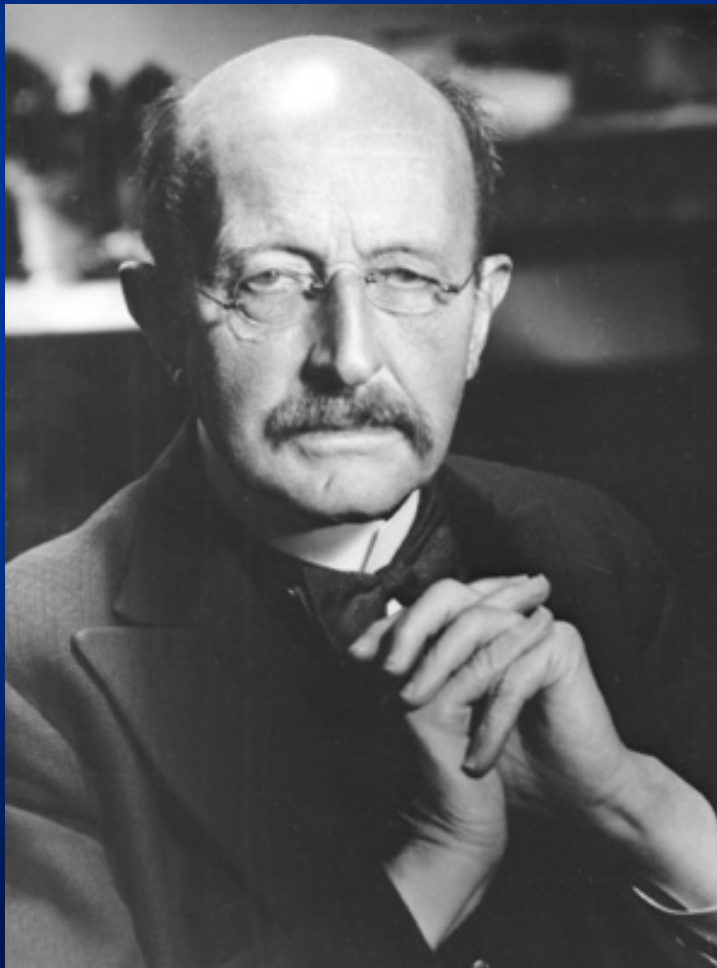
Astronomie und Elementarteilchenphysik



Kräfte und Teilchen

Planck-Einheiten

Definiert von Max Planck im Jahr 1899 bilden die Planck-Einheiten ein System von Zahlen, die sich aus Naturkonstanten ableiten.



SITZUNGSBERICHTE
DER
KÖNIGLICH PREUSSISCHEN
AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
ZU BERLIN.
JAHRGANG 1899.
ERSTER HALBBAND. JANUAR BIS JUNI.
STÜCK 1—XXXII MIT FÜNF TAFELN
UND DEM VERZEICHNISS DER MITGLIEDER AM 1. JANUAR 1899.
BERLIN 1899.
VERLAG DER KÖNIGLICHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN.
IN COMMISSION BEI GEORG REIMER.

Kräfte und Teilchen

Planck-Einheiten

Definiert von Max Planck im Jahr 1899 bilden die Planck-Einheiten ein System von Zahlen, die sich aus Naturkonstanten ableiten.

„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

Über irreversible Strahlungsvorgänge.

VON MAX PLANCK.

Fünfte Mittheilung (Schluss).

Einleitung.

Die nachfolgende Abhandlung bildet den Abschluss der von mir in den letzten beiden Jahren unter dem obigen Titel der Akademie vorgelegten Mittheilungen.¹ Ich hatte diese Untersuchungen begonnen mit der Absicht, in den Process der Emission und Absorption von Wärmestrahlen und den dadurch bedingten Temperaturausgleich vom Standpunkt der elektromagnetischen Lichttheorie aus nähere Einblicke zu gewinnen. Zu diesem Zwecke entwickelte ich zunächst eine Theorie der Wechselwirkung beliebiger elektromagnetischer, im Vacuum fortschreitender Wellen und eines von diesen Wellen getroffenen, auf eine bestimmte Periode ansprechenden elementaren Resonators, dessen Dämpfung lediglich durch die von ihm ausgestrahlte Energie bewirkt wird. Hierzu genügt eine einfache Anwendung des POYNTING'schen Satzes der Energiestromung.

Nimmt man weiter das elektromagnetische Feld rings durch vollkommen spiegelnde Wände begrenzt an, so hat man ein vollständig abgeschlossenes System, und die Vorgänge in diesem System sind durch den Anfangszustand für alle Zeiten bestimmt.

Um die Verhältnisse klarer zu übersehen, untersuchte ich zuerst den speciellen Fall, dass der spiegelnde Hohlraum kugelförmig ist und dass der Resonator sich im Mittelpunkt der Kugel befindet. Dann ist ein Vorgang möglich, bei dem sich concentrische Kugelwellen nach innen und aussen fortpflanzen; die entsprechenden Differentialgleichungen lassen sich in einfacher Weise integrieren.

In dieser letzten Mittheilung nun behandle ich den allgemeineren Fall, dass beliebige elektromagnetische Wellen nach beliebigen Richtungen fortschreiten und dass der spiegelnde Hohlraum beliebig

¹ Diese Berichte, Sitzungen vom 4. Februar 1897, 8. Juli 1897, 16. December 1897 und 7. Juli 1898.

Ferner ist von Hrn. F. PÄSCHEN¹ als Mittel aus seinen besten Beobachtungen der Werth der Constanten im Exponenten der WIEN'schen Formel (55) zu 14455 [$\mu \times$ Celsiusgrad] angegeben worden. Diess ergibt, bezogen auf cm:

$$ac = 1.4455$$

oder:

$$a = 0.4818 \cdot 10^{-10} [\text{sec} \times \text{Celsiusgrad}]$$

und daraus nach (57):

$$b = 6.885 \cdot 10^{-33} [\text{erg} \times \text{sec}].$$

§ 26. Natürliche Maasseinheiten.

Alle bisher in Gebrauch genommenen physikalischen Maasssysteme, auch das sogenannte absolute C. G. S.-System, verdanken ihren Ursprung insofern dem Zusammentreffen zufälliger Umstände, als die Wahl der jedem System zu Grunde liegenden Einheiten nicht nach allgemeinen, nothwendig für alle Orte und Zeiten bedeutungsvollen Gesichtspunkten, sondern wesentlich mit Rücksicht auf die speciellen Bedürfnisse unserer irdischen Cultur getroffen ist. So sind die Einheiten der Länge und der Zeit aus den gegenwärtigen Dimensionen und der gegenwärtigen Bewegung unseres Planeten hergeleitet worden, ferner die Einheit der Masse und der Temperatur aus der Dichte und den Fundamentalpunkten des Wassers, als derjenigen Flüssigkeit, die an der Erdoberfläche die wichtigste Rolle spielt, genommen bei einem Druck, der der mittleren Beschaffenheit der uns umgebenden Atmosphäre entspricht. An dieser Willkür würde principiell auch nichts Wesentliches geändert werden, wenn etwa zur Längeneinheit die unveränderliche Wellenlänge des Na-Lichtes genommen würde. Denn die Auswahl gerade des Na unter den vielen chemischen Elementen könnte wiederum nur etwa durch sein häufiges Vorkommen auf der Erde oder etwa durch seine glänzende Doppellinie, die keineswegs einzig in ihrer Art dasteht, gerechtfertigt werden. Es wäre daher sehr wohl denkbar, dass zu einer anderen Zeit, unter veränderten äusseren Bedingungen, jedes der bisher in Gebrauch genommenen Maasssysteme seine ursprüngliche natürliche Bedeutung theilweise oder gänzlich verlieren würde.

Dem gegenüber dürfte es nicht ohne Interesse sein zu bemerken, dass mit Zuhilfenahme der beiden in dem Ausdruck (41) der Strahlungsentropie auftretenden Constanten a und b die Möglichkeit gegeben ist, Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur aufzustellen, welche, unabhängig von speciellen Körpern oder Substanzen, ihre Bedeutung für alle Zeiten und für alle, auch ausserirdische und

¹ Diese Berichte, Sitzung vom 27. April 1899.

aussermenschliche Culturen nothwendig behalten und weiche daher als »natürliche Maasseinheiten« bezeichnet werden können.

Die Mittel zur Festsetzung der vier Einheiten für Länge, Masse, Zeit und Temperatur werden gegeben durch die beiden erwähnten Constanten a und b , ferner durch die Grösse der Lichtfortpflanzungsgeschwindigkeit c im Vacuum und durch die der Gravitationsconstante f . Bezogen auf Centimeter, Gramm, Secunde und Celsiusgrad sind die Zahlenwerthe dieser vier Constanten die folgenden:

$$a = 0.4818 \cdot 10^{-10} [\text{sec} \times \text{Celsiusgrad}]$$

$$b = 6.885 \cdot 10^{-33} \left[\frac{\text{cm}^2 \text{gr}}{\text{sec}} \right]$$

$$c = 3.00 \cdot 10^{10} \left[\frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right]$$

$$f = 6.685 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{gr. sec}^2} \right]^1.$$

Wählt man nun die »natürlichen Einheiten« so, dass in dem neuen Maasssystem jede der vorstehenden vier Constanten den Werth 1 annimmt, so erhält man als Einheit der Länge die Grösse:

$$\sqrt{\frac{bf}{c^3}} = 4.13 \cdot 10^{-33} \text{ cm.}$$

als Einheit der Masse:

$$\sqrt{\frac{bc}{f}} = 5.56 \cdot 10^{-3} \text{ gr.}$$

als Einheit der Zeit:

$$\sqrt{\frac{bf}{c^3}} = 1.38 \cdot 10^{-42} \text{ sec.}$$

als Einheit der Temperatur:

$$a \sqrt{\frac{c}{bf}} = 3.50 \cdot 10^{32} \text{ Cels.}$$

* Diese Grössen behalten ihre natürliche Bedeutung so lange bei, als die Gesetze der Gravitation, der Lichtfortpflanzung im Vacuum und die beiden Hauptsätze der Wärmetheorie in Gültigkeit bleiben, sie müssen also, von den verschiedensten Intelligenzen nach den verschiedensten Methoden gemessen, sich immer wieder als die nämlichen ergeben.

¹ F. RICHARZ und O. KRIGAR-MENZEL, Anhang zu den Abhandlungen dieser Akademie vom Jahre 1898 S. 110, im Auszug: Wied. Ann. 66, S. 190, 1898.

Ausgegeben am 1. Juni.

Kräfte und Teilchen

Planck-Einheiten

Definiert von Max Planck im Jahr 1899 bilden die Planck-Einheiten ein System von Zahlen, die sich aus Naturkonstanten ableiten.

In dem Artikel entwickelt er auf theoretischer Grundlage detailliert die Theorie eines elektromagnetischen Schwarzen Strahlers in Form eines „Resonators“ in einem Strahlungsfeld, der Energie absorbiert und wieder re-emittiert.

In Zusammenhang mit den von Gustav Robert Kirchhoff und Wilhelm Wien abgeleiteten Gesetzen zur thermodynamischen Bedeutung elektromagnetischer Strahlung und ihrer Abhängigkeit von der Temperatur nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz folgert er daraus die Plancksche Strahlungsformel für einen Schwarzen Strahler.

Im Zuge dieser theoretischen Ableitung stößt er auf Konstanten, die es ihm ermöglichen, die bis dahin willkürlich definierten Einheiten der Länge, Masse, Zeit und Temperatur auf sogenannte „natürliche“ Einheiten zurück zu führen, die ausschließlich auf Naturkonstanten basieren.

Kräfte und Teilchen

Planck-Einheiten

Definiert von Max Planck im Jahr 1899 bilden die Planck-Einheiten ein System von Zahlen, die sich aus Naturkonstanten ableiten.

Planck-Masse:

$$m_p = \sqrt{\frac{hc}{2\pi G}} = 2.18 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

Planck-Länge:

$$l_p = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}} = 1.62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Planck-Zeit:

$$t_p = \frac{l_p}{c} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^5}} = 5.39 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

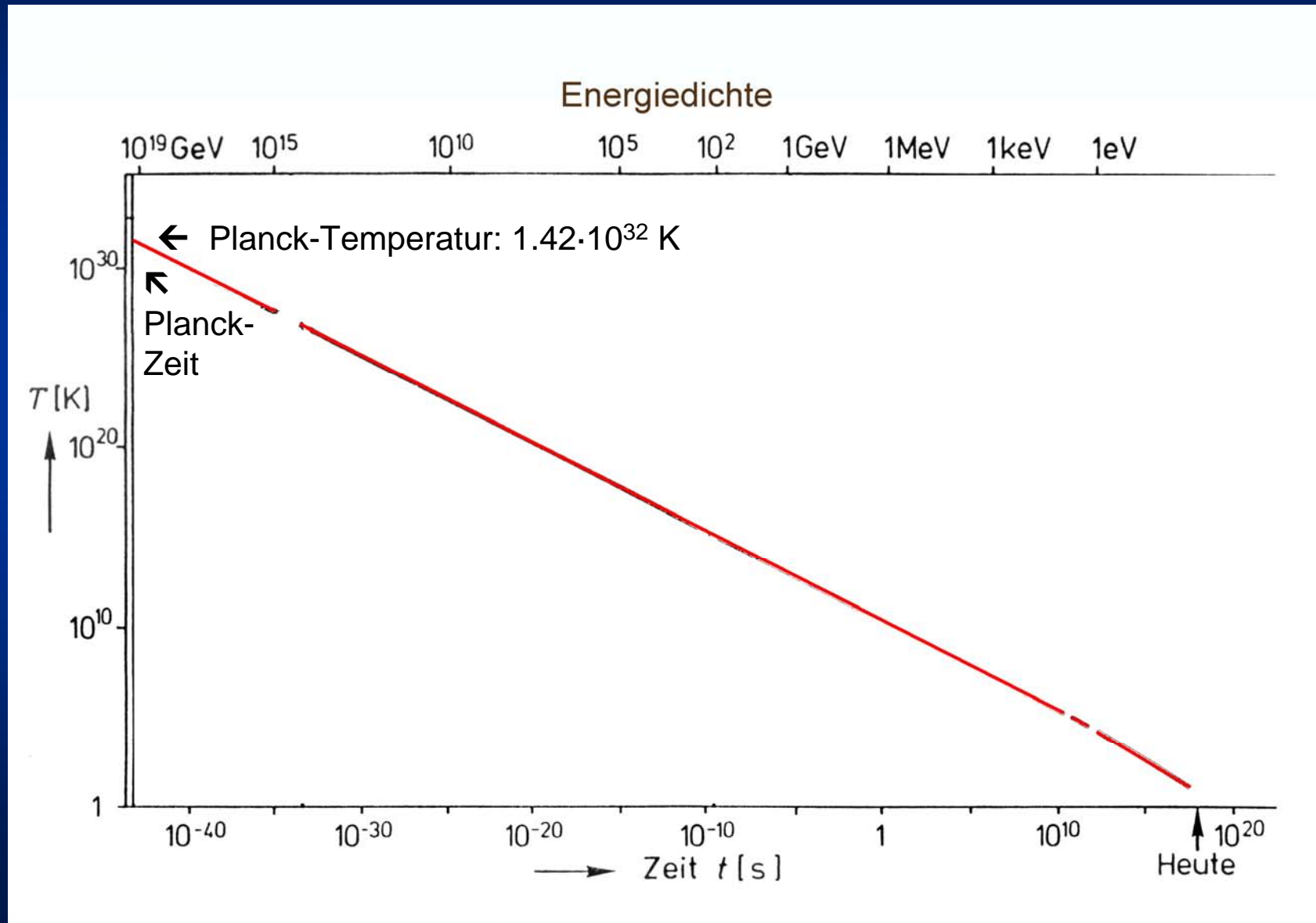
Planck-Temperatur:

$$T_p = \frac{m_p c^2}{k} = 1.42 \cdot 10^{32} \text{ K}$$

c: Lichtgeschwindigkeit
G: Gravitationskonstante
h: Plancksches Wirkungsquantum
k: Boltzmann-Konstante

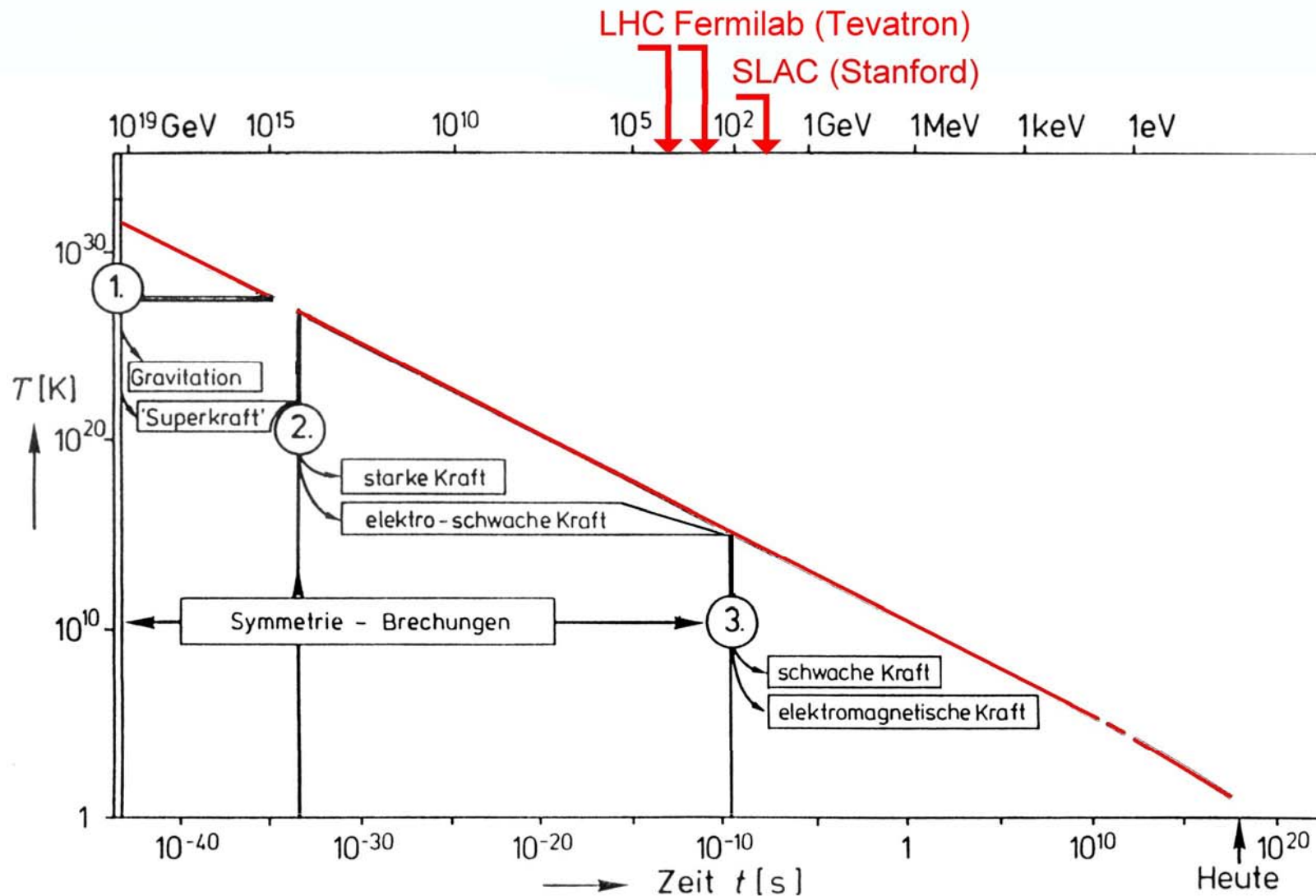
Kräfte und Teilchen

Astronomie und Elementarteilchenphysik



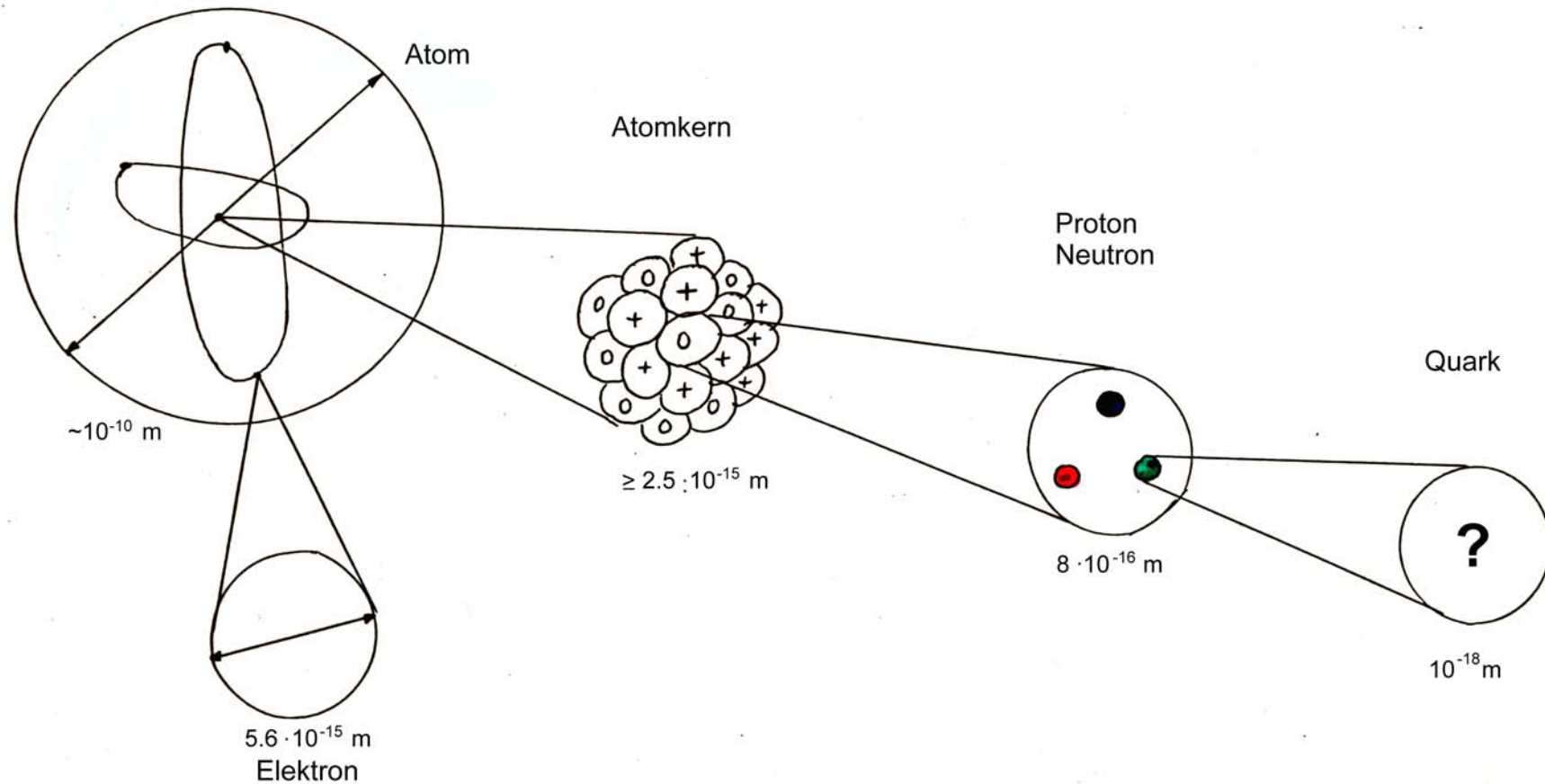
Kräfte und Teilchen

Astronomie und Elementarteilchenphysik



Kräfte und Teilchen

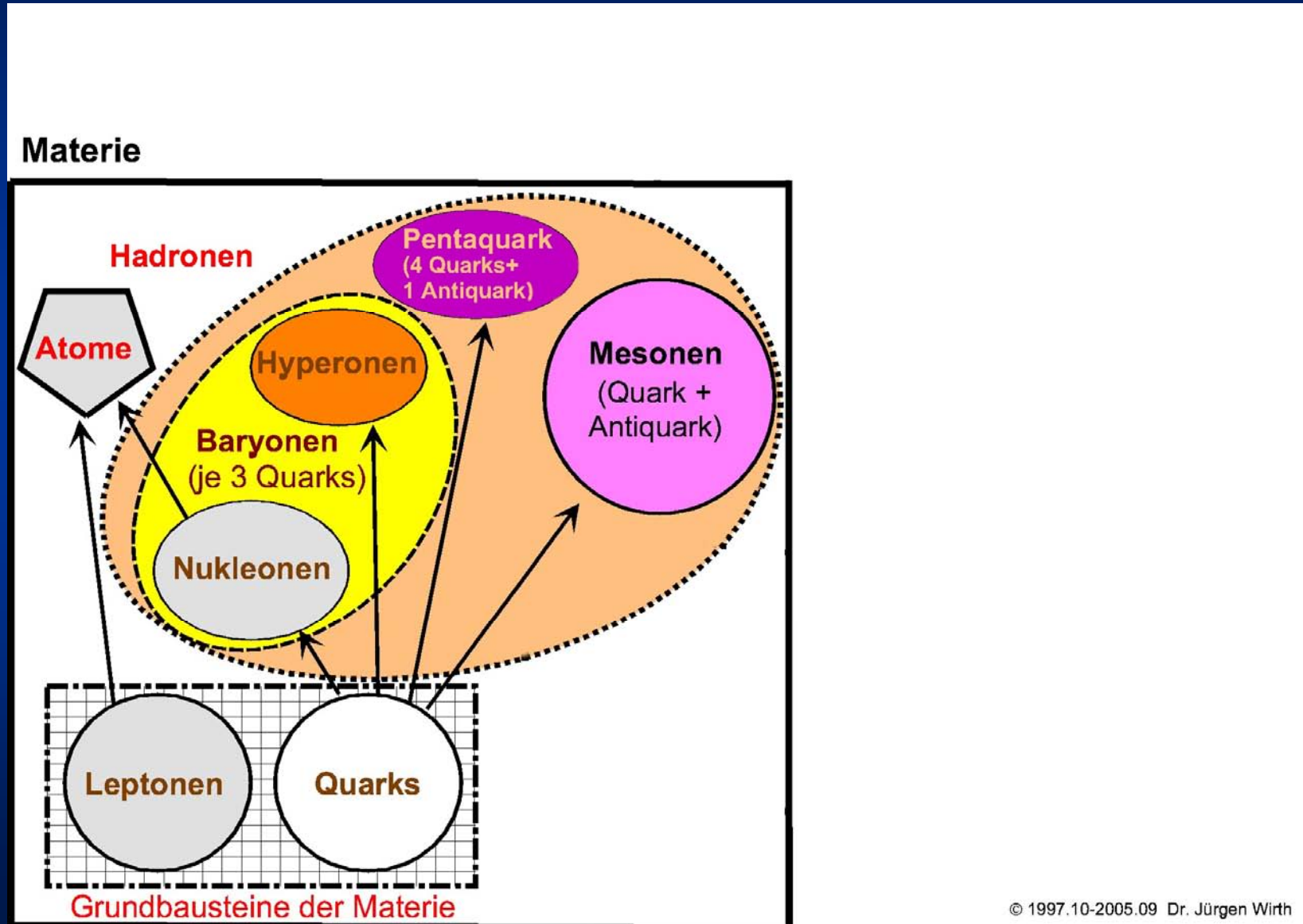
Aufbau der Materie



Massen: $M_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ kg
 $M_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ kg
Ladung: $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Energie: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J

Kräfte und Teilchen

Aufbau der Materie



Kräfte und Teilchen

System der Elementarteilchen

System der Elementarteilchen 1

Gruppe	Name / Geschmack	Ze	$m_0[\text{MeV}/c^2]$	J	Q	L	N_μ	A	I	S	C	B	T	τ [s]
Quarks <i>Partonen</i> (in je 3 Farben bzw. Anti- farben)	up	u	5.6	$\pm 1/2$	$+2/3$	0	0	$+1/3$	$+1/2$	0	0	0	0	∞
		\bar{u}	5.6	$\pm 1/2$	$-2/3$	0	0	$-1/3$	$-1/2$	0	0	0	0	∞
	down	d	9.9	$\pm 1/2$	$-1/3$	0	0	$+1/3$	$-1/2$	0	0	0	0	∞
		\bar{d}	9.9	$\pm 1/2$	$+1/3$	0	0	$-1/3$	$+1/2$	0	0	0	0	∞
	strange	s	199	$\pm 1/2$	$-1/3$	0	0	$+1/3$	0	-1	0	0	0	$5 \cdot 10^{-8}$
		\bar{s}	199	$\pm 1/2$	$+1/3$	0	0	$-1/3$	0	+1	0	0	0	$5 \cdot 10^{-8}$
	charm	c	1'350	$\pm 1/2$	$+2/3$	0	0	$+1/3$	0	0	+1	0	0	$\sim 10^{-12}$
		\bar{c}	1'350	$\pm 1/2$	$-2/3$	0	0	$-1/3$	0	0	-1	0	0	$\sim 10^{-12}$
	bottom	b	4'300(200)	$\pm 1/2$	$-1/3$	0	0	$+1/3$	0	0	0	-1	0	$1.5 \cdot 10^{-12}$
		\bar{b}	4'300(200)	$\pm 1/2$	$+1/3$	0	0	$-1/3$	0	0	0	+1	0	$1.5 \cdot 10^{-12}$
	top	t	174'300(5'100)	$\pm 1/2$	$+2/3$	0	0	$+1/3$	0	0	0	0	+1	$\sim 6.6 \cdot 10^{-25}$
		\bar{t}	174'300(5'100)	$\pm 1/2$	$-2/3$	0	0	$-1/3$	0	0	0	0	-1	$\sim 6.6 \cdot 10^{-25}$

J: Spin (Eigendrehung)	S: Strangeness
Q: Ladung	C: Charm
L: Leptonenzahl	B: Beauty / Bottomness
N_μ : Müonenzahl	T: Truth / Topness
A: Baryonenzahl	τ : mittlere Lebensdauer
I: Isospin	In der zweite Zeile jeweils das Anti-Teilchen \bar{x} .

Kräfte und Teilchen

System der Elementarteilchen

System der Elementarteilchen 1

Gruppe	Name / Geschmack	Ze	$m_0[\text{MeV}/c^2]$	J	Q	L	N_μ	A	I	S	C	B	T	τ [s]
Leptonen	Elektron-Neutrino	ν_e	$\leq 0.000'000'03$	-1/2	0	+1	0	0						∞
		$\bar{\nu}_e$	$\leq 0.000'000'03$	+1/2	0	-1	0	0						∞
	Elektron	e^-	0.510'999	$\pm 1/2$	-1	+1	0	0						∞
	Positron	e^+	0.510'999	$\pm 1/2$	+1	-1	0	0						∞
	Müon-Neutrino	ν_μ	$< 0.000'000'1$	-1/2	0	+1	+1	0						∞
		$\bar{\nu}_\mu$	$< 0.000'000'1$	+1/2	0	-1	-1	0						∞
	Müon	μ^-	105.66	$\pm 1/2$	-1	+1	+1	0						$2.2 \cdot 10^{-6}$
		μ^+	105.66	$\pm 1/2$	+1	-1	-1	0						$2.2 \cdot 10^{-6}$
	Tau-Neutrino	ν_τ	< 31	-1/2	0	+1	0	0						∞
		$\bar{\nu}_\tau$	< 31	+1/2	0	-1	0	0						∞
Tauon	τ^-	1'777	$\pm 1/2$	-1	+1	0	0						$2.96 \cdot 10^{-13}$	
	τ^+	1'777	$\pm 1/2$	+1	-1	0	0						$2.96 \cdot 10^{-13}$	

J: Spin (Eigendrehung)	S: Strangeness
Q: Ladung	C: Charm
L: Leptonenzahl	B: Beauty / Bottomness
N_μ : Müonenzahl	T: Truth / Topness
A: Baryonenzahl	τ : mittlere Lebensdauer
I: Isospin	In der zweite Zeile jeweils das Anti-Teilchen \bar{x} .

Kräfte und Teilchen

System der Elementarteilchen

System der Elementarteilchen 2

Gruppe	Name	Ze	$m_0[\text{MeV}/c^2]$	J	Q	L	N_μ	A	I	S	C	B	τ [s]
Mesonen <i>Hadronen</i>	Pion	π^+	139.5	0	+1	0	0	0	1	0	0	0	$2.6 \cdot 10^{-8}$
		π^-	139.5	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	$2.6 \cdot 10^{-8}$
		π^0	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$8.4 \cdot 10^{-17}$
	Kaon	K^+	493.7	0	+1	0	0	0	$\frac{1}{2}$	+1	0	0	$1.2 \cdot 10^{-8}$
		K^-	493.7	0	-1	0	0	0	$-\frac{1}{2}$	-1	0	0	$1.2 \cdot 10^{-8}$
		K^0	497.7	0	0	0	0	0	$-\frac{1}{2}$	+1	0	0	$5.2 \cdot 10^{-8}$
		\bar{K}^0	497.7	0	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	-1	0	0	$5.2 \cdot 10^{-8}$
		η^0	547.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$3 \cdot 10^{-19}$
		D^+	1'869.3	0	+1	0	0	0	$\frac{1}{2}$	0	+1	0	$9.2 \cdot 10^{-13}$
		D^-	1'869.3	0	-1	0	0	0	$-\frac{1}{2}$	0	-1	0	$9.2 \cdot 10^{-13}$
		D^0	1'864.6	0	0	0	0	0	$-\frac{1}{2}$	0	+1	0	$4.3 \cdot 10^{-13}$
		\bar{D}^0	1'864.6	0	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	0	-1	0	$4.3 \cdot 10^{-13}$
		D_s^+	1'970.5	0	+1	0	0	0	0	+1	+1	0	$2.8 \cdot 10^{-13}$
		D_s^-	1'970.5	0	-1	0	0	0	0	-1	-1	0	$2.8 \cdot 10^{-13}$
	(c \bar{c})	J/Ψ	3'096.9	0	0	0	0	0	?	0	0	0	$8 \cdot 10^{-21}$
		B^+	5'271.2	0	+1	0	0	0	$\frac{1}{2}$	0	0	+1	$1.4 \cdot 10^{-12}$
		B^-	5'271.2	0	-1	0	0	0	$-\frac{1}{2}$	0	0	-1	$1.4 \cdot 10^{-12}$
		B^0	5'275.2	0	0	0	0	0	$-\frac{1}{2}$	0	0	+1	$1.4 \cdot 10^{-12}$
		\bar{B}^0	5'275.2	0	0	0	0	0	$\frac{1}{2}$	0	0	-1	$1.4 \cdot 10^{-12}$
	(b \bar{b})	Y	9'460.4	0	0	0	0	0	?	0	0	0	$1.3 \cdot 10^{-20}$

Kräfte und Teilchen

System der Elementarteilchen

System der Elementarteilchen 2

Gruppe	Name	Ze	$m_0[\text{MeV}/c^2]$	J	Q	L	N_μ	A	I	S	C	B	τ [s]
Baryonen <i>Hadronen</i>	Proton	p	938.3	$\pm 1/2$	+1	0	0	+1	1/2	0	0	0	$>9 \cdot 10^{39}$
		\bar{p}	938.3	$\pm 1/2$	-1	0	0	-1	-1/2	0	0	0	$>9 \cdot 10^{39}$
Nukleonen	Neutron	n	939.6	$\pm 1/2$	0	0	0	+1	-1/2	0	0	0	886.7(19)
		\bar{n}	939.6	$\pm 1/2$	0	0	0	-1	1/2	0	0	0	886.7(19)
Hyperonen	Λ	Λ	1'115.7	$\pm 1/2$	0	0	0	+1	0	-1	0	0	$2.6 \cdot 10^{-10}$
		$\bar{\Lambda}$	1'115.7	$\pm 1/2$	0	0	0	-1	0	+1	0	0	$2.6 \cdot 10^{-10}$
	Σ^+	Σ^+	1'189.4	$\pm 1/2$	+1	0	0	+1	1	-1	0	0	$8 \cdot 10^{-11}$
		$\bar{\Sigma}^+$	1'189.4	$\pm 1/2$	-1	0	0	-1	-1	+1	0	0	$8 \cdot 10^{-11}$
	Σ^0	Σ^0	1'192.6	$\pm 1/2$	0	0	0	+1	0	-1	0	0	$5.8 \cdot 10^{-20}$
		$\bar{\Sigma}^0$	1'192.6	$\pm 1/2$	0	0	0	-1	0	+1	0	0	$5.8 \cdot 10^{-20}$
	Σ^-	Σ^-	1'197.4	$\pm 1/2$	-1	0	0	+1	-1	-1	0	0	$1.5 \cdot 10^{-10}$
		$\bar{\Sigma}^-$	1'197.4	$\pm 1/2$	+1	0	0	-1	1	+1	0	0	$1.5 \cdot 10^{-10}$
	Ξ^0	Ξ^0	1'314.9	$\pm 1/2$	0	0	0	+1	1/2	-2	0	0	$2.9 \cdot 10^{-10}$
		$\bar{\Xi}^0$	1'314.9	$\pm 1/2$	0	0	0	-1	-1/2	+2	0	0	$2.9 \cdot 10^{-10}$
	Ξ^-	Ξ^-	1'321.3	$\pm 1/2$	-1	0	0	+1	-1/2	-2	0	0	$1.6 \cdot 10^{-10}$
		$\bar{\Xi}^-$	1'321.3	$\pm 1/2$	+1	0	0	-1	1/2	+2	0	0	$1.6 \cdot 10^{-10}$
	Ω^-	Ω^-	1'672.4	$\pm 3/2$	-1	0	0	+1	0	-3	0	0	$8.2 \cdot 10^{-11}$
		$\bar{\Omega}^-$	1'672.4	$\pm 3/2$	+1	0	0	-1	0	+3	0	0	$8.2 \cdot 10^{-11}$
	Λ_c^+	Λ_c^+	2'281.2	$\pm 1/2$	+1	0	0	+1	1/2	0	+1	0	$2.3 \cdot 10^{-13}$
		$\bar{\Lambda}_c^+$	2'281.2	$\pm 1/2$	-1	0	0	-1	1/2	0	-1	0	$2.3 \cdot 10^{-13}$
Pentaquark	θ^+	1'540	$\pm 1/2$	+1	0	0	+1	?	+1	0	0	10^{-20}	
	θ^-	1'540	$\pm 1/2$	-1	0	0	-1	?	-1	0	0	10^{-20}	

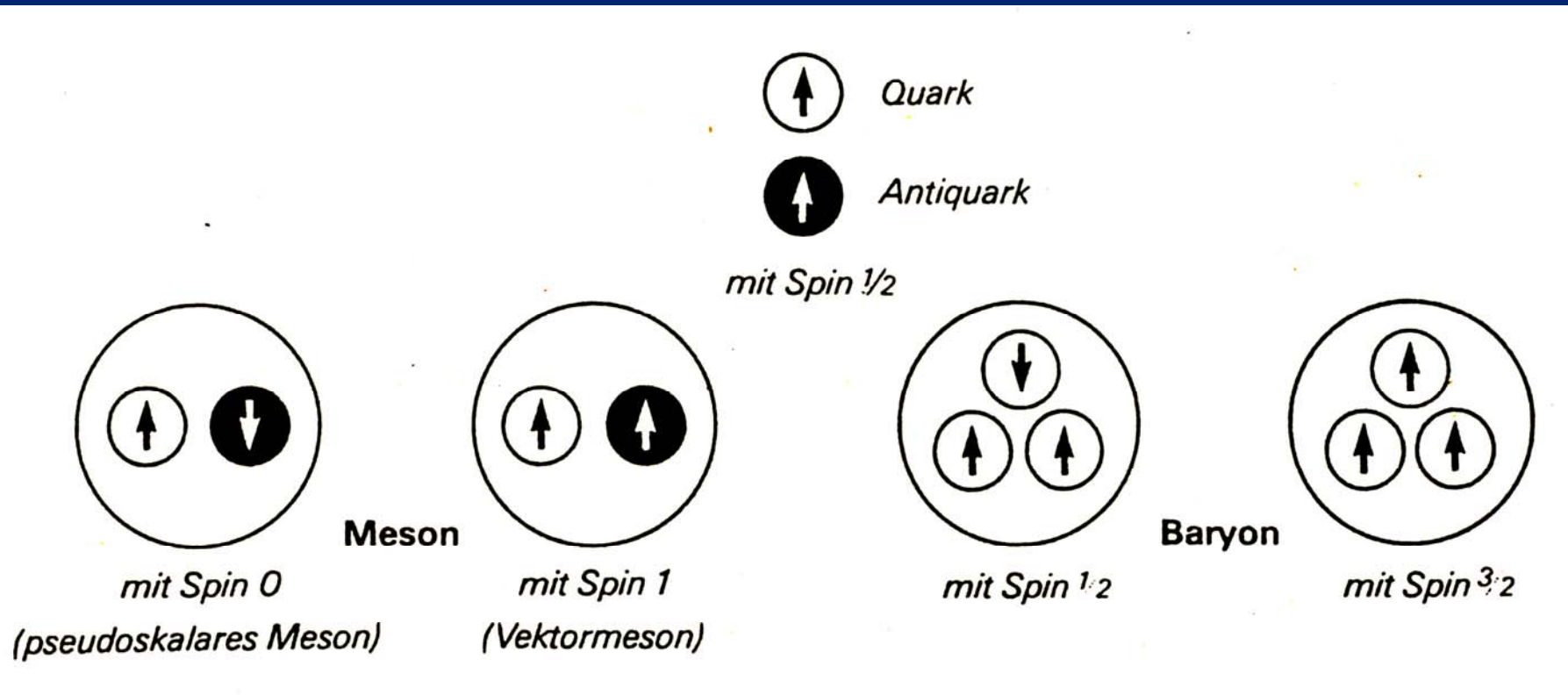
Kräfte und Teilchen

Aufbau der Elementarteilchen

	Geschmack	elektrische Ladung		Geschmack	
	Quarks (in je drei Farben)	up	2/3	0	
down		-1/3	-1	Elektron	
charm		2/3	0	Mü-Neutrino	
strange		-1/3	-1	Müon	
	top?	2/3	0	Tau-Neutrino	
	bottom	-1/3	-1	Tauon	

Kräfte und Teilchen

Aufbau der Elementarteilchen



Die Pfeile deuten in diesem Fall die beiden möglichen Spin-Orientierungen: Spin-Up und Spin-Down an.

Kräfte und Teilchen

Eigenschaften der Elementarteilchen

Der Spin von Elementarteilchen z.B. wird landläufig als Eigendrehung/Rotation verstanden. Aber wie will man feststellen, ob sich Teilchen drehen? Sie müssten dazu ja eine Markierung besitzen, die aber nicht vorhanden ist. Als Spin wird einfach eine Eigenschaft bezeichnet, die allen Baryonen und Leptonen innewohnt, die aber bei Bosonen vorhanden oder auch nicht vorhanden sein kann. Entsprechend wird Baryonen und Leptonen ein halbzahliger Spin zugewiesen, der bei Wechselwirkungen entsprechend den Auswahlregeln nicht verschwinden kann. Ebenso besitzen Quarks keine wirkliche "Farbe", sondern diese Eigenschaft verschwindet, wenn man wie bei realer (Licht-) Farbe die drei Grundtöne (RGB) addiert. Derartige Bezeichnungen sollen es ermöglichen, durch die Anlehnung an die erfahrbare Welt intuitiver mit abstrakten Eigenschaften umzugehen.

Kräfte und Teilchen

Eigenschaften der Elementarteilchen

Um Teilchen, die sich unterschiedlich verhalten, unterscheiden zu können, müssen neue Eigenschaften definiert und irgendwie benannt werden. Beispiel: die Benennung der Quarks. Will man z.B. die Gesichter von Menschen unterscheiden, so schaut man nach der Augenfarbe, der Haarfarbe, der Gesichtsförm. Reicht das nicht, so muss man nach anderen Eigenschaften suchen: Nasenlänge, Form der Wangen usw.

Quarks wurden 1964 durch Murray Gell-Mann postuliert, der dafür 1969 den Nobelpreis für Physik erhielt. Den Namen wählte er nach dem Satz: „Three quarks for Muster Mark“ aus dem Roman „Finnegans Wake“ von James Joyce.

Kräfte und Teilchen

Aufbau der Elementarteilchen

Wie kann man den inneren „Aufbau“ oder die „Zusammensetzung“ von Elementarteilchen bestimmen?

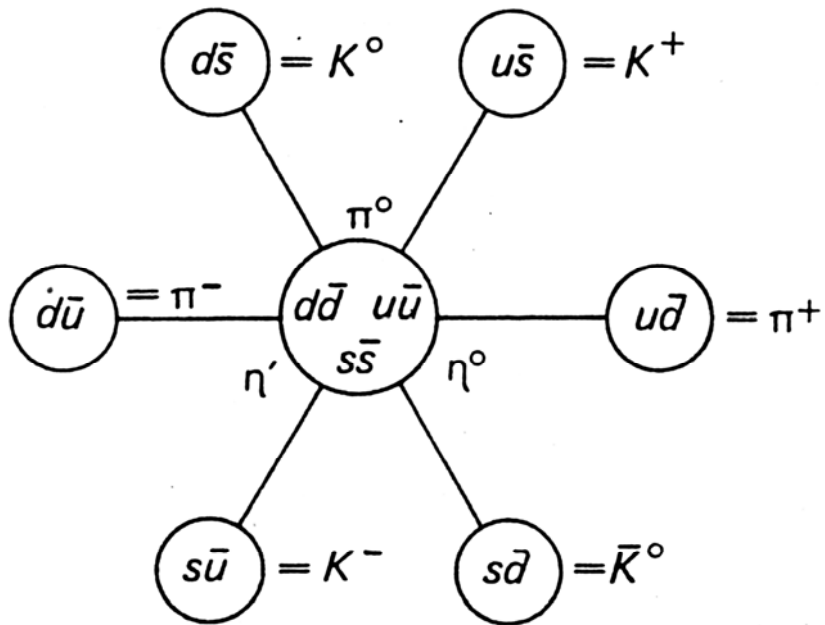
Dies geschieht durch Bestimmung ihrer äußeren Eigenschaften, der Art, wie sie an Wechselwirkungsprozessen teilnehmen und anhand ihrer Zerfallsprodukte.

Die Quark-Zusammensetzung der Hadronen kann so nur indirekt bestimmt werden, da noch nie freie Quarks beobachtet worden sind. Sie sind im sogenannten „Quark-Confinement“ eingeschlossen, das bis jetzt theoretisch noch nicht abschließend erfasst ist.

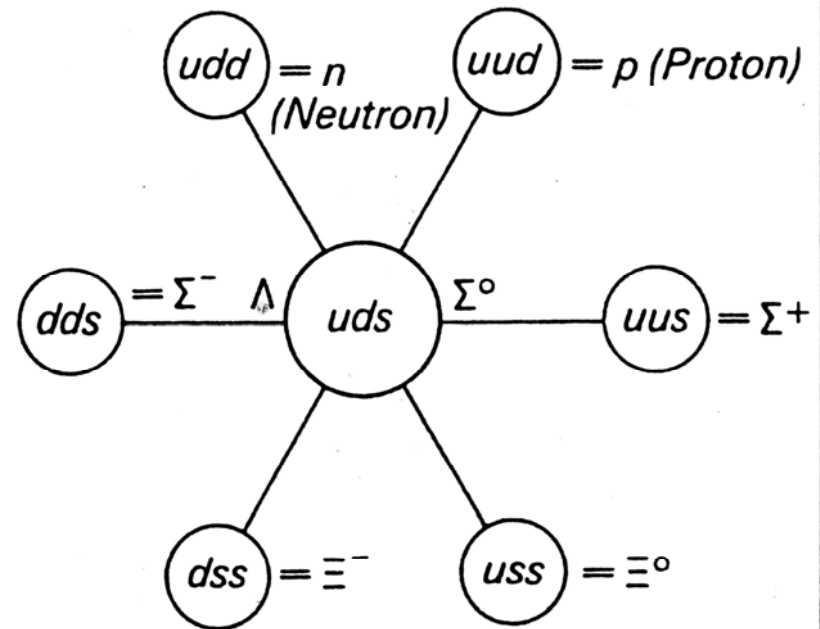
Kräfte und Teilchen

Aufbau der Elementarteilchen

9 Mesonen mit Spin 0

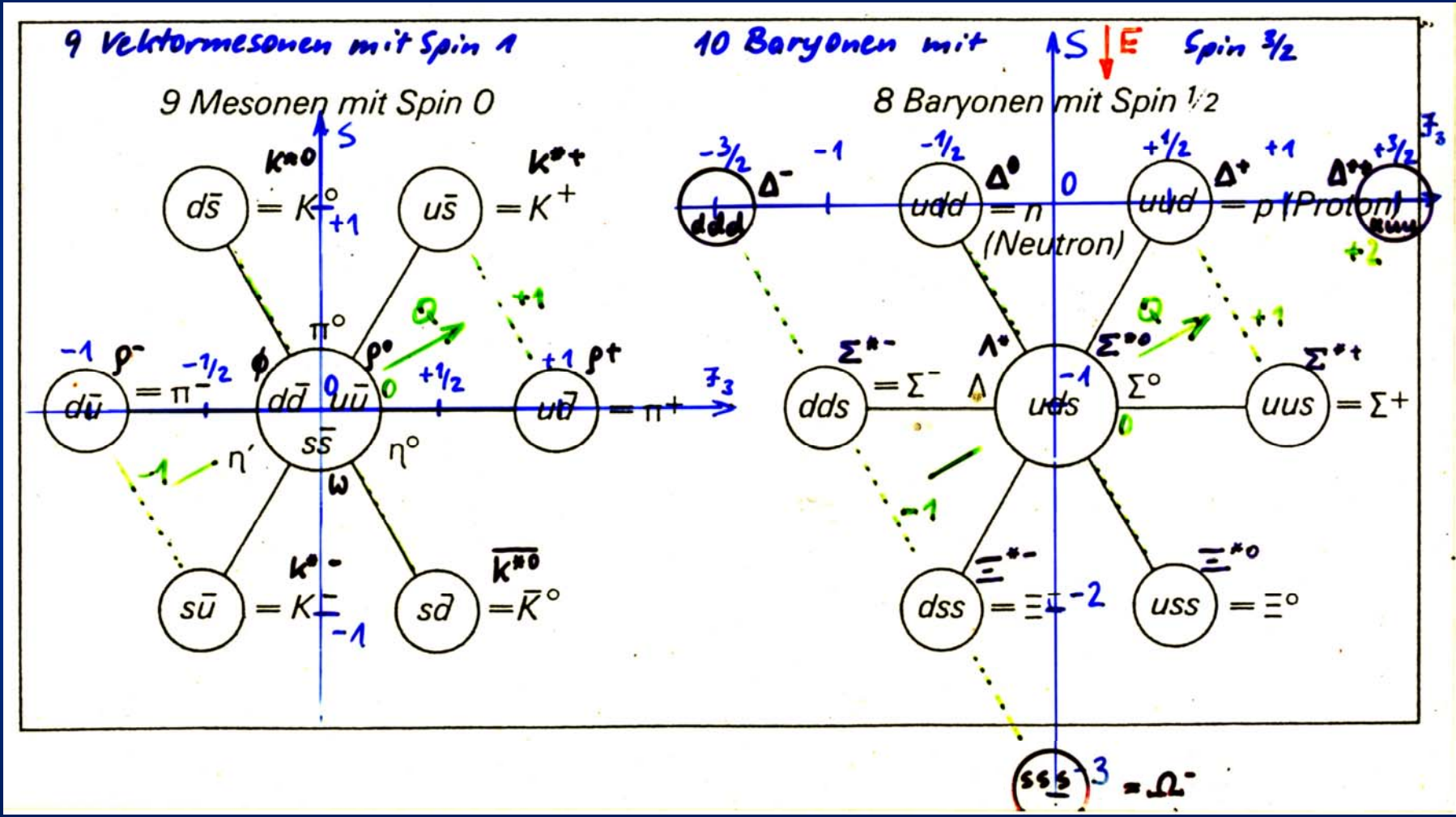


8 Baryonen mit Spin 1/2



Kräfte und Teilchen

Aufbau der Elementarteilchen

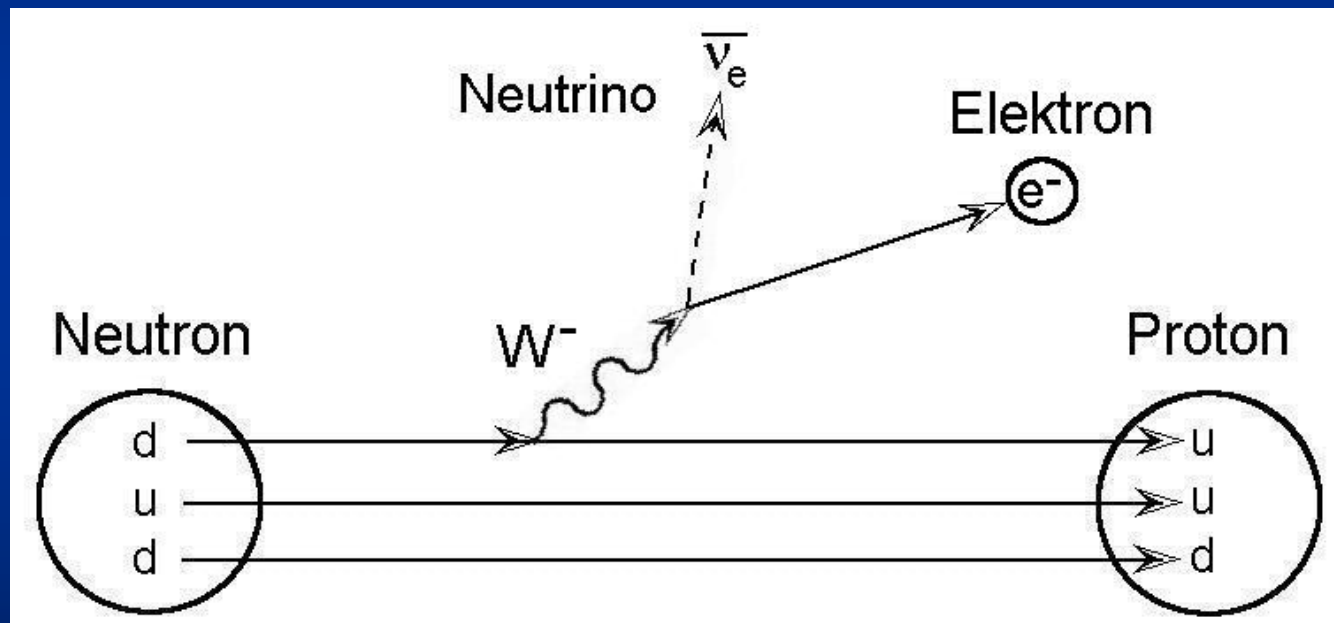


Kräfte und Teilchen

Stabilität der Materie

Neutronenzerfall

Freie Neutronen zerfallen in einem Beta-(minus-)Zerfall (schwache Wechselwirkung) mit einer Halbwertszeit von $\tau = 886.17$ s.



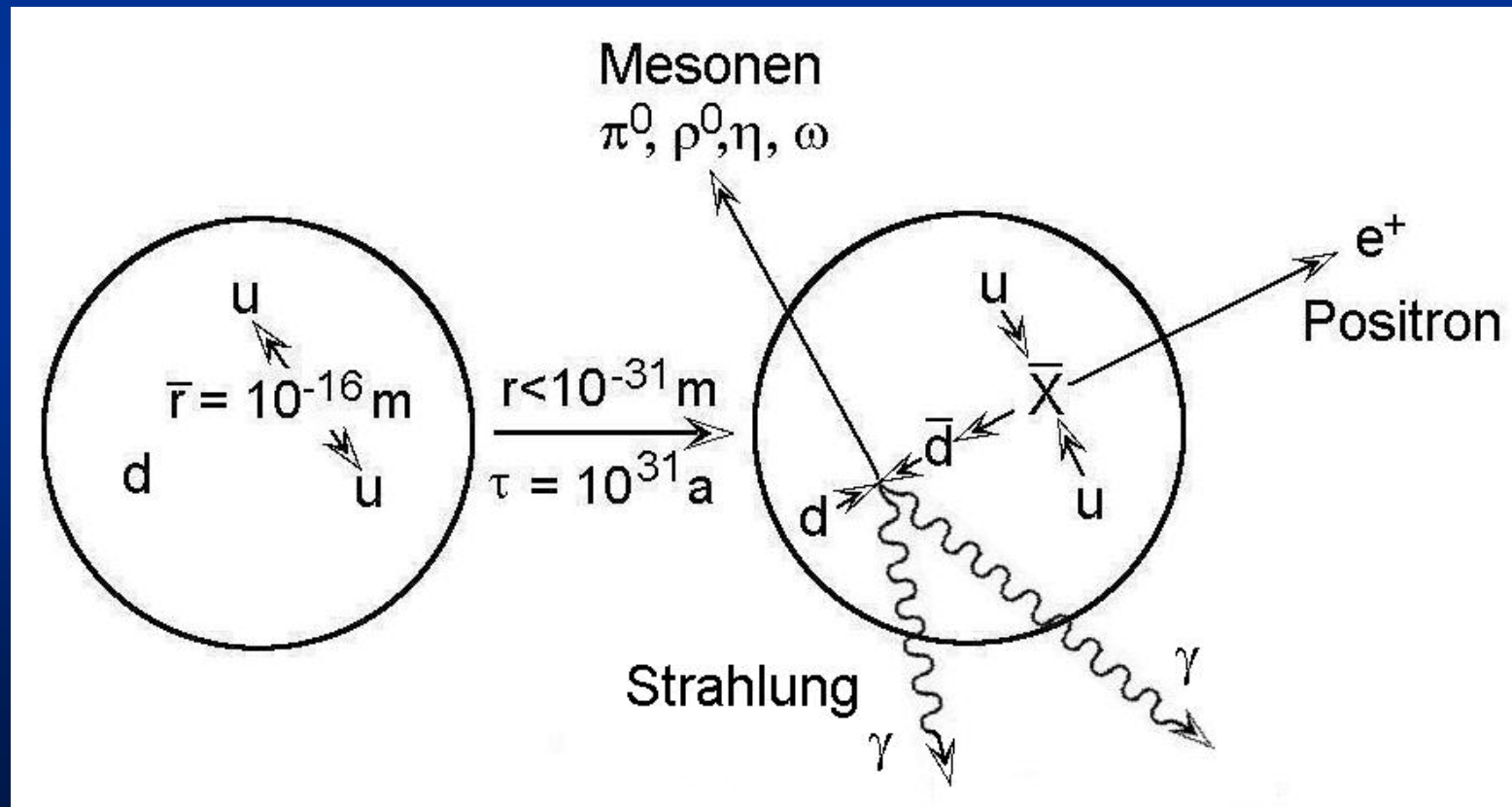
Das bekannte Universum existiert daher nur, weil frühzeitig genug freie Neutronen in Deuterium gebunden wurden, da die Bindungsenergie des Deuteriums-Kerns mit 2.2 MeV erheblich größer ist als die Energiemenge, die beim Beta-Zerfall mit 0.78 MeV zur Verfügung steht.

Kräfte und Teilchen

Stabilität der Materie

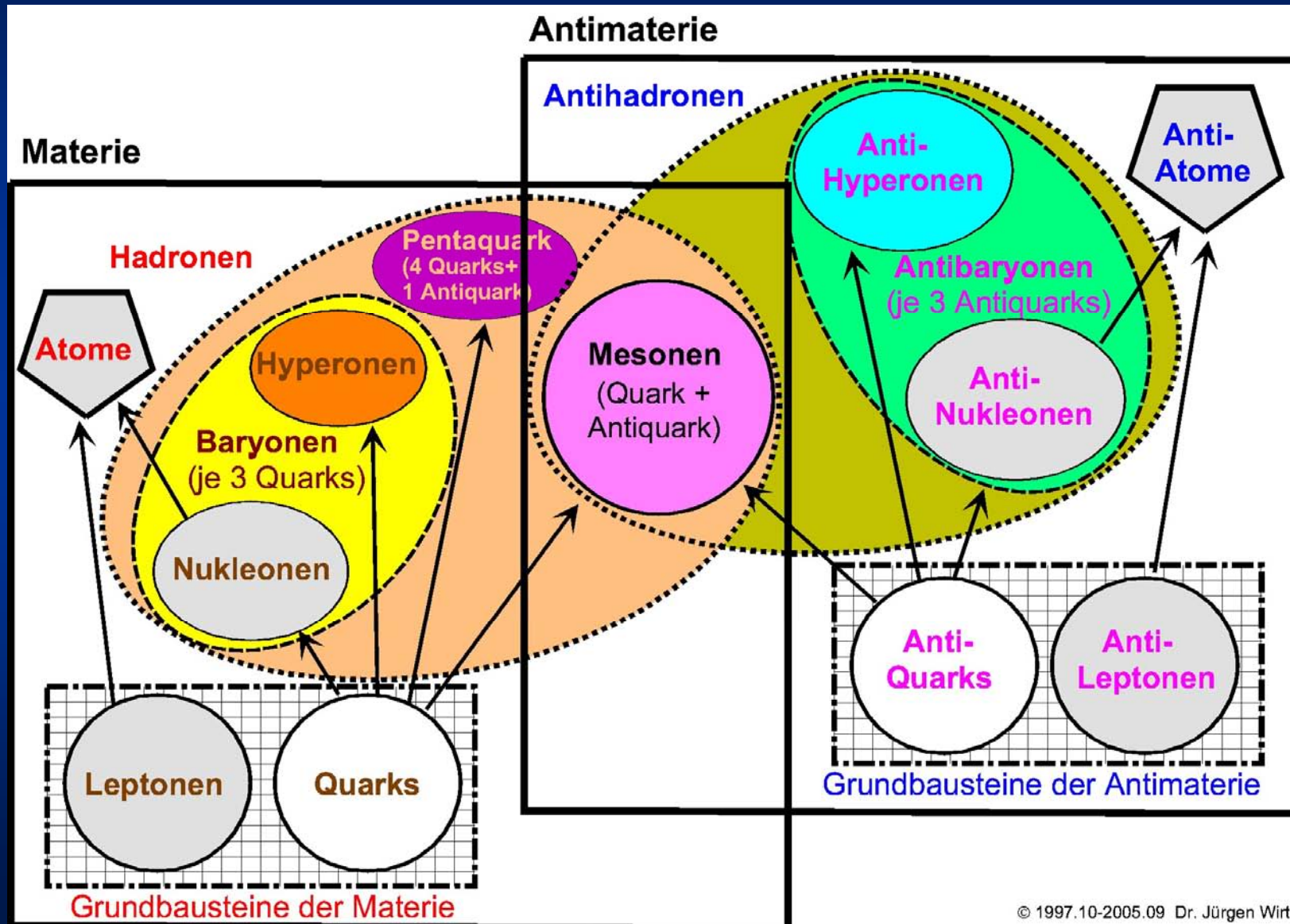
Protonenzerfall

Der Protonenzerfall ist aus der Theorie abgeleitet und hypothetisch.
Die daraus abgeleitete Halbwertszeit beträgt 10^{31} Jahre.
Bis heute wurde noch nie ein Protonenzerfall beobachtet worden.



Kräfte und Teilchen

Aufbau der Materie



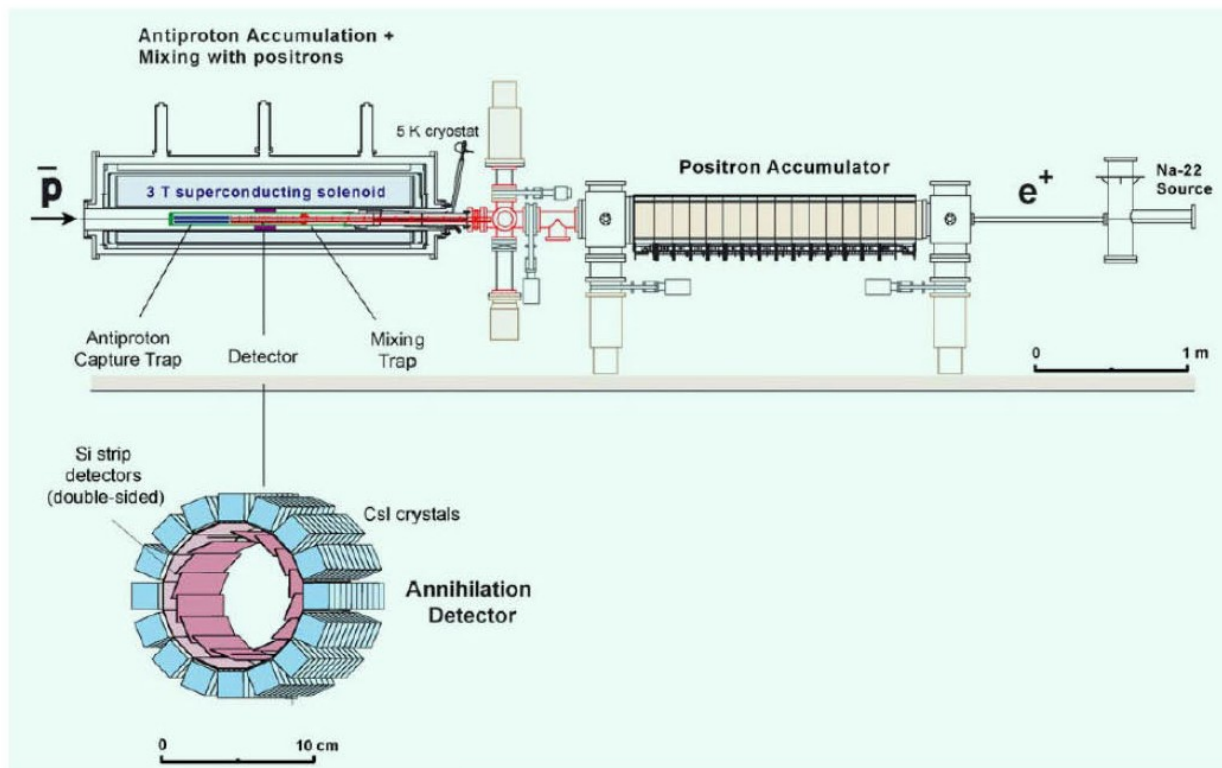
Kräfte und Teilchen

Anti-Materie

Anti-Wasserstoff

Unter kalten Bedingungen werden langsame Antiprotonen mit Positronen gemischt. Dabei entsteht Anti-Wasserstoff, der später an den Wänden der Kammer in zwei Photonen mit je 511 keV Energie sowie einen Pionenschauer zerstrahlt.

Der ATHENA-Detektor für Anti-Wasserstoff:



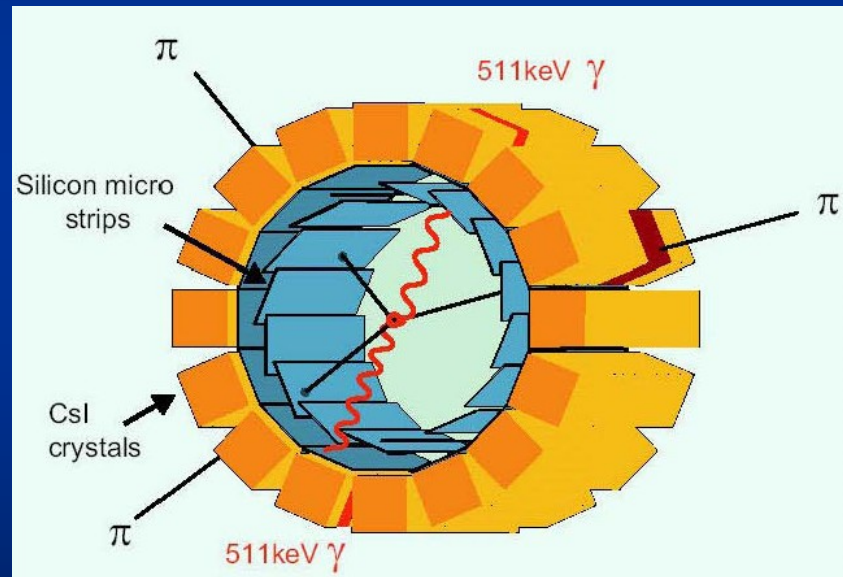
Kräfte und Teilchen

Anti-Materie

Anti-Wasserstoff

Unter kalten Bedingungen werden langsame Antiprotonen mit Positronen gemischt. Dabei entsteht Anti-Wasserstoff, der später an den Wänden der Kammer in zwei Photonen mit je 511 keV Energie sowie einen Pionenschauer zerstrahlt.

Im Jahr 2002 wurden mit 2'924'000 Antiprotonen insgesamt 494'000 Anti-Wasserstoff-Atome erzeugt (17 % Effizienz).



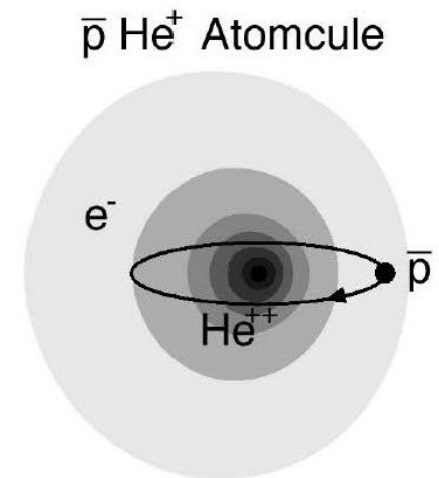
Anti-Wasserstoff zeigt besitzt exakt die gleichen Energieniveaus wie normaler Wasserstoff. Seine Spektrallinien wären also von denen des normalen Wasserstoffs nicht zu unterscheiden!

Kräfte und Teilchen

Elementarkräfte

Antiprotonisches Helium („Atomcule“)

Unter kalten Bedingungen wird ein langsames Antiproton von einem Helium-Ion in eine Bohrsche Bahn eingefangen in Zustände, die denen von Elektronen gleichen. Das Elektron wird dabei durch die Ladung des Antiprotons abgestoßen und verdrängt.



Antiprotonisches Helium besitzt wie normale Atome Energieniveaus und ist damit in der Lage, Spektrallinien zu erzeugen. Viele dieser Linien sind im Labor gemessen worden.

Kräfte und Teilchen

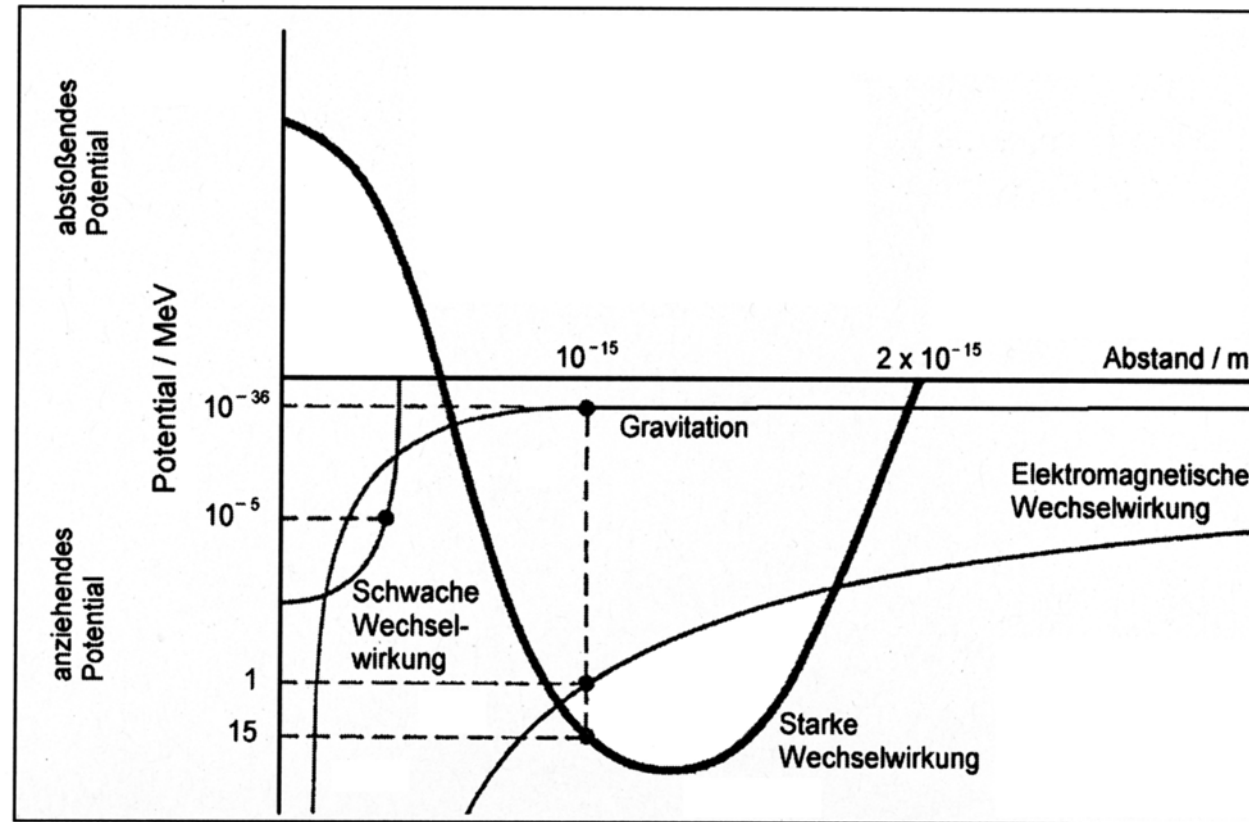
Elementarkräfte: Eigenschaften

Name der Wechselwirkung	relative Stärke	dimensionslose Kopplungskonstante	Wechselwirkungskonstante, Einheit	Reichweite / m	Austauschteilchen (M / kg)
starke	1	$g_s^2 \cdot 2\pi / hc$ 0.3...1	g_s^2 $3.1 \cdot 10^{-26}$ J·m	$2 \cdot 10^{-15}$	Gluonen (0) [Pionen $\pi^{0,\pm}$ ($2.6 \cdot 10^{-28}$)]
elektromagnetische	10^{-2}	$G_e e^2 / 2hc$ $7.3 \cdot 10^{-3}$	G_e $1.13 \cdot 10^{11}$ J·m/C ²	∞	Photonen (0)
schwache	10^{-7}	$G_F m_n^2 \cdot 8\pi^3 c / h^3$ $1.02 \cdot 10^{-5}$	G_F $1.42 \cdot 10^{-62}$ J·m ³	10^{-18}	Bosonen W^\pm, Z ($\approx 1.5 \cdot 10^{-25}$)
Gravitation	10^{-40}	$G m_n^2 / 2hc$ $4.7 \cdot 10^{-40}$	G $6.67 \cdot 10^{-11}$ J·m/kg ²	∞	Gravitonen (0)
<u>Erläuterungen:</u> Elementarladung $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C Plancksches Wirkungsquantum $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s Lichtgeschwindigkeit $c = 299'972.458$ km/s Neutronenmasse $m_n = 1.675 \cdot 10^{-27}$ kg (939.56 MeV/c ²) G_F : Fermi-Kopplungskonstante G : Universelle Gravitationskonstante					

Kräfte und Teilchen

Elementarkräfte: Potentialverlauf

Potentialverlauf
der Wechsel-
wirkungen in
Kernnähe



Das Diagramm zeigt den Potentialverlauf der vier elementaren Wechselwirkungen in der Nähe von Atomkernen. Die schwache W. verschwindet nach kürzester Reichweite. Die starke W. hat zunächst abstoßendes, dann anziehendes Potential, bevor sie schließlich verschwindet. Die anderen beiden haben eine unendliche Reichweite.

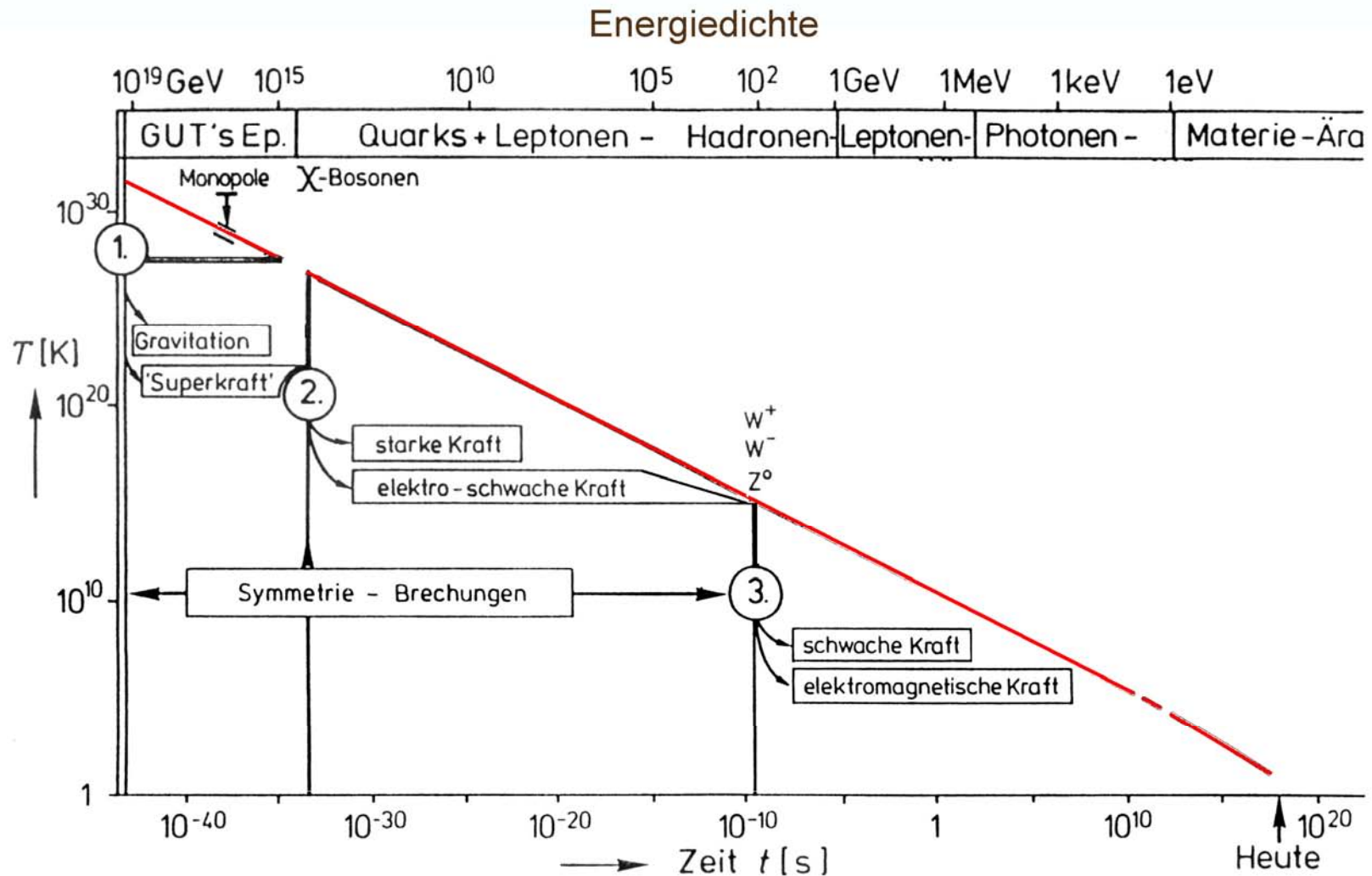
Kräfte und Teilchen

Elementarkräfte und Vereinheitlichungen

Name der Wechselwirkung	relative Stärke	dimensionslose Kopplungskonstante	Wechselwirkungskonstante, Einheit	Reichweite / m	Austauschteilchen (M / kg)
starke	1	$g_s^2 \cdot 2\pi/hc$ 0.3...1	g_s^2 $3.1 \cdot 10^{-26}$ J·m	$2 \cdot 10^{-15}$	Gluonen (0) [Pionen $\pi^{0,\pm}$ ($2.6 \cdot 10^{-28}$)]
elektromagnetische	10^{-2}	$G_e e^2 / 2hc$ $7.3 \cdot 10^{-3}$	G_e $1.13 \cdot 10^{11}$ J·m/C ²	∞	Photonen (0)
schwache	10^{-7}	$G_F m_n^2 \cdot 8\pi^3 c/h^3$ $1.02 \cdot 10^{-5}$	G_F $1.42 \cdot 10^{-62}$ J·m ³	10^{-18}	Bosonen W^\pm, Z ($\approx 1.5 \cdot 10^{-25}$)
Gravitation	10^{-40}	$G m_n^2 / 2hc$ $4.7 \cdot 10^{-40}$	G $6.67 \cdot 10^{-11}$ J·m/kg ²	∞	Gravitonen (0)
Vereinheitlichungen:		Energie		Ergebnis:	
elektromagnetisch + schwach		10^5 MeV		elektroschwache Wechselwirkung	
elektroschwach + stark		10^{17} MeV		GUT (Große Vereinheitlichung)	
GUT + Gravitation		10^{22} MeV ?			

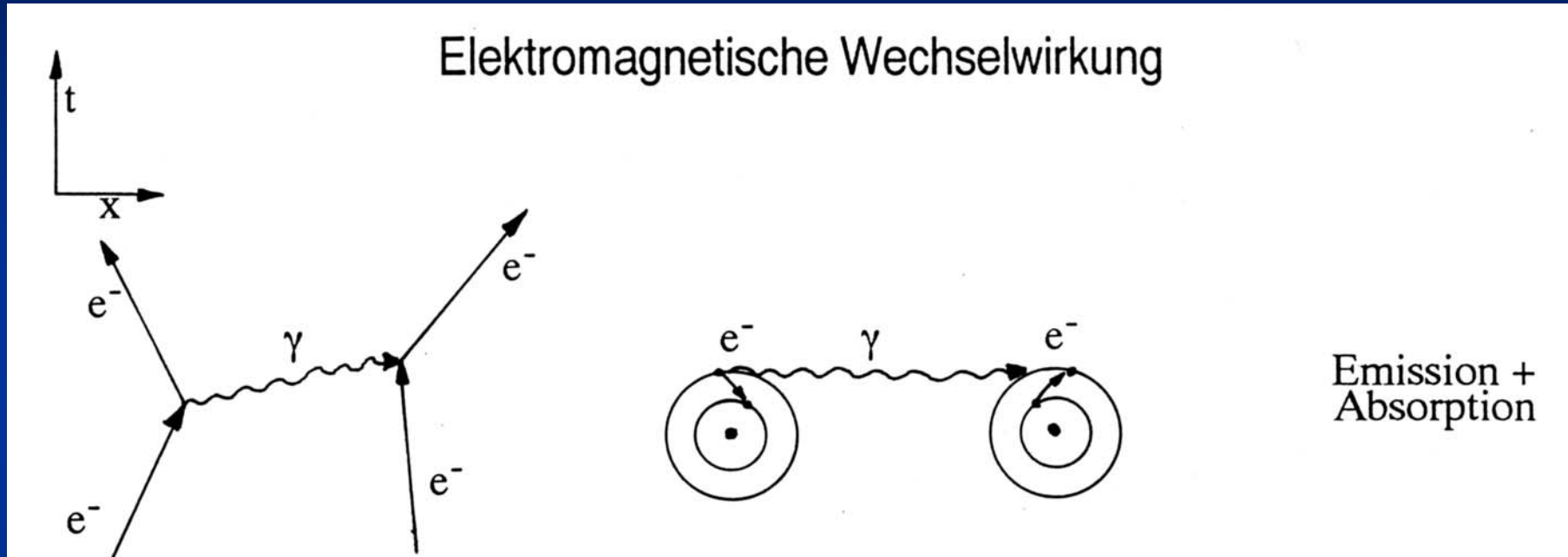
Kräfte und Teilchen

Elementarkräfte und Vereinheitlichungen



Kräfte und Teilchen

Wechselwirkungen: Feynman-Diagramme



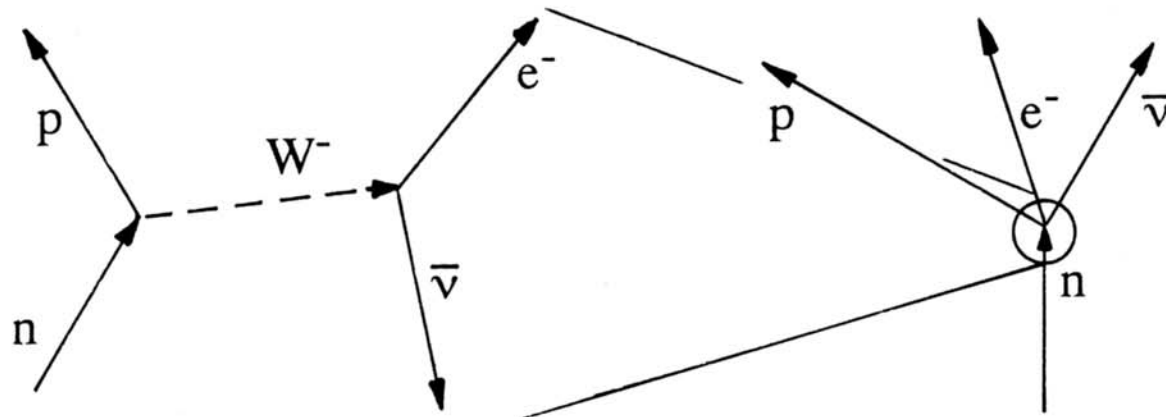
Feynman-Diagramme verdeutlichen die Prozesse, die bei einer Wechselwirkung stattfinden. Links im Bild ist das Feynman-Diagramm eines Emissions- und Absorptionsprozesses von gebundenen Elektronen zu sehen. Die Zeitachse läuft senkrecht. Ein Elektron emittiert ein Photon (γ), ein zweites absorbiert dies wieder. Beide ändern dabei jeweils ihre Bahn.

In der Mitte sind diese beiden Prozesse in einer Bahndarstellung abgebildet.

Kräfte und Teilchen

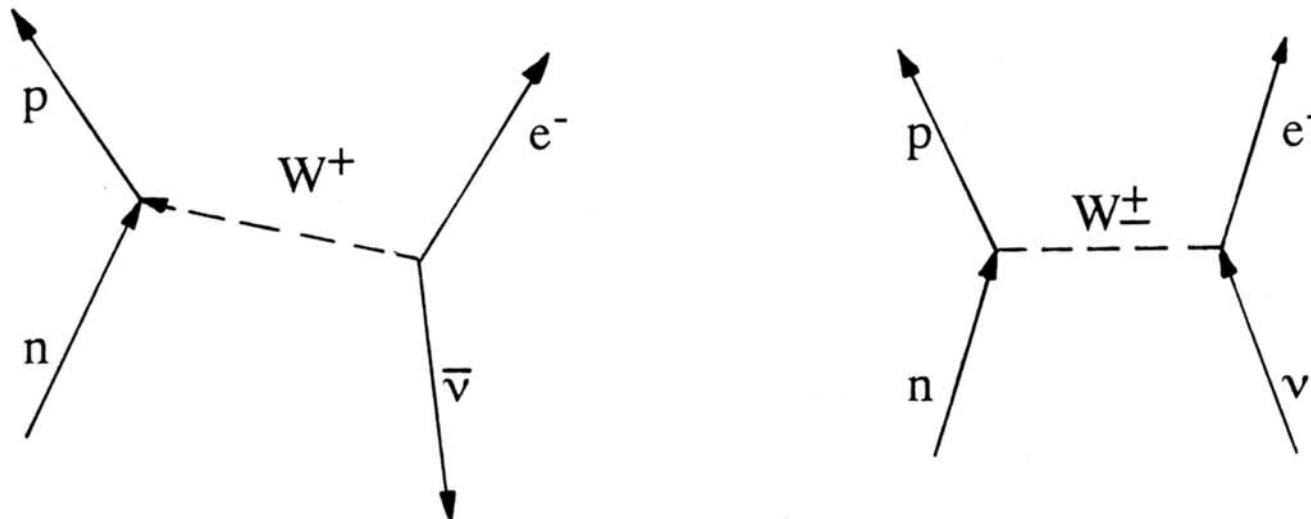
Wechselwirkungen: Feynman-Diagramme

Schwache Wechselwirkung



β -Zerfall

oder



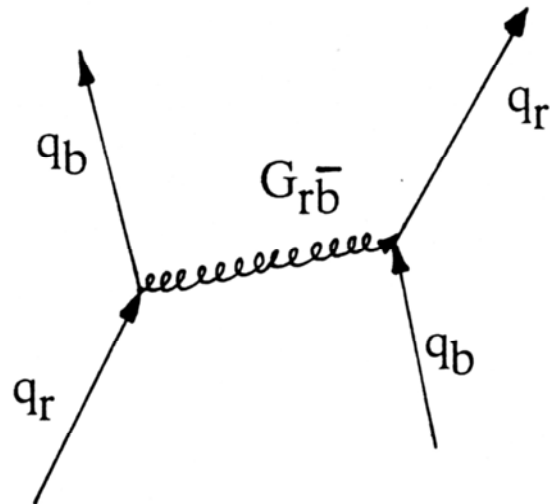
äquivalente
Darstellungen

Kräfte und Teilchen

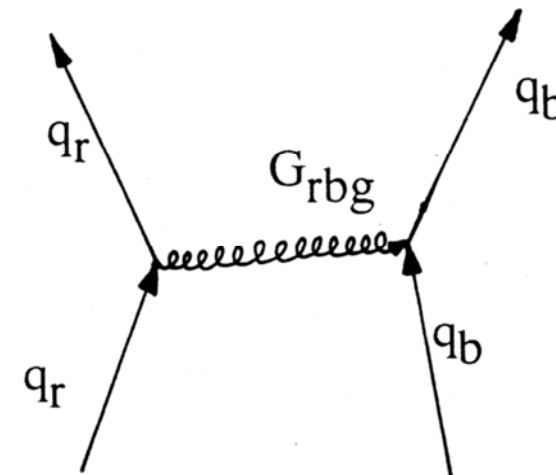
Wechselwirkungen: Feynman-Diagramme

Starke Wechselwirkung / Gluonen

Farbänderung



Farberhaltung



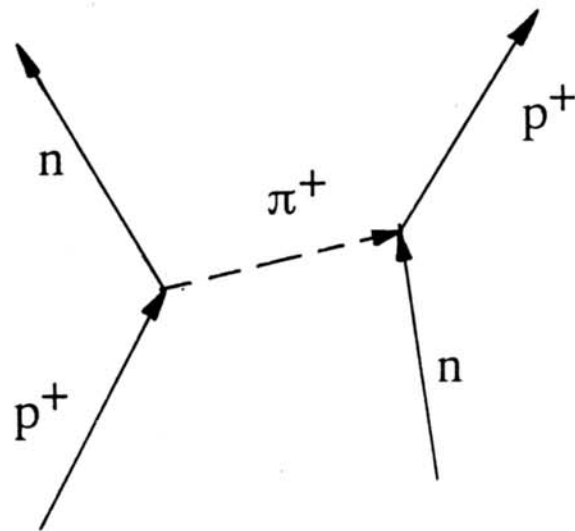
Der Gluonen-Austausch im Rahmen der starken Wechselwirkung findet innerhalb der Baryonen statt und bezieht sich auf die „Farb“-Eigenschaft der Quarks. Die „Farbsumme“ eines Baryons wird dabei nicht verändert, denn Baryonen sind „farblos“.

Kräfte und Teilchen

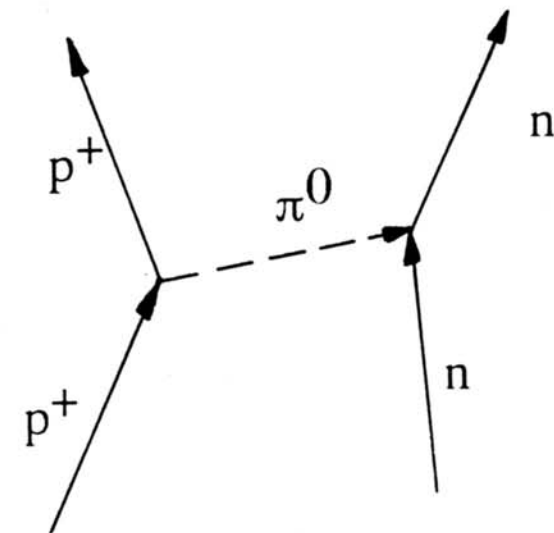
Wechselwirkungen: Feynman-Diagramme

Starke Wechselwirkung / Pionen

Ladungsänderung



Ladungserhaltung



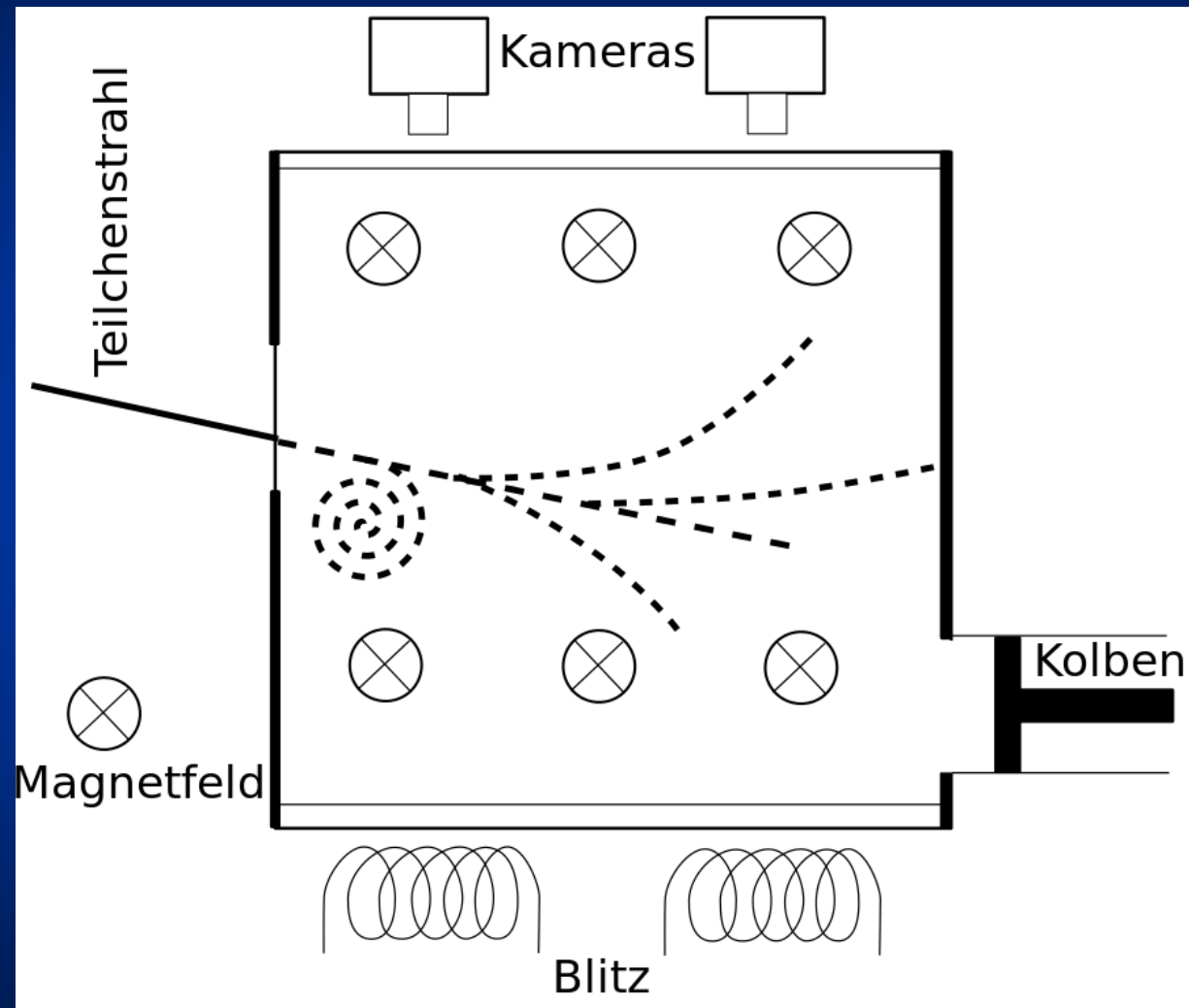
„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

Der Pionen-Austausch im Rahmen der starken Wechselwirkung findet innerhalb der Atomkerne statt und führt bei geladenen Pionen zu einer Umwandlung von Neutronen in Protonen und umgekehrt. Der Gesamtinhalt an Protonen und Neutronen sowie die Gesamtladung des Atomkerns bleibt dabei unverändert.

Kräfte und Teilchen

Labor-Experimente (Blasenkammer)

Kurz vor der Injektion eines Teilchenstrahls aus einem Beschleuniger in die Blasenkammer, die meist mit Wasserstoff gefüllt ist, wird dort ein Unterdruck erzeugt. Einlaufende Teilchen ionisieren den Wasserstoff. An den Ionen entstehen Gasblasen, die mit einem Blitz beleuchtet und von Kameras aufgenommen werden. Geladene Teilchen erhalten durch ein angelegtes Magnetfeld gekrümmte Bahnen. Danach wird der Druck wieder normalisiert.



Kräfte und Teilchen

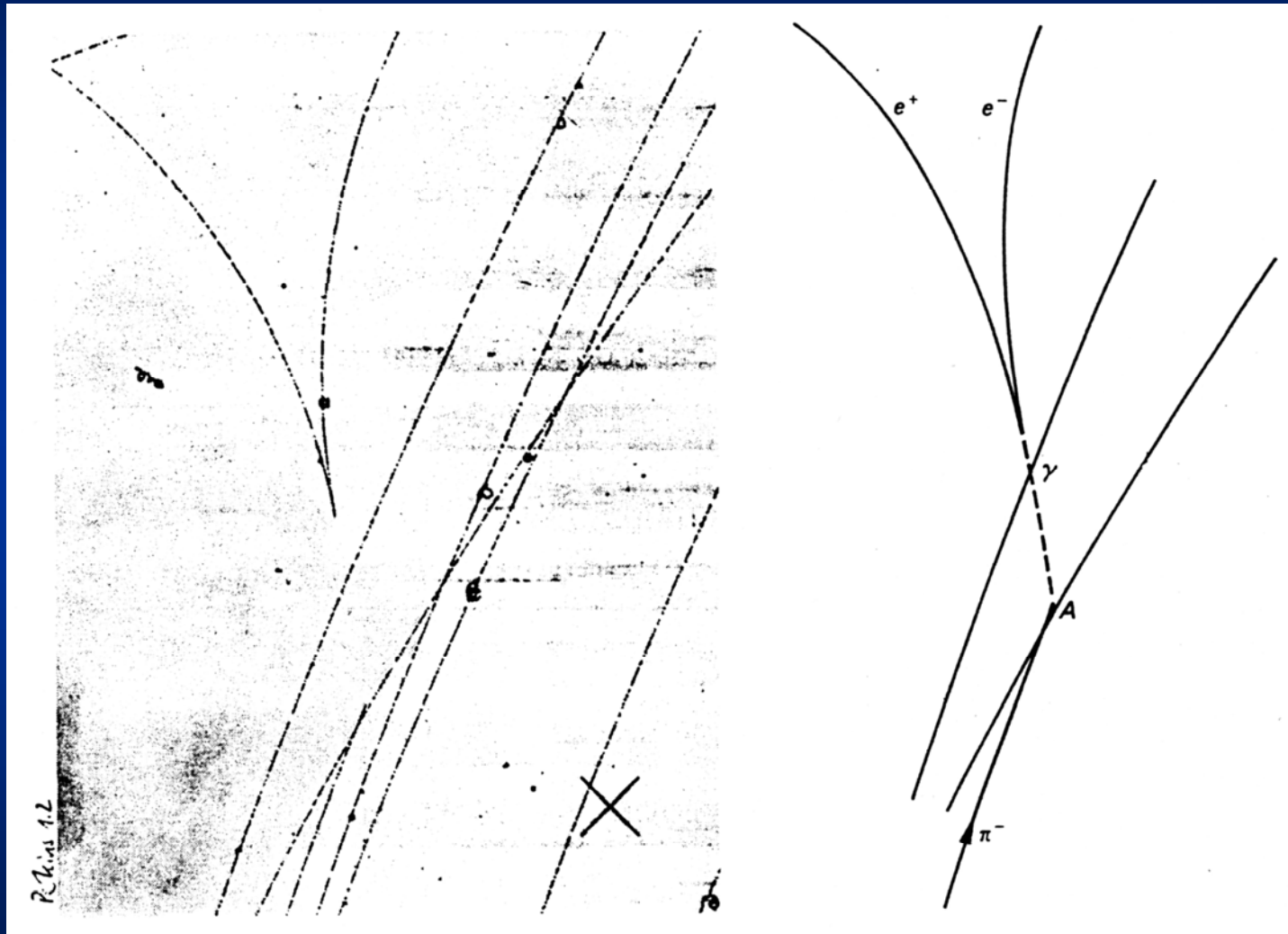
Labor-Experimente (Blasenkammer)



Blasenkammer beim „Tag der Raumfahrt“ 2007 (DLR, Köln-Porz)

Kräfte und Teilchen

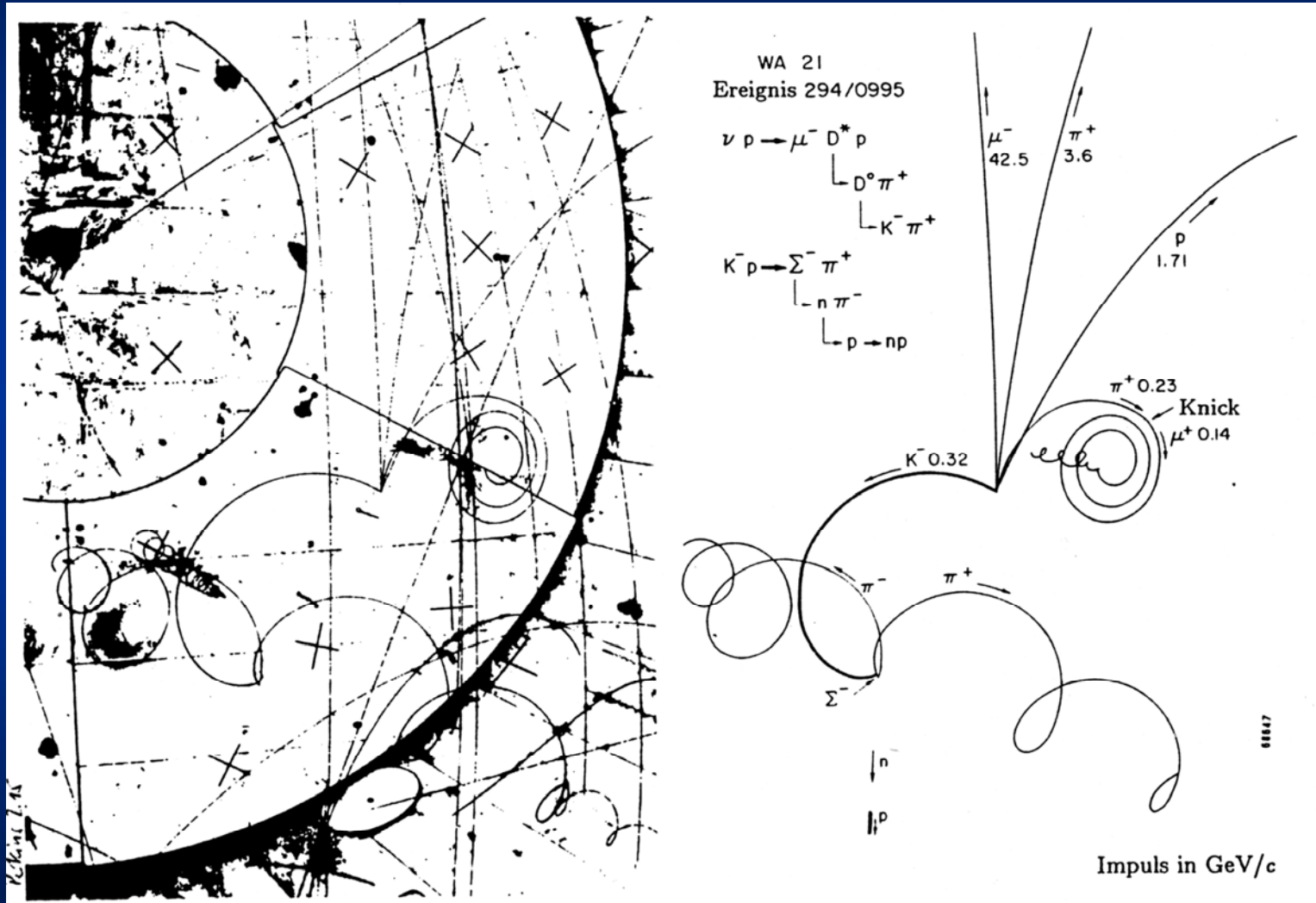
Labor-Experimente (Blasenkammer)



Blasenkammer-Aufnahme der Konversion eines Photons in ein Elektron-Positron-Paar.

Kräfte und Teilchen

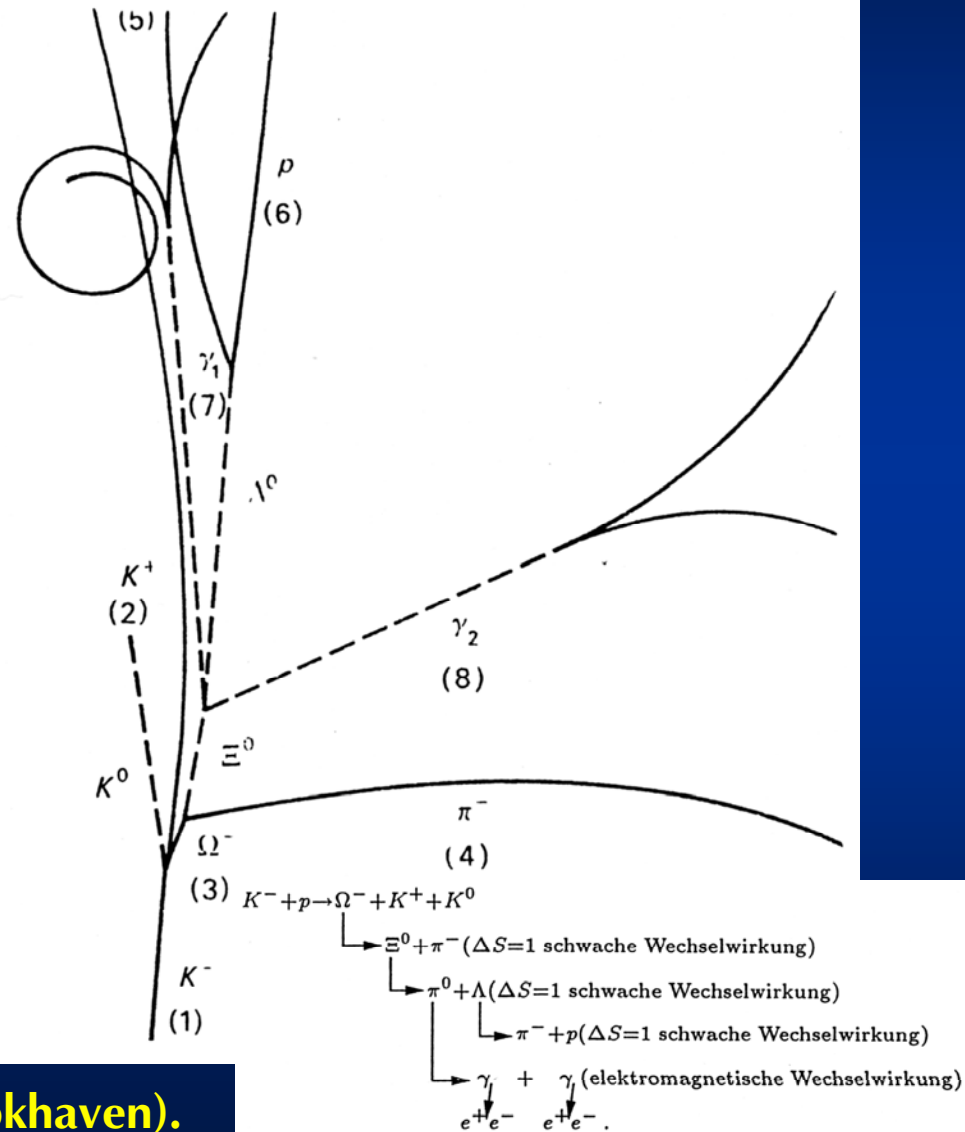
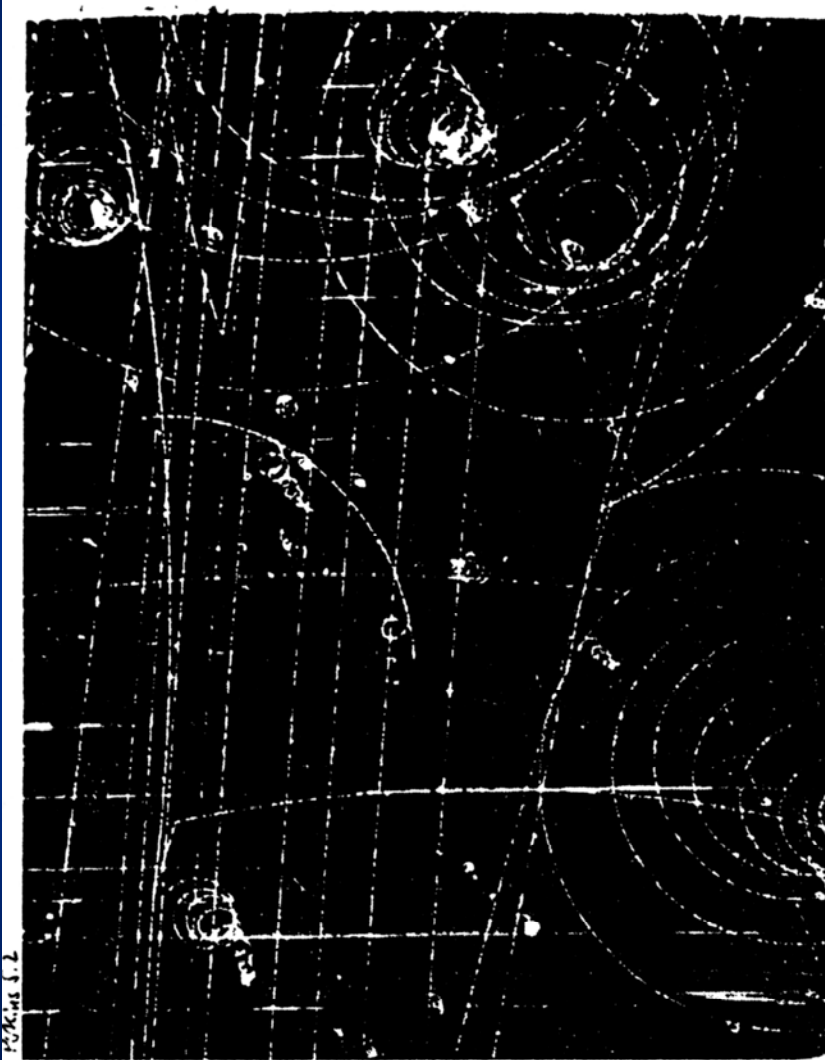
Labor-Experimente (Blasenkammer)



Erzeugung und Zerfall eines Charm-Teilchens im Neutrino-Strahl des CERN-SPS.

Kräfte und Teilchen

Labor-Experimente (Blasenkammer)



Das erste beobachtete Ω^- -Ereignis (Brookhaven).

Kräfte und Teilchen

Quantentheorie

**„Wer von der Quantentheorie nicht schockiert ist, versteht sie nicht:“
(Niels Bohr 1927)**

**„Niemand versteht die Quantentheorie.“
(Richard Feynman 1967)**

Kräfte und Teilchen

Quantentheorie

Die Quantenmechanik erhebt nicht den Anspruch, die Welt so beschreiben, wie sie wirklich ist, sondern sie ist eine mathematisch-physikalische Methode, um die beobachtbaren und messbaren Phänomene der subatomaren Welt, die teilweise vermeintlich unvereinbar sind, in einer gemeinsamen, konsistenten Theorie zusammen zu führen.

So z.B. die Wellennatur, die sich bei Licht in Beugung und Interferenz äußert, und die Teilchennatur, die bei Licht sichtbar wird bei Streuung und bei hochenergetischen Röntgenphotonen.

Außerdem ermöglicht sie die Einbeziehung der Tatsache, dass sich die subatomare Welt nicht mehr eindeutig beschreiben lässt, sondern dass hier das Auftreten physikalischer Phänomene mit Wahrscheinlichkeiten verknüpft ist.

Kräfte und Teilchen

Quantentheorie

Das, was jeder von uns als seine Wirklichkeit erlebt, ist jeweils nur das Abbild der Wahrheit - einer wahren Realität, auf unsere Erkenntnisfähigkeiten, d.h. auf die Fähigkeiten unserer Sinnesorgane und unseres Geistes. Die erlebte Wirklichkeit ist sozusagen nur ein Schatten der Wahrheit.

Kräfte und Teilchen

Welle-Teilchen-Dualismus

Nach der Entdeckung der Quantisierung des Lichts durch Albert Einstein (1905, Annalen der Physik Bd. 17, S.132ff.) und damit der Feststellung, dass Photonen sowohl Wellen- wie auch Teilchencharakter zeigen, folgerte Louis-Victor de Broglie (1892-1987), dass dann auch klassische Teilchen ein solches duales Verhalten zeigen müssten.

In seiner Doktorarbeit 1924 erhob er den Welle-Teilchen-Dualismus zum allgemeinen Prinzip.

Kräfte und Teilchen

Welle-Teilchen-Dualismus

Nach der Entdeckung der Quantisierung des Lichts durch Albert Einstein (1905, Annalen der Physik Bd. 17, S.132ff.) und damit der Feststellung, dass Photonen sowohl Wellen- wie auch Teilchencharakter zeigen, folgerte Louis-Victor de Broglie (1892-1987), dass dann auch klassische Teilchen ein solches duales Verhalten zeigen müssten.



RECHERCHES SUR LA THÉORIE DES QUANTA

Par M. Louis de BROGLIE

SOMMAIRE. — L'histoire des théories optiques montre que la pensée scientifique a longtemps hésité entre une conception dynamique et une conception ondulatoire de la lumière; ces deux représentations sont donc sans doute moins en opposition qu'on ne l'avait supposé et le développement de la théorie des quanta semble confirmer cette conclusion.

Guidé par l'idée d'une relation générale entre les notions de fréquence et d'énergie, nous admettons dans le présent travail l'existence d'un phénomène périodique d'une nature encore à préciser qui serait lié à tout morceau isolé d'énergie et qui dépendrait de sa masse propre par l'équation de Plank-Einstein. La théorie de relativité conduit alors à associer au mouvement uniforme de tout point matériel la propagation d'une certaine onde dont la phase se déplace dans l'espace plus vite que la lumière (ch. I.)

Pour généraliser ce résultat dans le cas du mouvement non uniforme, on est amené à admettre une proportionnalité entre le vecteur Impulsion d'Univers d'un point matériel et un vecteur caractéristique de la propagation de l'onde associée dont la composante de temps est la fréquence. Le principe de Fermat appliqué à l'onde devient alors identique au principe de moindre action appliqué au mobile. Les rayons de l'onde sont identiques aux trajectoires possibles du mobile (ch. II.)

L'énoncé précédent appliqué au mouvement périodique d'un électron dans l'atome de Bohr permet de retrouver les conditions de stabilité quantiques comme expressions de la résonance de l'onde sur la longueur de la trajectoire (ch. III). Ce résultat peut être étendu au cas des mouvements circulaires du noyau et de l'électron autour de leur centre de gravité commun dans l'atome d'hydrogène (ch. IV.)

L'application de ces idées générales au quantum de lumière conçu par Einstein mène à de nombreuses concordances très intéressantes. Elle permet d'espérer malgré les difficultés qui subsistent, la constitution d'une optique à la fois atomistique et ondulatoire établissant une sorte de correspondance statistique

Kräfte und Teilchen

Welle-Teilchen-Dualismus

Nach der Entdeckung der Quantisierung des Lichts durch Albert Einstein (1905, Annalen der Physik Bd. 17, S.132ff.) und damit der Feststellung, dass Photonen sowohl Wellen- wie auch Teilchencharakter zeigen, folgerte Louis-Victor de Broglie (1892-1987), dass dann auch klassische Teilchen ein solches duales Verhalten zeigen müssten.

In seiner Doktorarbeit 1924 erhob er den Welle-Teilchen-Dualismus zum allgemeinen Prinzip.

1927 gelang durch Interferenzversuche im Davisson-Germer-Experiment der Nachweis der Welleneigenschaften der Elektronen. Dabei wurden de Broglies Voraussagen über die Wellenlänge bestätigt.

Kräfte und Teilchen

Welle-Teilchen-Dualismus

Die de Broglie-Materiewellenlänge λ errechnet sich zu

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{mit} \quad p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

p ist dabei der relativistische Impuls des Teilchens, m seine Masse, v seine Geschwindigkeit, c die Lichtgeschwindigkeit und h das Plancksche Wirkungsquantum.

Kräfte und Teilchen

Welle-Teilchen-Dualismus

Die de Broglie-Materiewellenlänge λ errechnet sich zu

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{mit} \quad p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Hierdurch ergibt sich auch die „innere Grenze“ physikalischer Erkenntnis:

Die Teilchen mit der derzeit höchsten Energie in einem Beschleuniger (1 TeV/c²) haben eine Materiewellenlänge von $> 10^{-19}$ m.

Kleinere Strukturen sind daher nicht nachweisbar.

Kräfte und Teilchen

Quantentheorie

Arbeitshypothese der Teilchenphysiker:

- ▶ Ausgehend von den 60 Elementarteilchen-Individuen, den vier bekannten Kräften und wenigen physikalischen Grundgleichungen und Bauprinzipien (z.B. Pauliprinzip)
- ▶ muss sich das ganze Universum im Prinzip beschreiben lassen
- ▶ bis zur inneren Grenze von gegenwärtig 10^{-19} m
- ▶ und zurück in die Vergangenheit bis zu 10^{-12} s nach dem Urknall.
(Zu dieser Zeit entsprach die Temperatur des Weltalls Teilchenenergien von 10^{+13} eV = 10 TeV.)

Kräfte und Teilchen

Quantentheorie

Die größte Leistung der Quantentheorie ist es, dass mit ihrer Hilfe Voraussagen gemacht werden konnten, die sich z.B. in der Entdeckung neuer Elementarteilchen und ihrer Eigenschaften erfüllt haben.

Allerdings gibt es auch Lücken, die noch nicht geschlossen werden konnten, z.B. bei der Vorhersage der Größe der Vakuumenergiedichte oder der Beschreibung der Gravitation in einer Quantenfeldtheorie.

Kräfte und Teilchen

Quantenfeldtheorie

Vereinfacht gesagt versucht die Quantenfeldtheorie (das „Standardmodell“) alle bekannten Teilchen und Wechselwirkungen in quantisierter Form in einer gemeinsamen Theorie zu beschreiben. Die Einbeziehung der Gravitation, der Dunklen Materie und der Neutrinooszillationen ist bis jetzt jedoch nicht gelungen.

Kräfte und Teilchen

Wechselwirkungen und ihre Teilchen

Im Rahmen der Quanten- bzw. Quantenfeldtheorie wird die Vermittlung von Elementarkräften oder Wechselwirkungen durch den Austausch von Teilchen / Wechselwirkungsquanten beschrieben.

Gleichzeitig sind diese Austauschteilchen notwendig bei Zerfalls- und Umwandlungsprozessen von Elementarteilchen.

Kräfte und Teilchen

Wechselwirkungen und ihre Teilchen

Im Rahmen der Quanten- bzw. Quantenfeldtheorie wird die Vermittlung von Elementarkräften oder Wechselwirkungen durch den Austausch von Teilchen / Wechselwirkungsquanten beschrieben.

Wechselwirkung	betroffene Eigenschaft	Teilchen	Wirkung
Gravitation	Masse	Graviton g	Kraftwirkung
elektromagnetische	Ladung	Photon γ	Energieaustausch
schwache	Baryonen. Leptonen. Quarks	Bosonen W,Z	β -Zerfall.Ladungsänderung
starke	Hadronen	Pionen π	n/p-Umwandlung
	"Farbladung". Quarks	Gluonen G	Farbaustausch
GUT	Quarks	Bosonen X,Y	Baryonenzerfall

Die „betroffene Eigenschaft“ wird oft auch mit „Ladung“ beschrieben.

Kräfte und Teilchen

Wechselwirkungsteilchen								
Gruppe	Name	Ze	$m_0[\text{GeV}/c^2]$	J	Q	I	Wechselwirkung	Reichweite [m]
Eichbosonen	Graviton	G	0	2	0	0	Gravitation	∞
	Photon	γ	0	1	0	0	elektromagnetische	∞
	inter- mediäres Boson	W^+	80.41(18)	1	+1		schwache/ elektroschwache	$\sim 10^{-18}$
		W^-	80.41(18)	1	-1			
		Z	91.1884(22)	1	0			
	Gluon	g_{rg}	0	1	0	0	starke (Quark-Einschluß)	$< 10^{-15}$
		g_{rb}	0	1	0	0		
		g_{gb}	0	1	0	0		
		g_{gr}	0	1	0	0		
		g_{br}	0	1	0	0		
		g_{bg}	0	1	0	0		
		g_{rbg}	0	1	0	0		
		g_{rbg}	0	1	0	0		
	Bosonen (in je 3 Farben)	X	$\sim 10^{14}$	0	$+\frac{1}{3}$		GUT (Verletzung der A- und L-Erhaltung)	$< 10^{-31}$
\bar{X}		$\sim 10^{14}$	0	$-\frac{1}{3}$				
Y		$\sim 10^{14}$	0	$+\frac{1}{3}$				
\bar{Y}		$\sim 10^{14}$	0	$-\frac{1}{3}$				
Higgs- Bosonen	H^0	96(+60/-38):	0	0		Higgs-Feld (Massenbehaftung)	?	
	H^+	77(+69/-39):	0	+1				
	H^-	77(+69/-39):	0	-1				
Mesonen Bosonen	Pion	π^+	0.1395	0	+1	1	starke (Kernbindung)	$\leq 5 \cdot 10^{-15}$
		π^-	0.1395	0	-1	1		
		π^0	0.135	0	0	1		

J: Spin (Eigendrehung)

I: Isospin

Q: Ladung

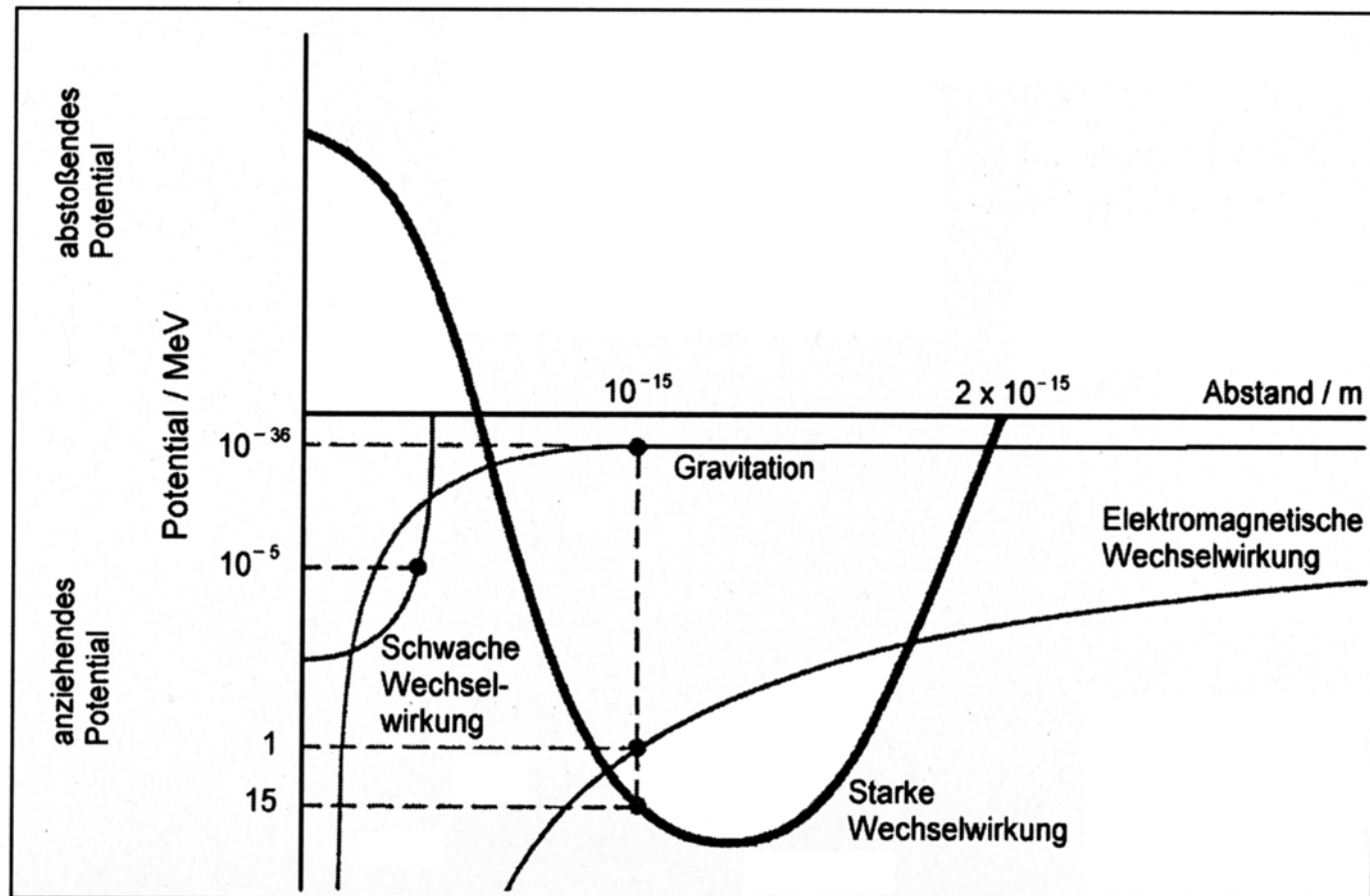
H^0 : Standardmodell; H^\pm : minimales supersymmetrisches Modell

© 2005.09 Copyright Dr. Jürgen Wirth

Kräfte und Teilchen

Wechselwirkungen und ihre Teilchen

Potentialverlauf
der Wechsel-
wirkungen in
Kernnähe



Reichweite der Wechselwirkung und Lebensdauer der Wechselwirkungsteilchen hängen mit einander zusammen.

Kräfte und Teilchen

Wechselwirkungen und ihre Teilchen

Umwandlung bzw. Zerfall von Teilchen oder die Änderung von Energieniveaus unterliegen Erhaltungssätzen und Auswahlregeln (normalerweise: 0, ± 1) für die entsprechende Eigenschaft.

Erhaltene Größe	Wechselwirkung		
	Stark	Elektromagnetisch	Schwach
Energie/Impuls Ladung Baryonzahl Leptonzahl	Ja	Ja	Ja
<i>I</i> (Isospin)	Ja	Nein	Nein ($\Delta I = 1, \frac{1}{2}$)
<i>S</i> (Seltsamkeit)	Ja	Ja	Nein ($\Delta S = 0, 1$)
<i>C</i> (Charm)	Ja	Ja	Nein ($\Delta C = 0, 1$)
<i>P</i> (Parität)	Ja	Ja	Nein
<i>C</i> (<i>C</i> Parität)	Ja	Ja	Nein
<i>CP</i> (oder <i>T</i>)	Ja	Ja	Nein (Verletzung 10^{-3} im K^0 -Zerfall)
<i>CPT</i>	Ja	Ja	Ja

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Indizien für die Existenz Dunkler Materie

- 1933** Fritz Zwicky (1898-1974) arbeitet an Galaxienhaufen
- 1937** Veröffentlichung im
Astrophysical Journal

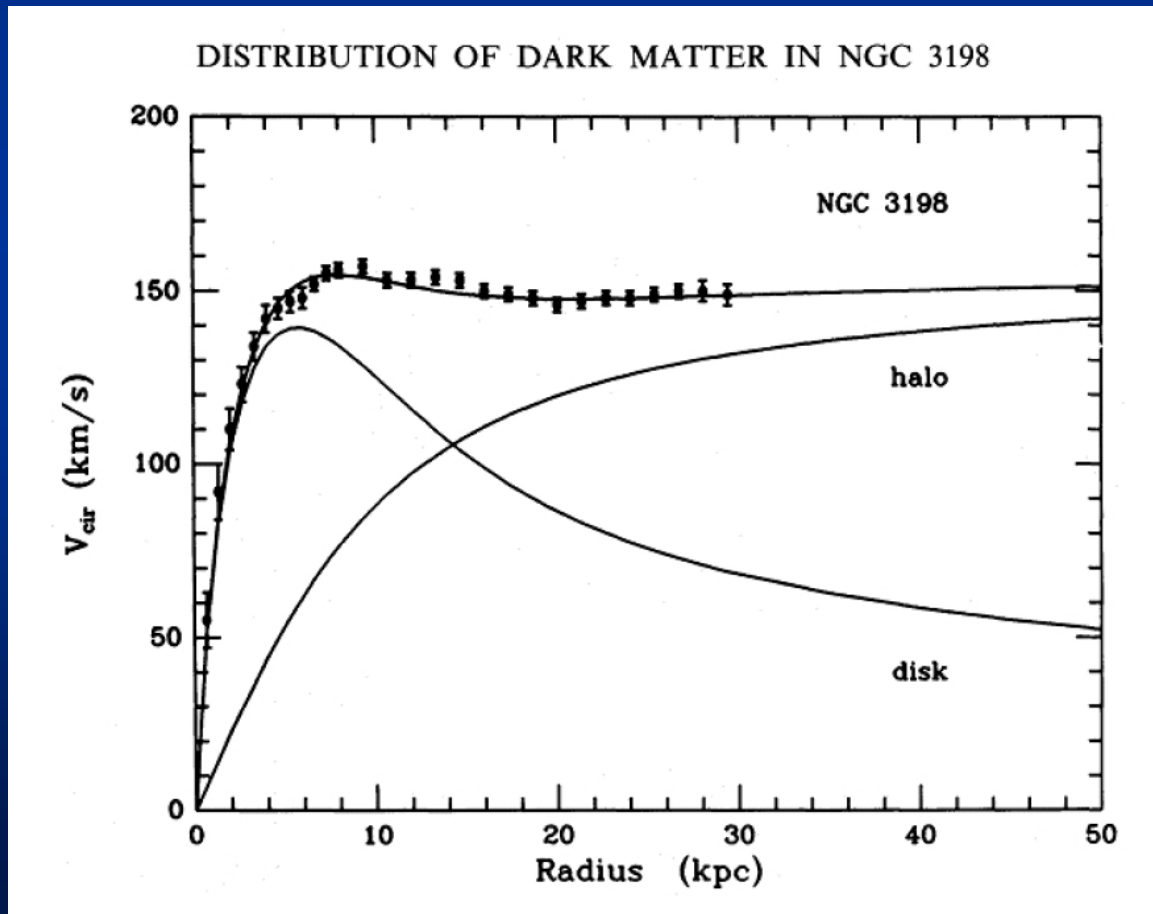
Aus dieser Arbeit ergibt sich ein Defizit an Masse, wenn man sie aus der Leuchtkraft ableitet, gegenüber der aus dem Virialsatz abgeleiteten. Faktor etwa 150.

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Indizien für die Existenz Dunkler Materie

- Virialsatz
- Rotationskurven von Galaxien



Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Indizien für die Existenz Dunkler Materie

- **Virialsatz**
- **Rotationskurven von Galaxien**
- **Gravitationslinsen (Galaxienhaufen)**



Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

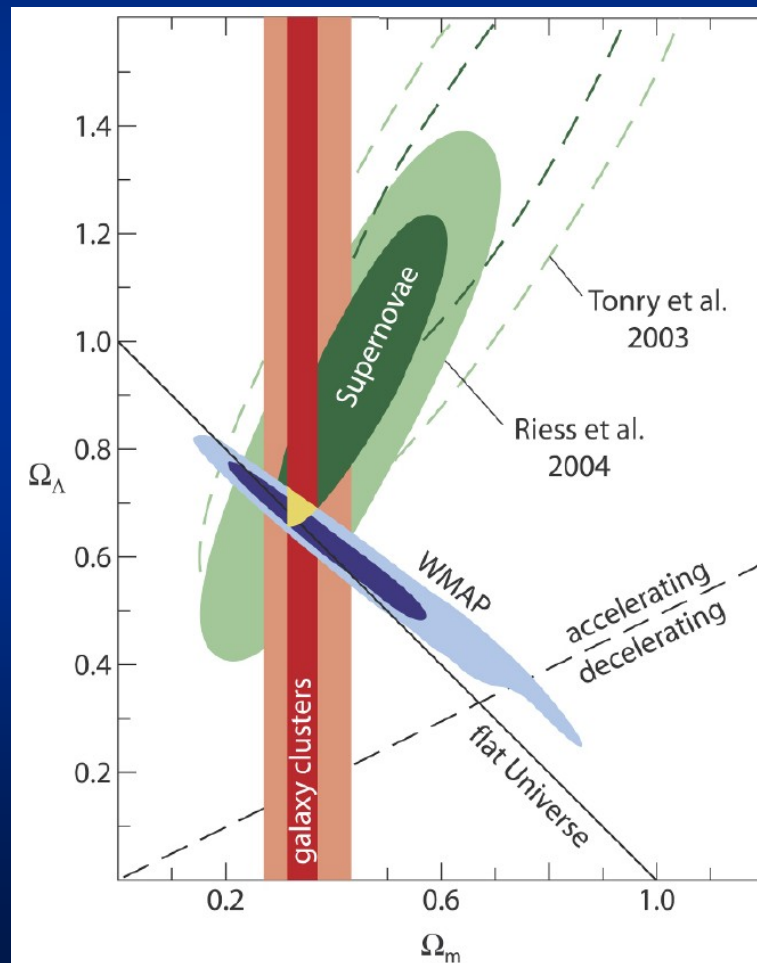
Indizien für die Existenz Dunkler Materie

- **Virialsatz**
- **Rotationskurven von Galaxien**
- **Gravitationslinsen (Galaxienhaufen)**
- **Untersuchung der CMBR
(Mikrowellen-Hintergrundstrahlung)**

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Indizien für die Existenz Dunkler Materie



Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Bilanz des Universums

$$\Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_\nu + \Omega_\gamma + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

$$\sim 0.04 + \sim 0.23 + \sim 0 + \sim 0 + \sim 0.73 + \sim 0 = 1$$

(<0.0072) (~ 0.00001) (-0.003)

Ω_B	Baryonischer Materiedichteanteil
Ω_{DM}	Dunkle Materiedichteanteil
Ω_ν	Äquivalenter Dichteanteil der Neutrinos
Ω_γ	Äquivalenter Dichteanteil der Photonenstrahlung
Ω_Λ	Äquivalenter Dichteanteil von Λ („Dunkle Energie“)
Ω_k	Äquivalenter Dichteanteil der Krümmung

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Anforderungen an die Dunkle Materie

- Teilchen müssen stabil sein
- geringe elektromagnetische Wechselwirkung („dunkel“ !)
- Ruhemasse zwischen $10 \text{ GeV}/c^2$ und einigen TeV/c^2
- Wirkungsquerschnitt etwa gleich dem der schwachen Ww.
- Thermisches Gleichgewicht vor der normalen Materie verlassen

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Kandidaten

- **WIMPs (Weak Interacting Massive Particles)**
- **Axione**
- **Strings**

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Kandidaten

- **WIMPs (Weak Interacting Massive Particles)**

Das Neutralino (das leichteste supersymmetrische Teilchen) mit einer Ruhemasse von einigen Hundert GeV/c^2 .

- Nachweis kosmischer WIMPs: $10^{-1} \dots 10^{-5}$ Ereignisse /kg·Tag
- Beschleuniger-Experimente
- indirekt durch Annihilationsstrahlung

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Experiment

- **CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometers) des MPI für Physik, Garching, im LNGS (Laboratori Nazionali del Gran Sasso)**

Erstes Ergebnis:

67 Ereignisse im Jahr 2011, die möglicherweise von WIMPs stammen. Bei Beachtung aller Störeinflüsse ergibt sich mit 99.9995 % Wahrscheinlichkeit ein schwacher Hinweis, dass einige der Ereignisse auf WIMPs zurück zu führen sind.

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

CRESST-Experiment



Das Gran Sasso-Massiv in Mittelitalien

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

CRESST-Experiment

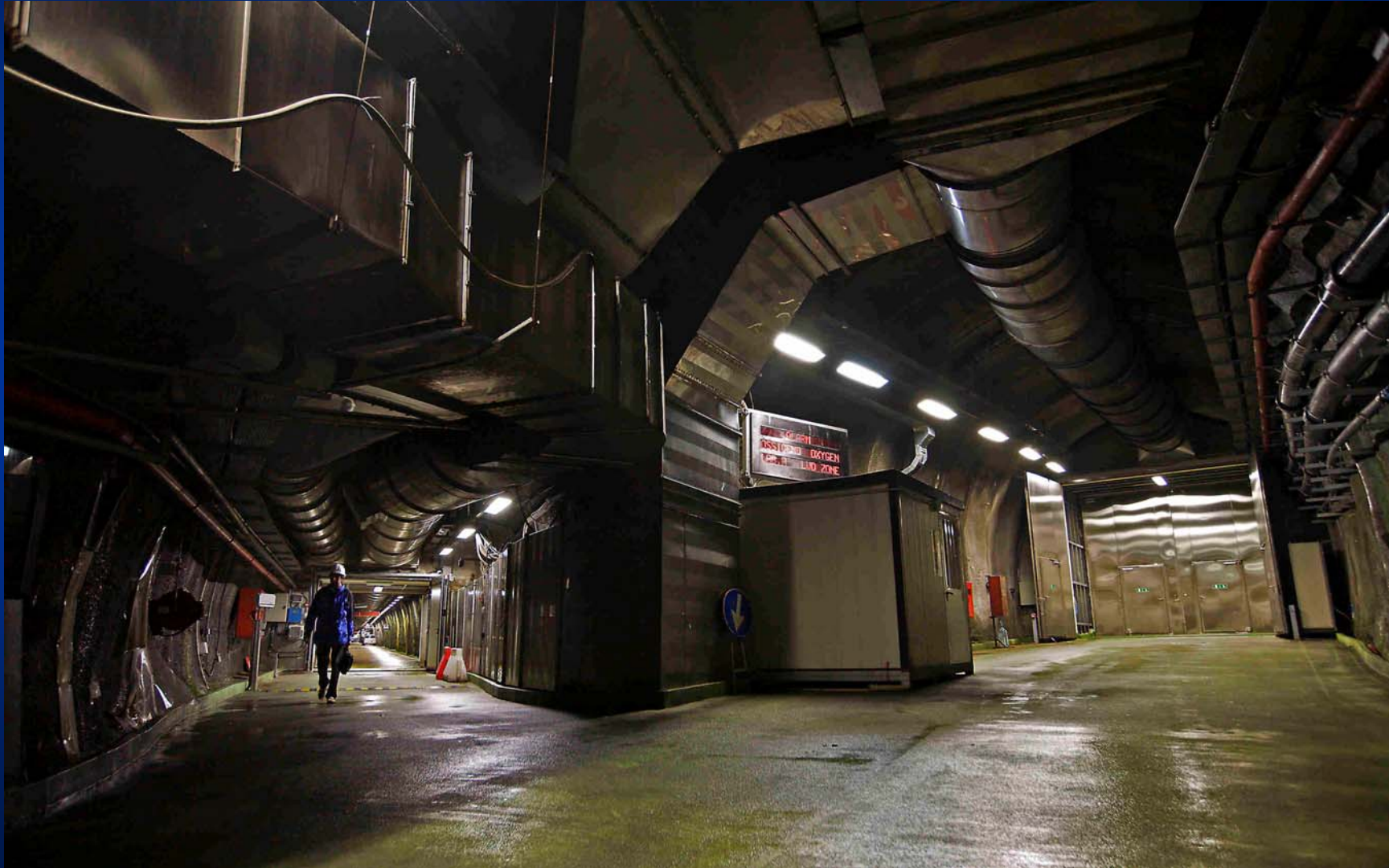


Das Tunnelsystem mit den Labors 1'400 m unter der Felsoberfläche.

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

CRESST-Experiment



Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

CRESST-Experiment



Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

CRESST-Experiment



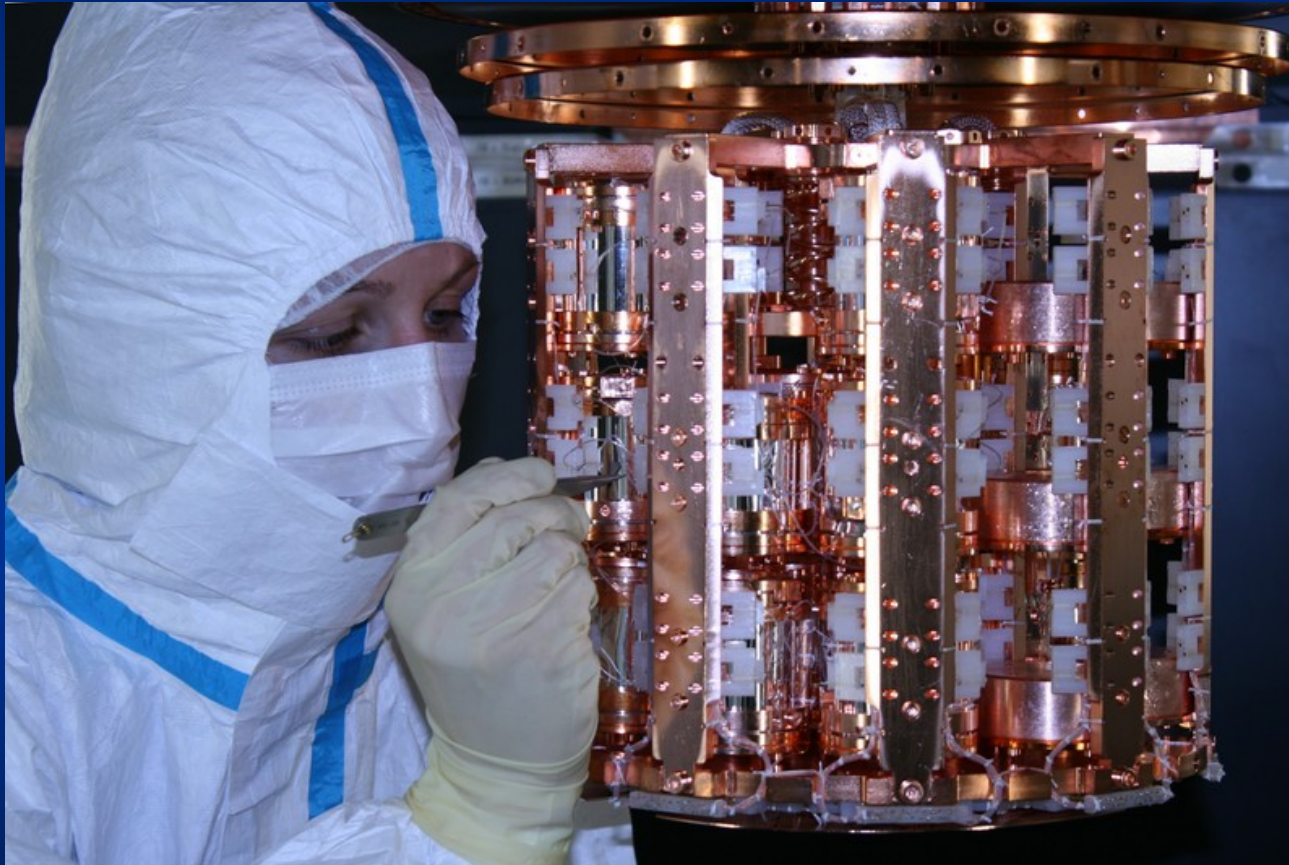
„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

Dieses Kristall aus CaWO_4 für WIMPs soll die winzigen Lichtblitze und eine Temperaturerhöhung um 10^{-6} K bei der Wechselwirkung eines WIMP (Neutralino) in einem Atomkern des Kristalls nachweisbar machen.

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

CRESST-Experiment



„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

33 Einzelkristalle bilden den Gesamtdetektor, der auf 10 mK über dem absoluten Nullpunkt gekühlt wird und gegen äußere Strahlungseinflüsse durch 50 cm Polyethylen, 20 cm Blei und Kupfer gegen Störstrahlungen abgeschirmt ist.

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

CRESST-Experiment



33 Einzelkristalle bilden den Gesamtdetektor, der auf 10 mK über dem absoluten Nullpunkt gekühlt wird und gegen äußere Strahlungseinflüsse durch 50 cm Polyethylen, 20 cm Blei und Kupfer gegen Störstrahlungen abgeschirmt ist.

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

CRESST-Experiment



Der drei Stockwerke hohe Experimentalaufbau mit dem Kryostaten.

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Kandidaten

- **WIMPs (Weak Interacting Massive Particles)**

Das Neutralino (das leichteste supersymmetrische Teilchen) mit einer Ruhemasse von einigen Hundert GeV/c^2 .

2006 wurden als Untergrenze $46 \text{ GeV}/c^2$ angenommen.

Was ist Supersymmetrie?

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Supersymmetrie

Bei der Supersymmetrie geht darum, die Trennung zwischen Materie und Kräften zu überwinden.

Marieteilchen haben einen halbzahligem Spin und sind damit sogenannte Fermionen.

Die mit den Kräften verbundenen Teilchen (Wechselwirkungsteilchen) haben ganzzahligen Spin und sind Bosonen.

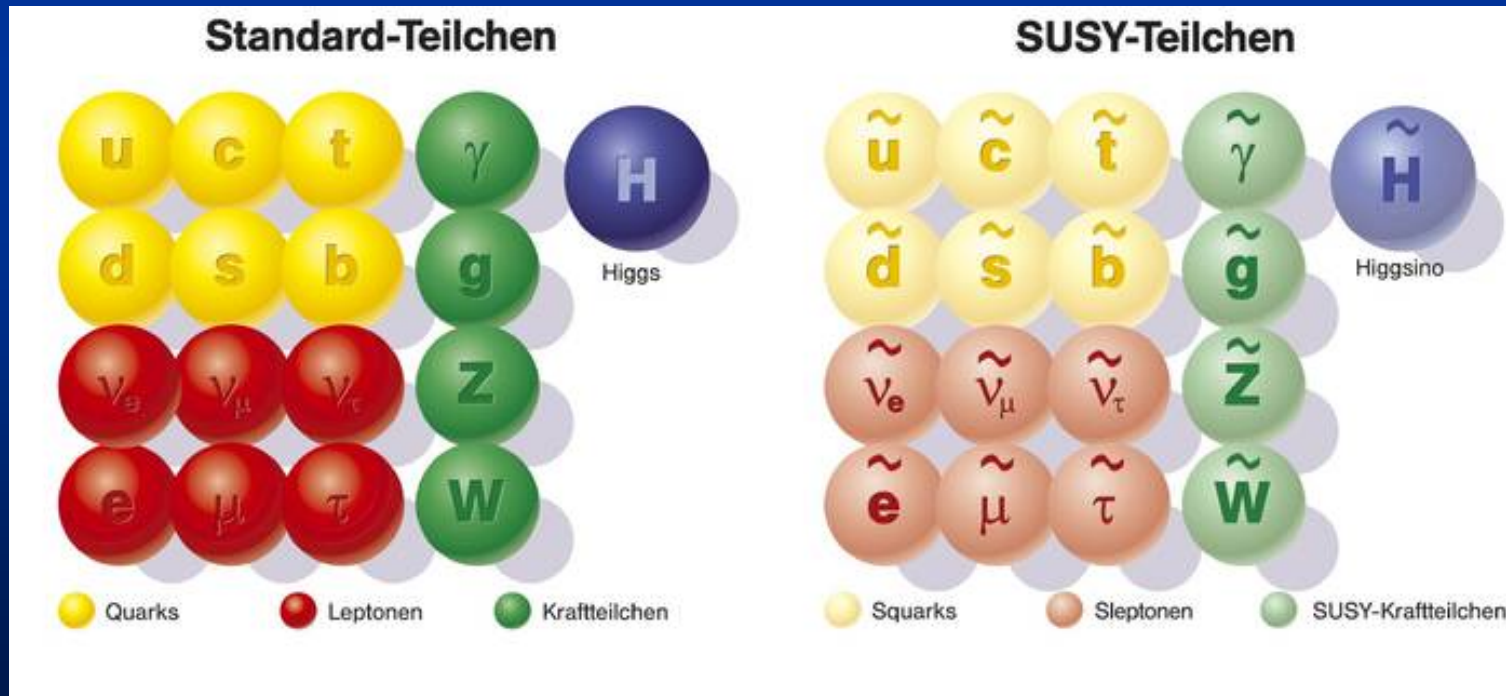
Jedem herkömmlichen Teilchen wird in der Theorie ein supersymmetrischer Partner zugewiesen - die Zahl der Teilchen verdoppelt sich.

Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Supersymmetrie

Jedem herkömmlichen Teilchen wird in der Theorie ein supersymmetrischer Partner zugewiesen - die Zahl der Teilchen verdoppelt sich.



Kräfte und Teilchen

Dunkle Materie

Supersymmetrie

Jedem herkömmlichen Teilchen wird in der Theorie ein supersymmetrischer Partner zugewiesen - die Zahl der Teilchen verdoppelt sich.

Die supersymmetrischen Partner der Materieteilchen verhalten sich wie Kraftteilchen und umgekehrt. Die Trennung von Materie und Kräften wäre damit aufgehoben.

Die Vereinheitlichung der Elementarkräfte wäre erheblich vereinfacht. Bisher gibt es aber keinerlei Beweis für die Existenz von supersymmetrischen Teilchen.

Kräfte und Teilchen

Superstring-Theorie

String-Theorien

Hypothetische physikalische Modelle, die an Stelle von „nulldimensionalen“ Teilchen eindimensionale strings (Saiten) als grundlegende Objekte benutzen, z.B. zur Beschreibung der Gluonen.

Superstring-Theorien beziehen die Supersymmetrie mit ein und schaffen ein Verbindung zur 11-dimensionalen sogenannten Supergravitation, die in der M-Theorie mündet, die mit höherdimensionalen Branen arbeitet. Elementarteilchen stellen in dieser Theorie verschiedene Schwingungszustände der Branen dar.

Bis jetzt ist unklar, ob diese Theorien überprüfbare Aussagen ermöglichen.

Kräfte und Teilchen

Superstring-Theorie

String-Theorien

Hypothetische physikalische Modelle, die an Stelle von „nulldimensionalen“ Teilchen eindimensionale strings (Saiten) als grundlegende Objekte benutzen, z.B. zur Beschreibung der Gluonen.

Superstring-Theorien beziehen die Supersymmetrie mit ein und schaffen ein Verbindung zur 11-dimensionalen sogenannten Supergravitation, die in der M-Theorie mündet, die mit höherdimensionalen Branen arbeitet. Elementarteilchen stellen in dieser Theorie verschiedene Schwingungszustände der Branen dar.

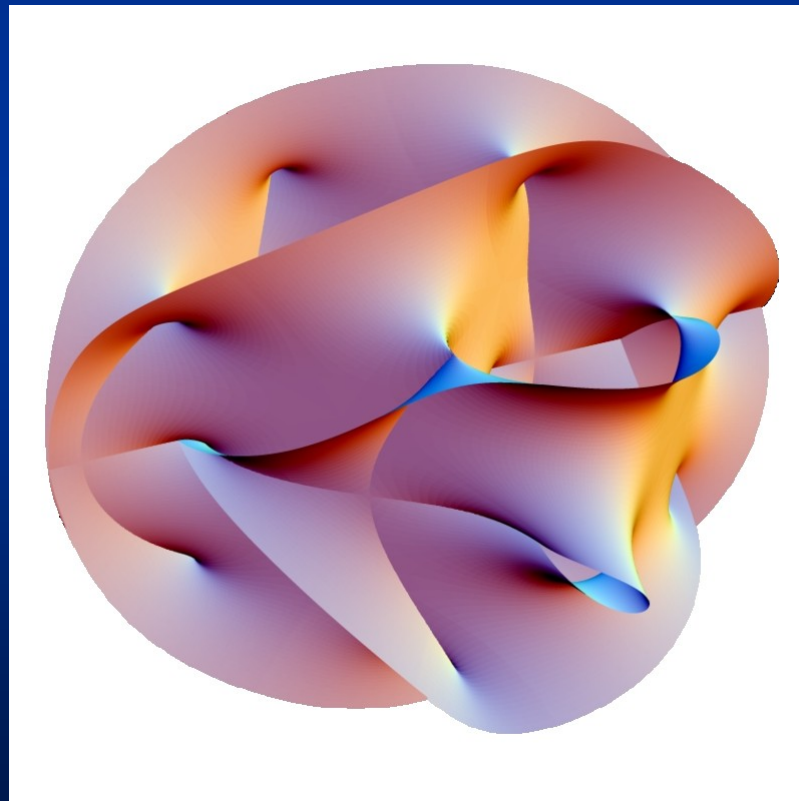
Die Basisdimension ist die Planck-Länge. Es gibt die Vermutung, dass diese Theorien aber auch unterhalb der Planck-Dimensionen Gültigkeit haben.

Kräfte und Teilchen

Superstring-Theorie

String-Theorien

Darstellung eines Punktes in Form eines mehrdimensionalen Schwingungsmodus



Kräfte und Teilchen

Higgs-Feld und die Masse

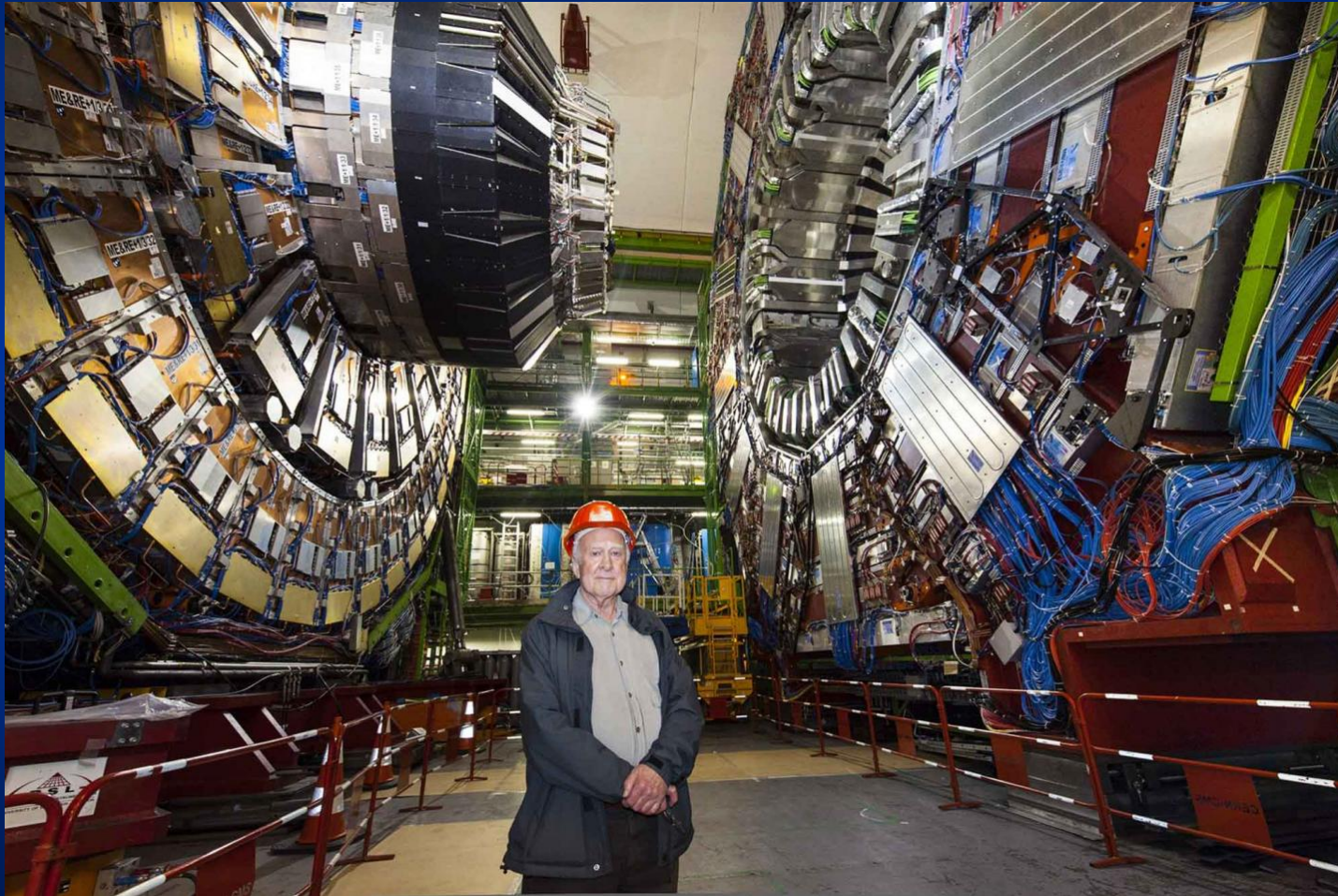
1964 schlugen Peter Higgs und unabhängig und fast gleichzeitig auch zwei Forschergruppen: François Englert und Robert Brout von der Université Libre de Bruxelles sowie T. W. B. Kibble, Carl R. Hagen und Gerald Guralnik vom Imperial College einen nach Higgs benannten Mechanismus vor, nach dem ein grundsätzliches Problem der Elementarteilchenphysik gelöst werden kann.

In der Quantenelektro- und Quantenchromodynamik sind die entsprechenden (Eich-) Bosonen: Photonen und Gluonen masselos. Hingegen besitzen die Bosonen der schwachen Wechselwirkung sehr große Massen, was in der Theorie zu Verletzungen der sogenannten „Eichinvarianz“ führt. Der Higgs-Mechanismus löst dieses Problem, indem den Teilchen die Masse durch Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld zugewiesen wird.

Kräfte und Teilchen

Higgs-Feld und die Masse

2013 Nobelpreis für Peter Higgs und François Englert.



Peter Higgs vor dem CMS-Detektor bei CERN.

Kräfte und Teilchen

Higgs-Feld und die Masse

2013 Nobelpreis für Peter Higgs und François Englert.

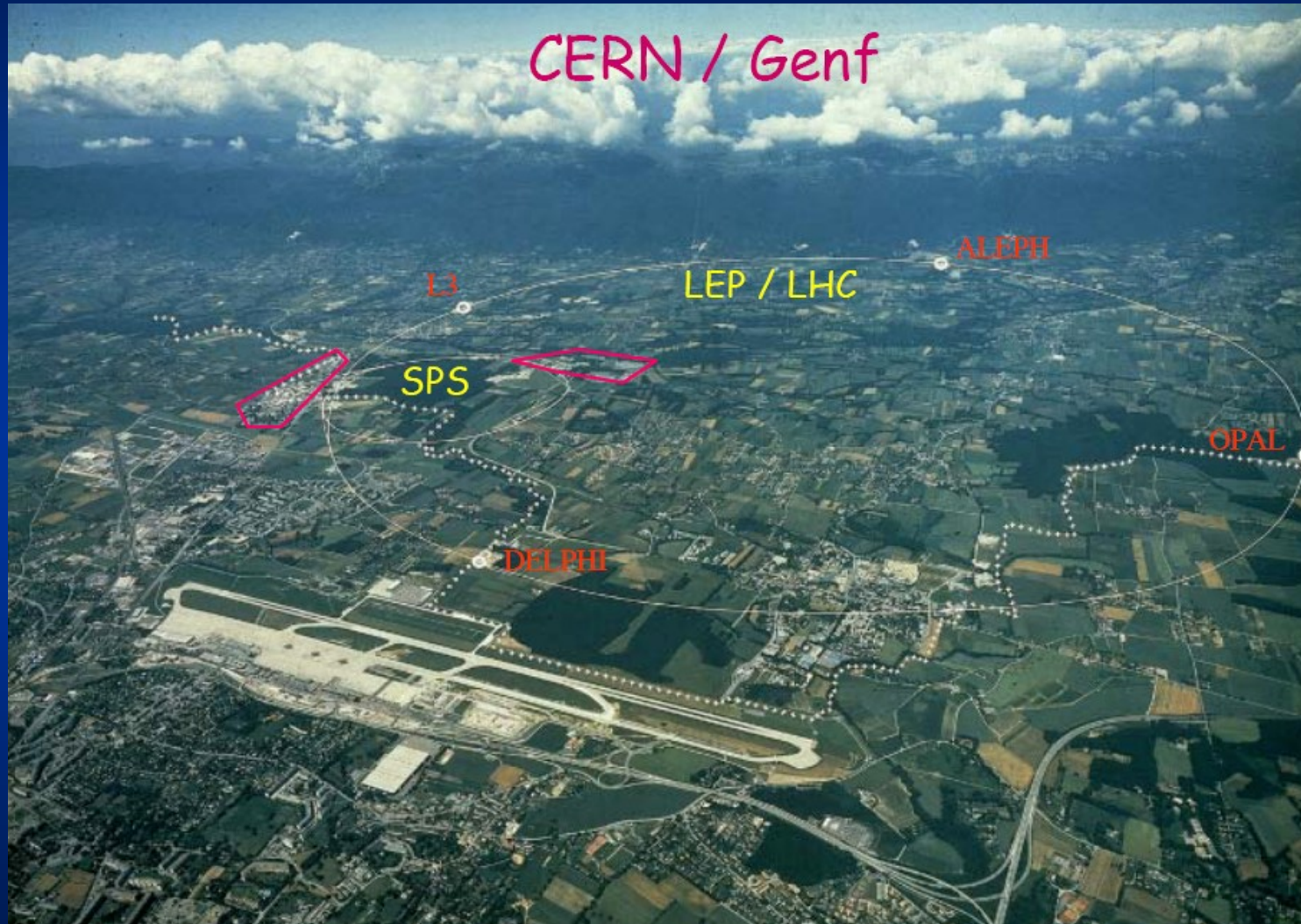
Nach Arbeiten von T.W.B. Kibble 1967 konnte der Mechanismus auf die schwache Wechselwirkung angewendet werden. Hieraus entsprang die Vorhersage der W- und Z-Bosonen, die schließlich 1983 nachgewiesen werden konnten.

Abdus Salam verwendete 1968 den Higgs-Mechanismus für die elektroschwache Theorie von Sheldon Lee Glashow und Steven Weinberg. Damit konnte das Standardmodell der Teilchenphysik erschaffen werden.

Alle drei erhielten dafür 1979 den Nobelpreis für Physik.

Kräfte und Teilchen

Großlabor CERN



Kräfte und Teilchen

Großlabor CERN

Beschleuniger-Energien

DESY (Hamburg) (HERA)	27.5 GeV/c² (e⁻) 920 GeV/c² (p⁺)
CERN 1959 (PS)	28 GeV/c²
Brookhaven 1960	33 GeV/c²
FermiLab 1972	300 GeV/c²
CERN 1976 (SPS)	450 GeV/c²
CERN 1989 (LEP)	2 x 55 GeV/c²
CERN 1994 (LEP II)	2 x 100 GeV/c²
CERN 2004/2008 (LHC)	8 TeV/c²

Kräfte und Teilchen

Großlabor CERN

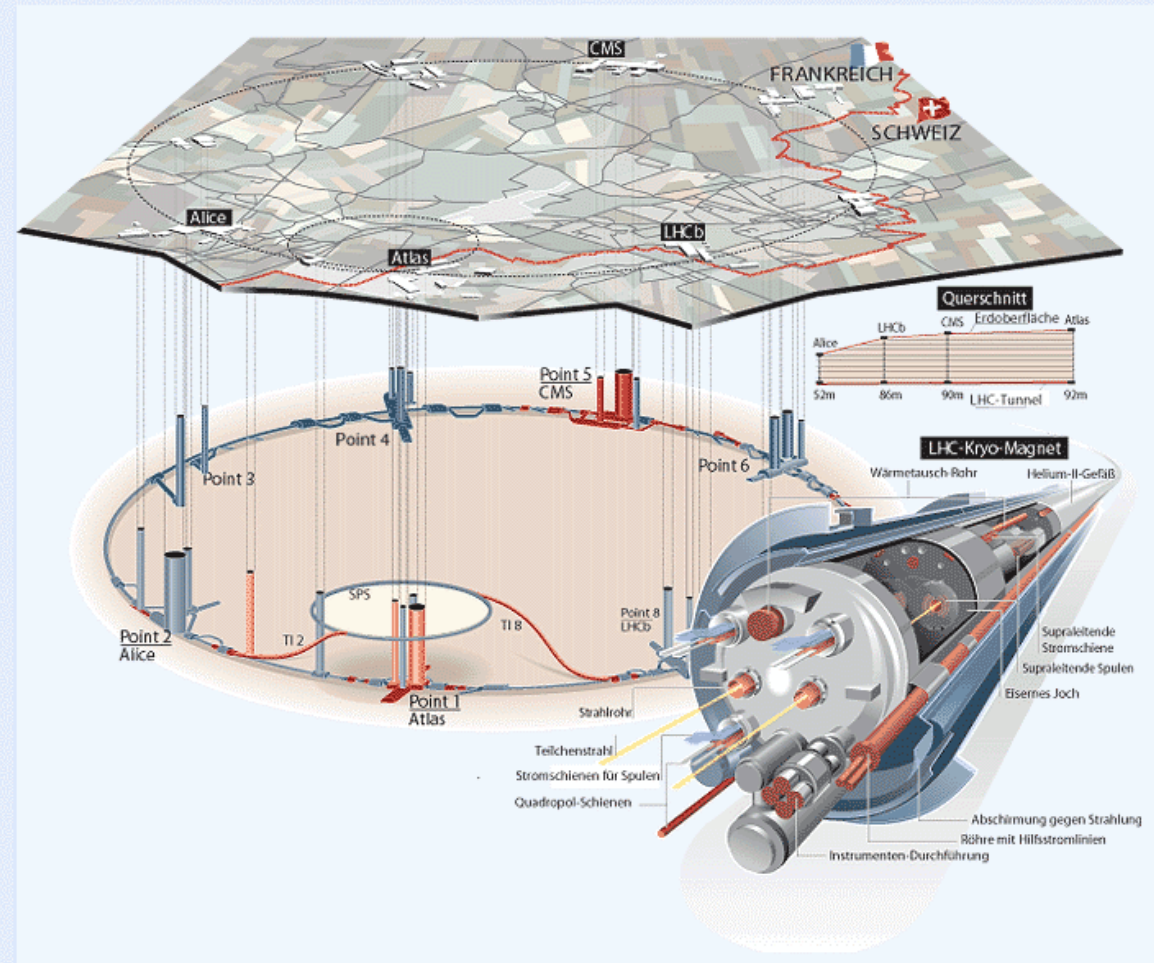
Organisation

- **exterritorial: Schweiz/Frankreich**
- **20 Staaten beteiligt**
- **3'000 Mitarbeiter**
- **694 Mio. EUR Jahresetat**
- **8'000 Gastwissenschaftler aus 85 Ländern**

Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC)

Die größte Datenschleuder der Welt

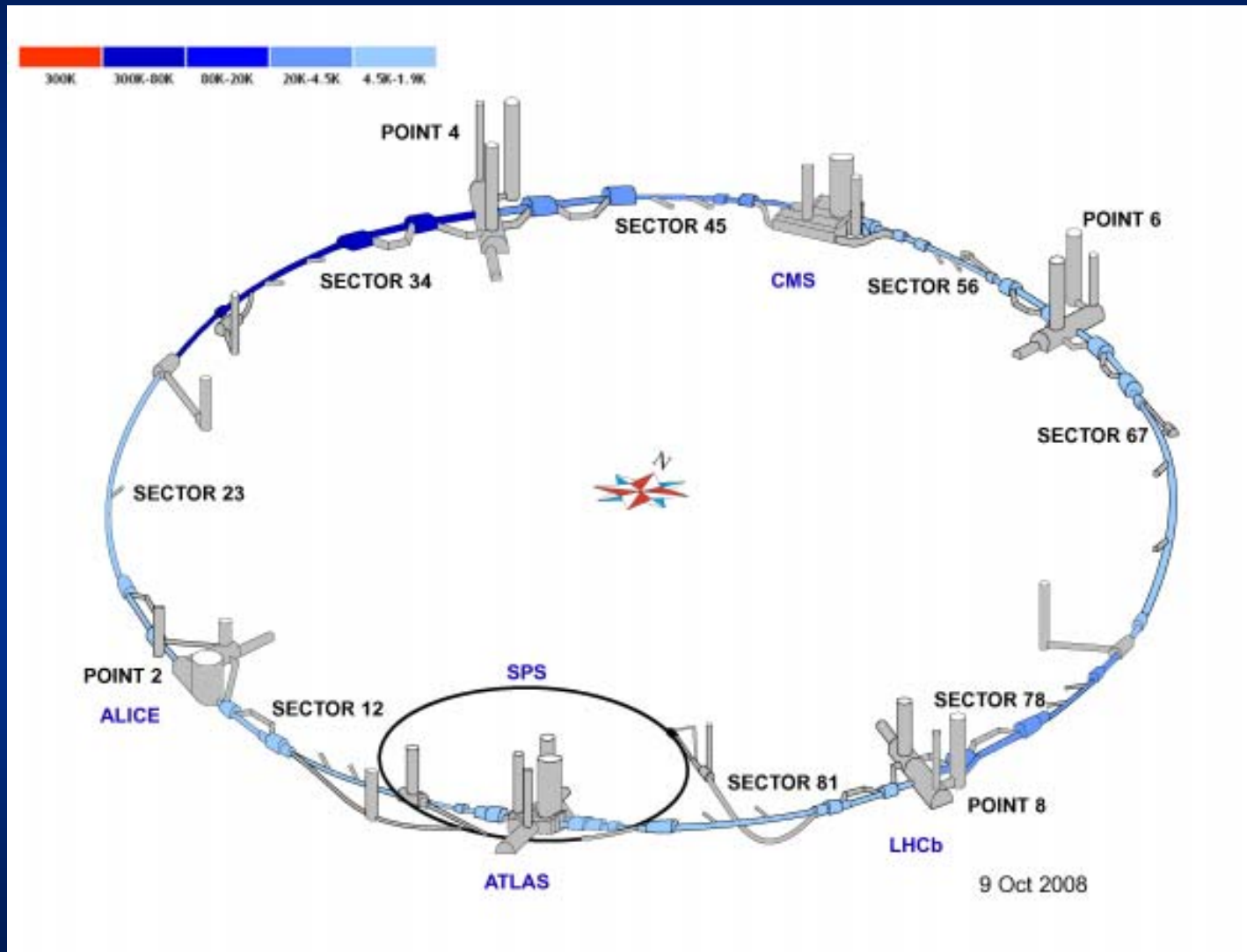


F.A.Z.-Grafik: Karl-Heinz Döring

Alle Experimente am LHC liefern gemeinsam eine Datenmenge von knapp 1 Gigabyte/s.

Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC)



Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC)



Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC)



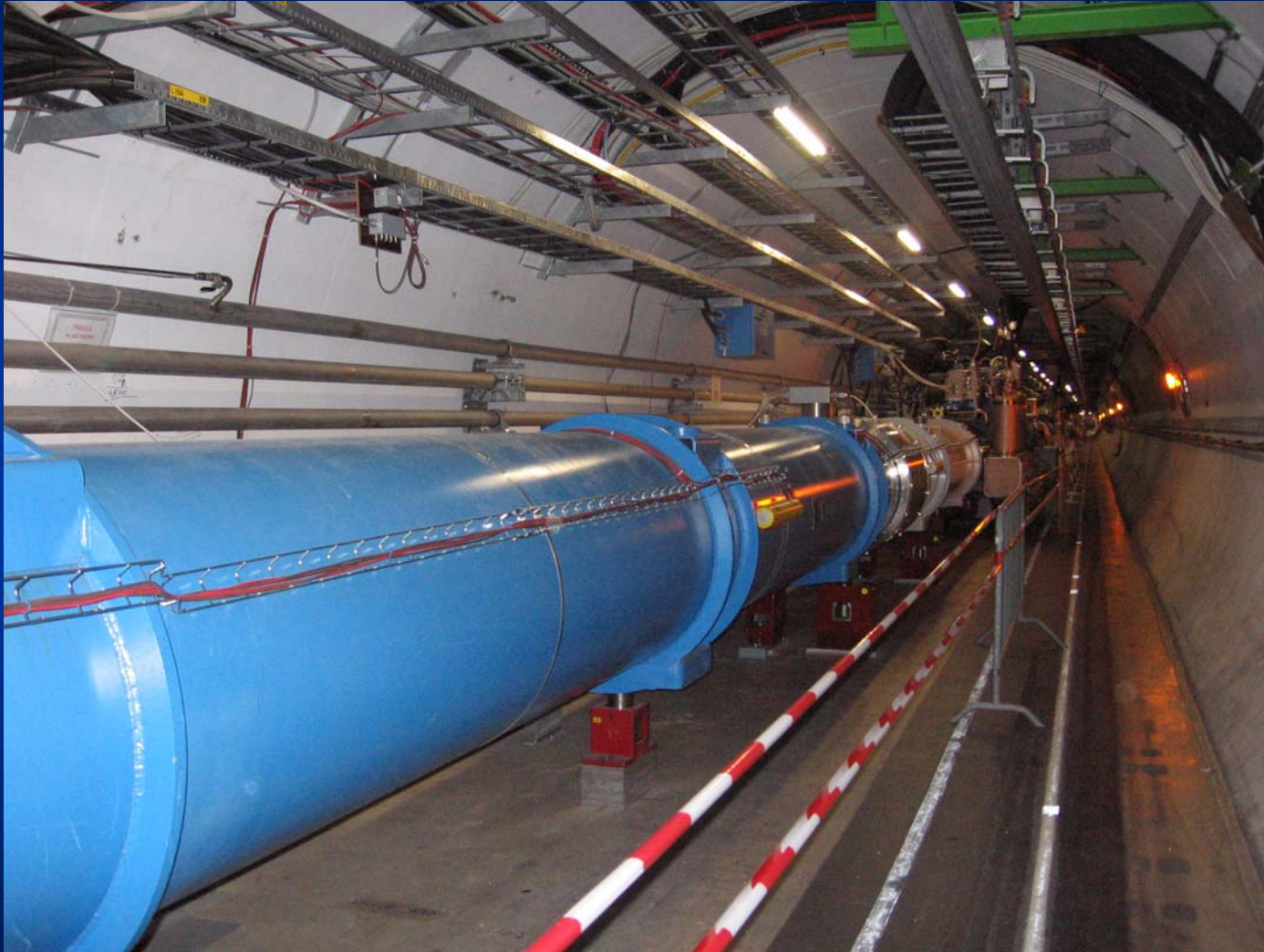
Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC)



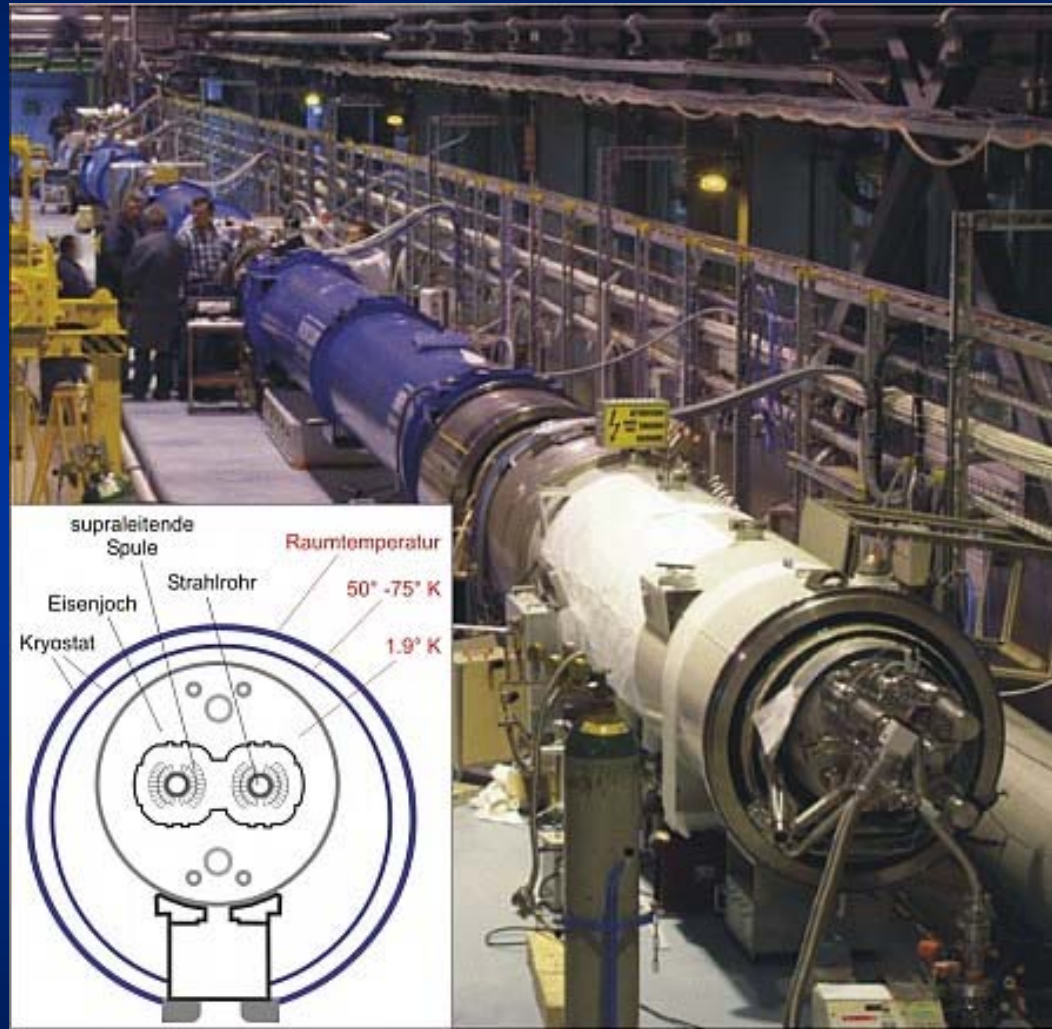
Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC)



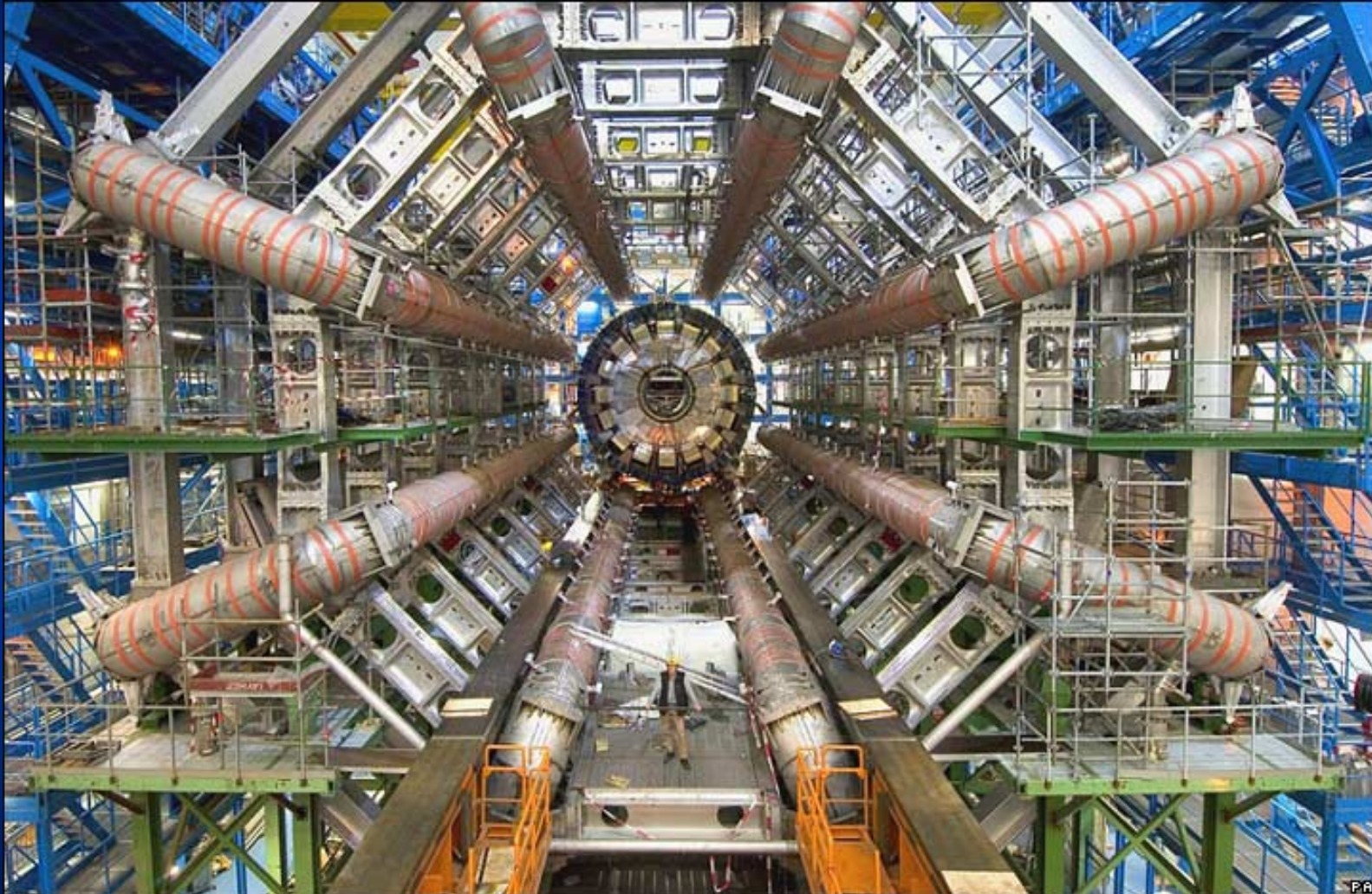
Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC)



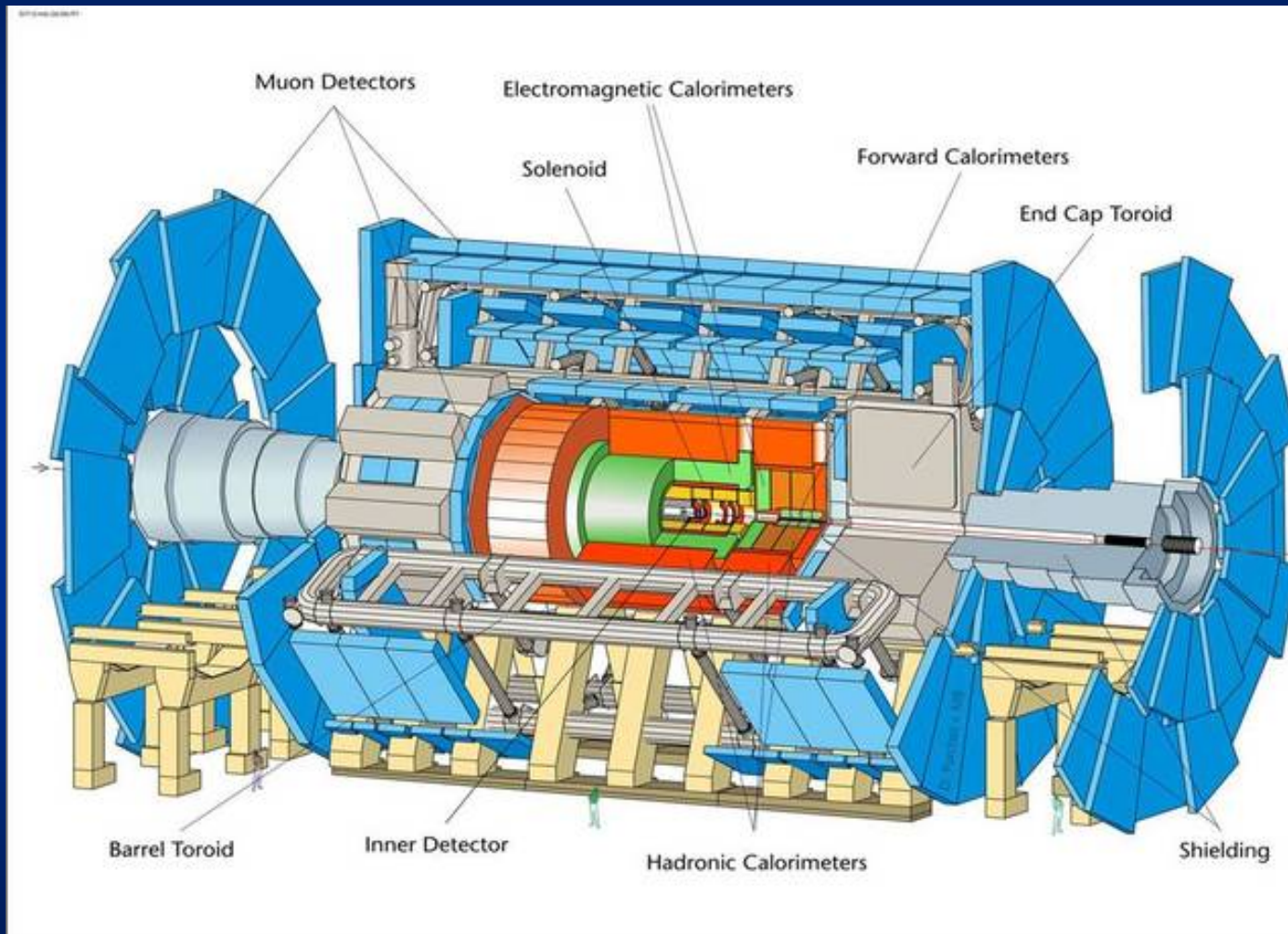
Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC): ATLAS



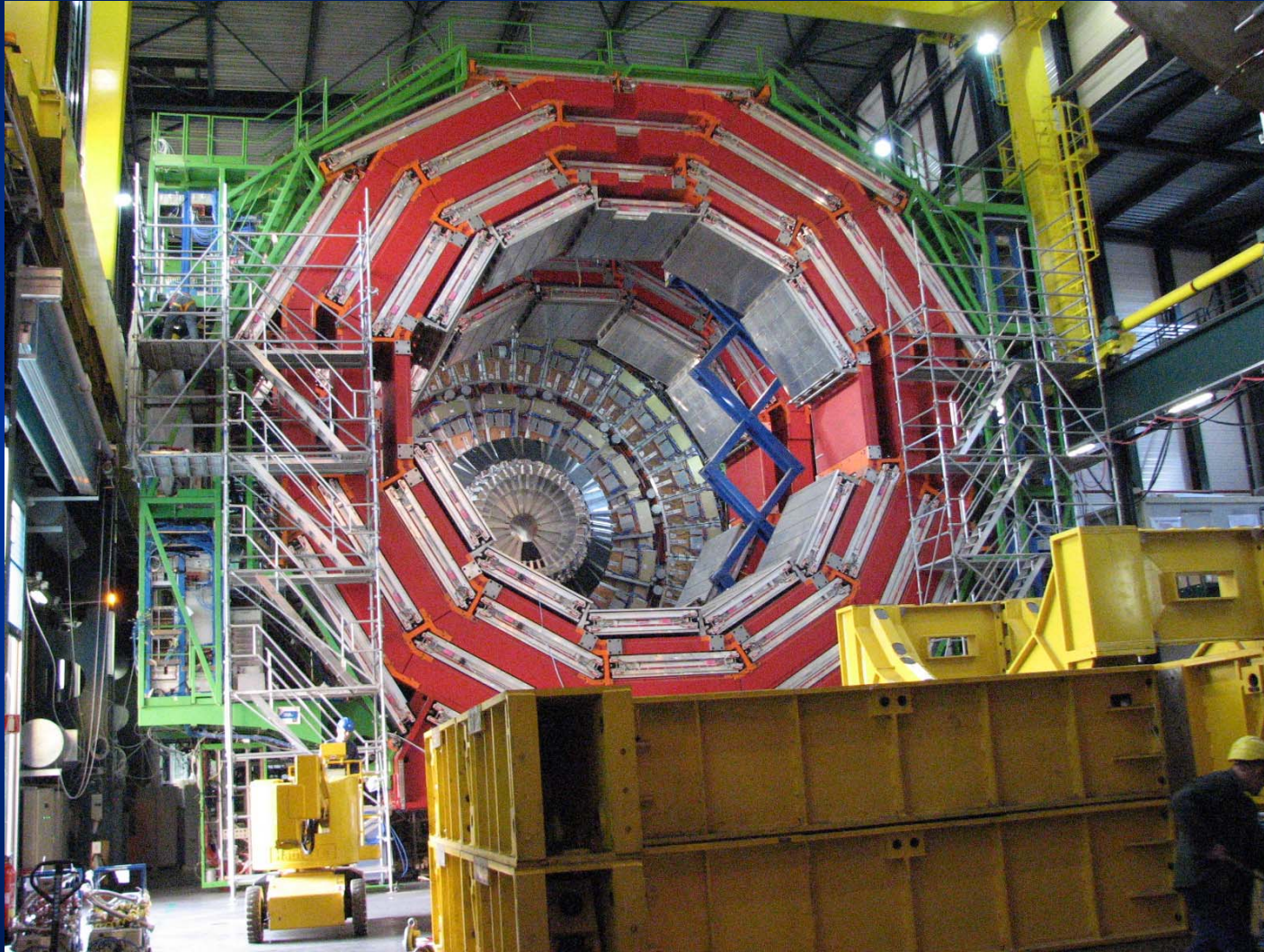
Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC): CMS 2007



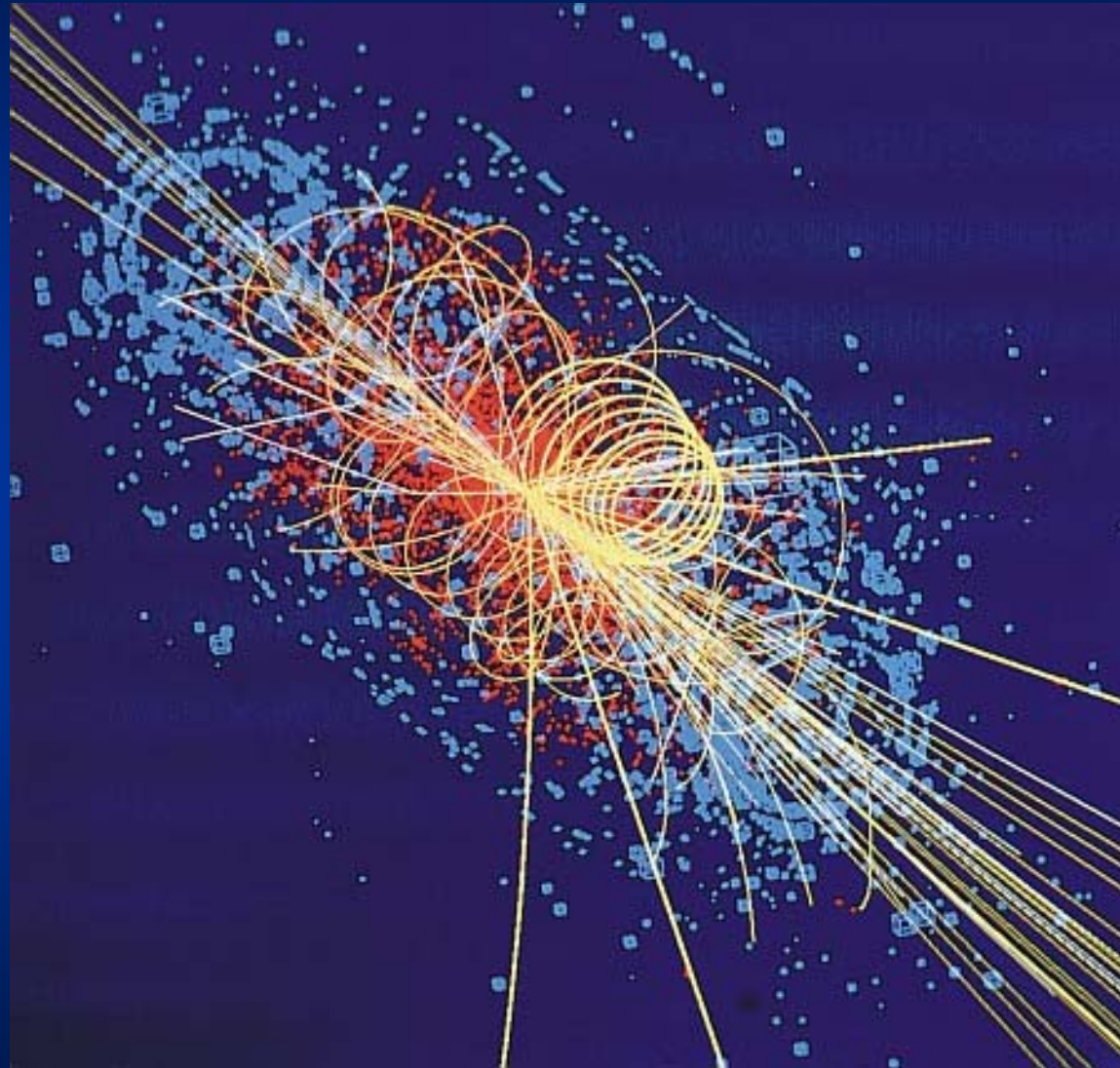
Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC): CMS 2007



Kräfte und Teilchen

Large Hadron Collider (LHC): p-p-Kollision



Kräfte und Teilchen

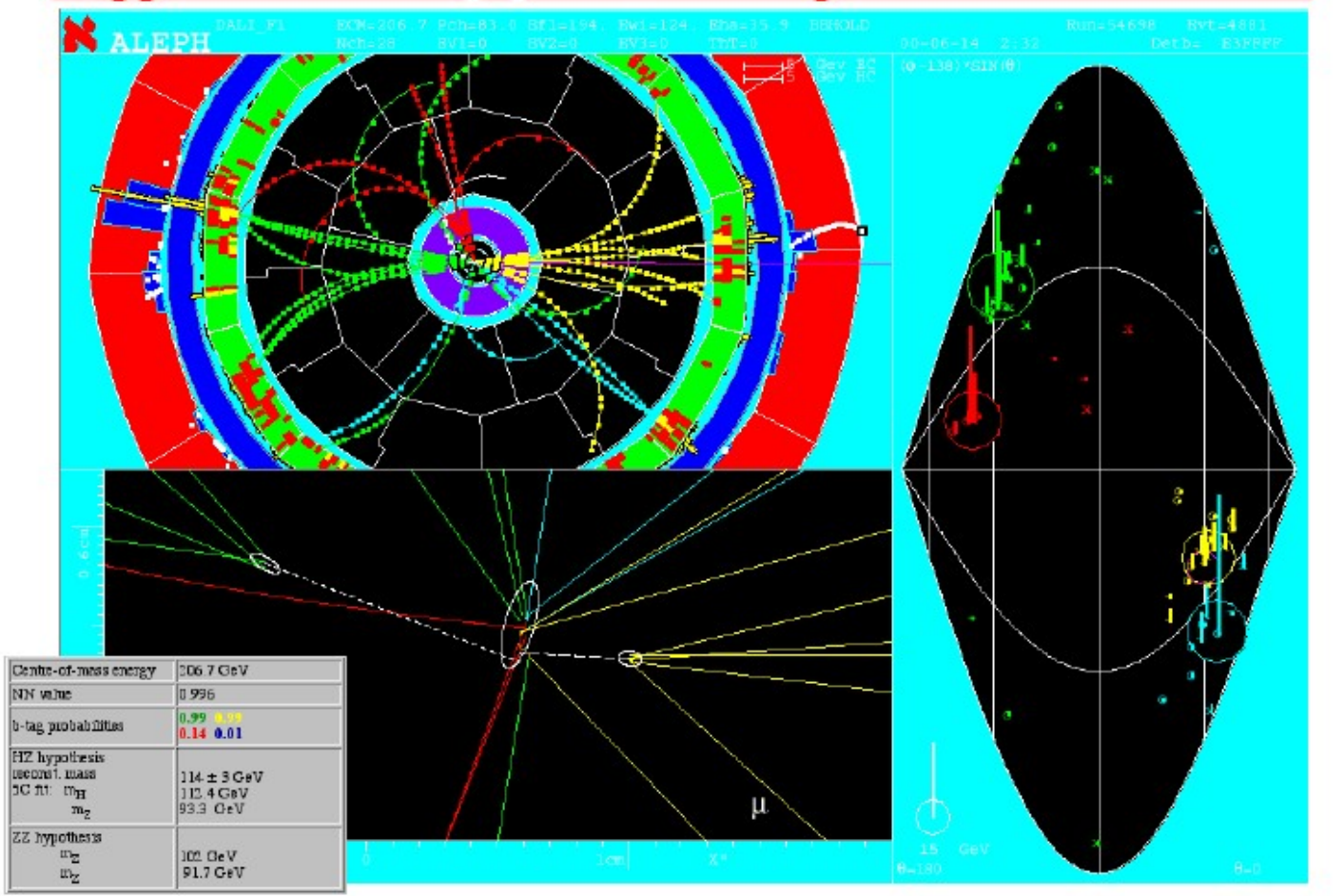
Suche nach dem Higgs-Boson

Zwei Protonen treffen sich – Higgs!

Kräfte und Teilchen

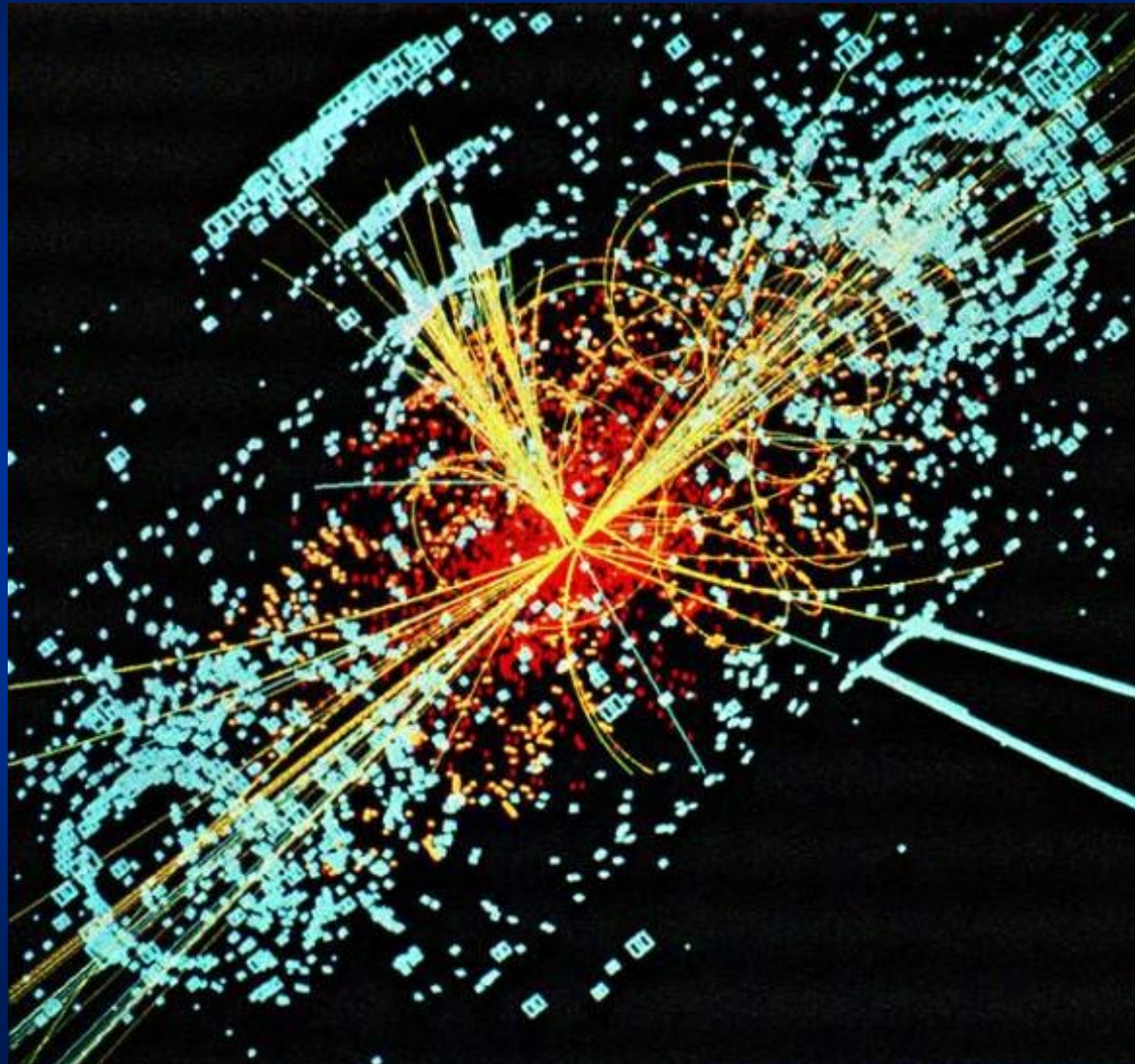
Suche nach dem Higgs-Boson

Higgs-Suche in e^+e^- Vernichtungsreaktionen: direkt



Kräfte und Teilchen

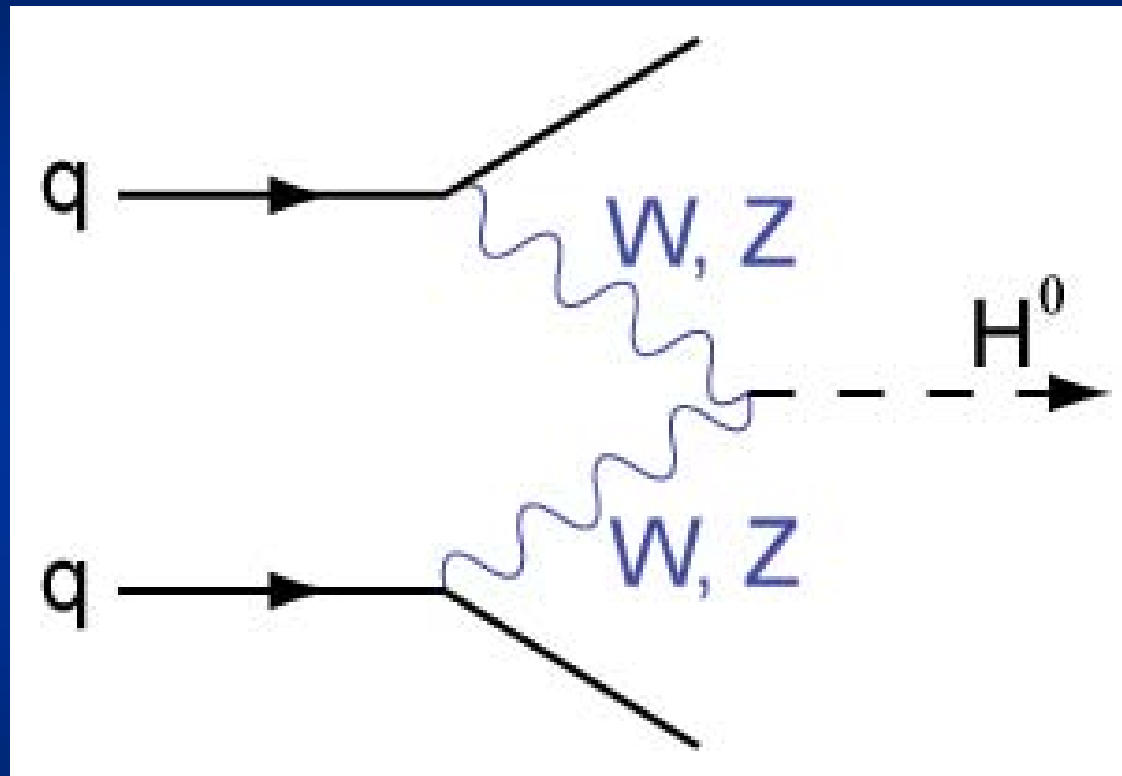
Suche nach dem Higgs-Boson



CMS: Higgs-Event

Kräfte und Teilchen

Suche nach dem Higgs-Boson



Ein möglicher Entstehungsmechanismus für das Higgs-Boson im Feynman-Diagramm: Zwei Quarks wechselwirken schwach mit einander. Aus den entstehenden W- und Z-Bosonen entsteht ein Higgs-Boson H^0 .

Kräfte und Teilchen

Die Entdeckung des Higgs-Bosons

Im Juli 2012 gaben die Forscher von CERN bekannt, dass sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,99995 % ein Teilchen mit den erwarteten Eigenschaften des Higgs-Bosons bei 125 GeV/c² mit einer Lebensdauer von 10⁻²⁰ s entdeckt haben.

2013 wurde bekannt gegeben, dass die beobachteten fermionischen Zerfälle gut mit den aus der Theorie abgeleiteten Erwartungen übereinstimmen.

Dunkle Energie

Die Herkunft von Λ

Friedmann-Gleichung

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

$$\Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_\nu + \Omega_\gamma + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

$$\sim 0.04 + \sim 0.23 + \sim 0 + \sim 0 + \sim 0.73 + \sim 0 = 1$$

(<0.0072) (~0.00001) (-0.003)

Ω_B	Baryonischer Materiedichteanteil
Ω_{DM}	Dunkle Materiedichteanteil
Ω_ν	Äquivalenter Dichteanteil der Neutrinos
Ω_γ	Äquivalenter Dichteanteil der Photonenstrahlung
Ω_Λ	Äquivalenter Dichteanteil von Λ („Dunkle Energie“)
Ω_k	Äquivalenter Dichteanteil der Krümmung

Dunkle Energie

Die Herkunft von Λ

Friedmann-Gleichung

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2} = \frac{8\pi G}{3H_0^2}\rho_{\text{vac}} = \frac{\rho_{\text{vac}}}{\rho_c}$$

$$\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2}\rho_{\text{vac}}$$

$$\rho_{\text{vac}} = -\frac{p}{c^2}$$

Dunkle Energie

Die Folgen von Λ

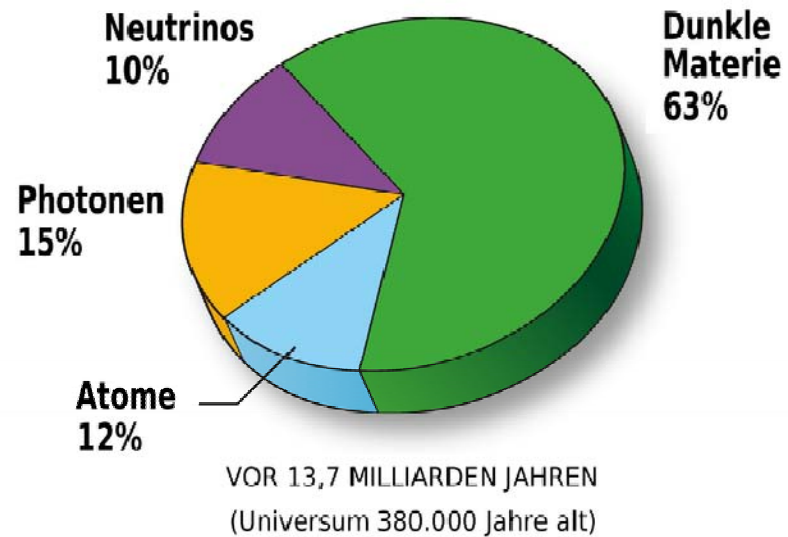
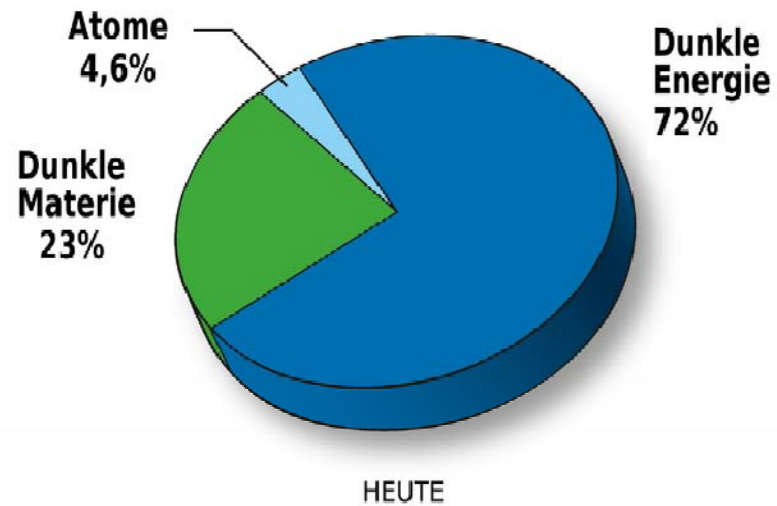
$$\Lambda = \frac{8\pi G}{c^2} \rho_{\text{vac}}$$

$$\rho_{\text{vac}} = -\frac{p}{c^2}$$

- Λ ist eine Kraft und erzeugt einen negativen Druck, sofern die Vakuum-Energiedichte von Null verschieden ist!
- Die Expansion wird so von Λ angetrieben, von den massebezogenen Komponenten gebremst.
- Die Λ -Kraft ist konstant und vom Expansionszustand unabhängig. Im Laufe der Expansion überwiegt sie irgendwann, da alle anderen Kräfte mit der Expansion abnehmen.

Dunkle Energie

Die Folgen von Λ



(WMAP - NASA)

Dunkle Energie

Die Folgen von Λ

Auf diese Weise befinden wir uns jetzt in einem beschleunigt expandierenden Universum.