



Was ist CERN ?



CERN steht für:

Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

Der *Europäische Rat für Kernforschung* beschloss im Jahre 1954, ein von damals 12 europäischen Mitgliedsländern personell und finanziell getragenes Laboratorium für Teilchenphysik zu errichten.

Standort wurde Meyrin, ein Dorf in der Nähe von Genf an der französischen Grenze.

Was macht CERN ?



Die Forschung im CERN geht über die Atom- und Kernforschung hinaus und untersucht die Eigenschaften der elementaren Bausteine der Materie.

Die offizielle Bezeichnung des CERN lautet deshalb:

European Laboratory for Particle Physics
Europäisches Laboratorium für
Teilchenphysik

Ist bereits alles gesagt?



KÖPFE DER UNIVERSITÄT

Die fundamentalen Fragen

Professor Kay Königsmann, Teilchen- und Kernphysik

In dieser Rubrik stellen sich Menschen vor, die an der Universität Freiburg arbeiten – entweder in der Lehre oder in der Forschung.

Wie dünn ist ein Haar? Wie klein ist ein Sandkorn? Schon das bringt uns an die Grenzen unserer Vorstellungskraft. Umso unvorstellbarer sind die Dimensionen, mit denen wir uns an unserem Institut in der Grundlagenforschung beschäftigen: Wir suchen nach den elementaren Teilchen, die die Welt im Innersten zusammenhalten und nicht mehr teilbar sind.

Lange hat man die Atome dafür gehalten, die aber einen noch viel kleineren Kern haben, der wiederum aus Protonen und Neutronen besteht. Aber auch diese Winzlinge lassen sich, wie wir glauben, noch teilen in Quarks. Das sind, wie die



Kay Königsmann

FOTO: RÜFFER

treffen und die man sich selber so noch nie gestellt hat.

Aufschluss über die Struktur der Protonen und Neutronen, mein Arbeitsgebiet, können wir nur indirekt mit Streuexperimenten gewinnen. Es ist, als würden wir einen Mülleimer mit kleinen Gewehrkegeln beschließen. Aus dem, was rauskommt, können wir schließen, was drin war.

Unsere Forschung ist nicht auf die praktische Anwendbarkeit aus. Wir sammeln fundamentales Wissen an und versuchen die Rätsel der Natur zu lösen. Insofern ist sie verwandt mit der Philosophie und der Astronomie. Die Grundidee ist, den Urknall verstehen zu wollen, den wir mit unseren Experimenten simulieren. Wir arbeiten dabei eng mit dem CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) in Genf zusammen, wo ich 30 Prozent meiner Arbeitszeit verbringe. Ohnehin ist es typisch für Physiker wie mich, eine Art Nomadenleben zu führen. An vielen Orten der Welt habe ich jeweils für ein paar Jahre gearbeitet. Erst kürzlich habe ich geheiratet, was vielleicht auf eine gewisse Sesshaftigkeit hindeutet. Immerhin lebe ich jetzt schon seit 1994 in Freiburg.

Aufgezeichnet von Anita Rüffer



Elektronen, punktförmige Gebilde, die keine Größe haben, aber trotzdem massiv sind. Das ist eigentlich paradox und nicht mehr wirklich zu begreifen.

Weil diese Elementarteilchen sich der menschlichen Vorstellungskraft entziehen, versuchen wir die Phänomene mit Alltagsbildern zu beschreiben. Damit arbeiten wir und meinen, etwas verstanden zu haben, aber es stellen sich immer wieder neue Fragen. Verblüfft bin ich oft in den Vorlesungen für Erstsemester über die einfachen Fragen, die gestellt werden, die aber den Kern der Sache

In der BZ vom Freitag fand sich eine Kurzinformation über die Arbeit von Professor Kay Königsmann, Freiburg:

Die fundamentalen Fragen

Darin spricht er über Quarks, punktförmige Elektronen, Protonen und Neu(t)ronen mit Struktur und schließlich über seine Forschung bei CERN und dem damit verbundenen Nomadenleben.

Was wissen wir über das Innere der Materie ?



Der Schweizer Albrecht von Haller (1708-77) schrieb pessimistisch vorausschauend:

*Ins Innre der Natur dringt kein erschaffner Geist;
Zu glücklich, wenn sie noch die äußre Schale weist.*

Faust geht, um die Geheimnisse der Natur zu verstehen, sogar einen Pakt mit dem Teufel ein:

... dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält...
(Goethe, Faust I. 1)

Wie können wir etwas über die Materie erfahren ?



- Lichtmikroskop
- Röntgenstrahlen
- Elektronenmikroskop
- Neutronen
- Hochenergetische Teilchenstrahlen

CERN betreibt Teilchenbeschleuniger mit sehr hohen Energien zur Untersuchung und Erzeugung von Elementarteilchen

Bekanntes aus der Physik



Für Licht und ganz allgemein für elektromagnetische Strahlung (Handy), die sich mit Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8$ m/s fortpflanzt, gilt die Beziehung: Die Lichtgeschwindigkeit ist gleich dem Produkt aus der Wellenlänge und der Frequenz: $\lambda \cdot \nu = c$

Einstein zeigte 1905, dass beim Photoeffekt Licht als Korpuskularstrahlung (Quanten) mit der Energie: $E = h \cdot \nu$ in Erscheinung tritt, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist: $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$ eV s

Noch ein wenig Physik



Wenn aber Wellen sich als Teilchen darstellen, warum haben dann nicht auch Teilchen einen Wellencharakter?

Im Jahre 1924 tat der Franzose Louis De Broglie den entscheidenden Schritt und ordnete jeder bewegten Masse eine Wellenlänge zu:

$$\lambda = h/p$$

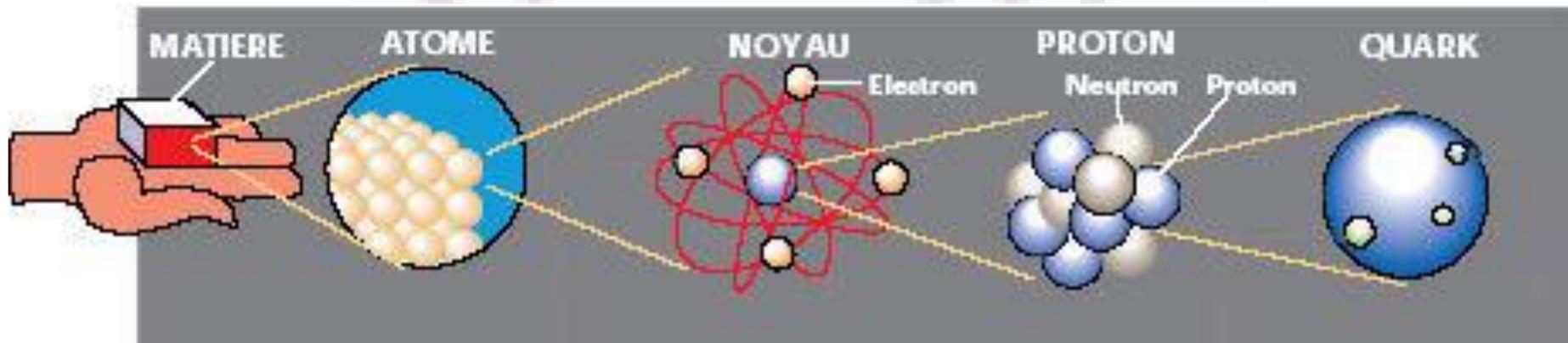
Dabei ist p der Impuls (Bewegungsgröße) der Teilchen

Was bringt uns das ?

Die Modellvorstellung des Materieaufbaus



- Atomdurchmesser: 10^{-11} m
- Kerndurchmesser: 10^{-14} m
- Protonen/Neutronendurchmesser: 10^{-15} m
- Die Größe der Quarks ?



Größenordnungen in der Physik



Kleine Längen

1	m	
10^{-3}	mm	
10^{-6}	μm	Zellen
10^{-9}	nm	DNA
10^{-12}	pm	Atom
10^{-15}	fm	Proton
10^{-18}	am	Quarks?

Hohe Energien

1	eV	Licht
10^3	keV	Röntgen
10^6	MeV	Gamma
10^9	GeV	PS, SPS
10^{12}	TeV	LHC

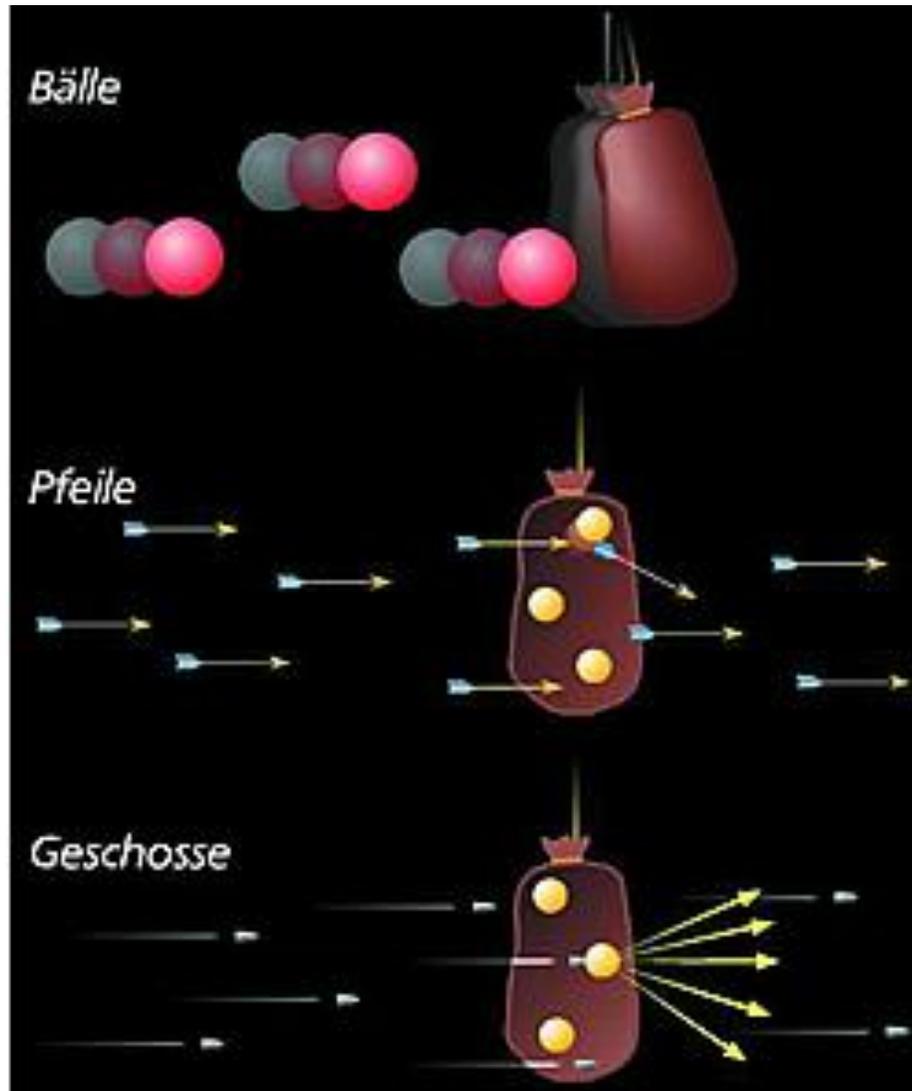
Energie (besser Impuls) und Auflösung



Um die Struktur eines Objekts erkennen zu können, muss die Wellenlänge des zur Untersuchung verwendeten „Lichts“ kleiner als die Größe der untersuchenden Struktur sein.

Jahr	Gerät	Energie in eV	Auflösung in m
1600	Lichtmikroskop	2	$600 \cdot 10^{-9}$
1920	UV-Mikroskop	6	$200 \cdot 10^{-9}$
1930	Elektronenmikroskop	$5 \cdot 10^3$	$250 \cdot 10^{-12}$
1895	Röntgenstrahlen	$20 \cdot 10^3$	$60 \cdot 10^{-12}$
1958	Synchrozyklotron (CERN)	$600 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^{-15}$
1960	Protonensynchrotron (PS)	$24 \cdot 10^9$	$50 \cdot 10^{-18}$
1980	Superprotonensynchrotron (SPS)	$400 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{-18}$
2007 ?	Large Hadron Collider (LHC)	$14 \cdot 10^{12}$	$0,09 \cdot 10^{-18}$

Der nukleare Kartoffelsack oder Streuversuche



Untersuchung der äußeren Form des Atomkerns

Die Streuung an Protonen und Neutronen gibt Informationen über die innere Struktur des Atomkerns

Die „tiefe inelastische Streuung“ weist auf eine innere Struktur der Protonen und Neutronen hin

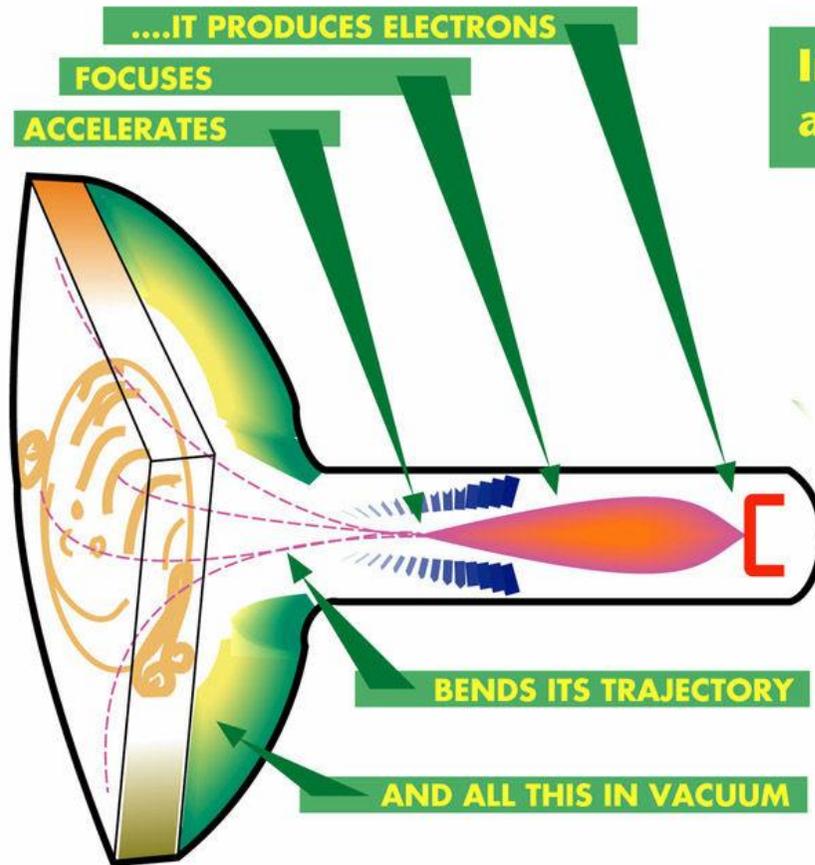
Luftbild von CERN



Energiezunahme durch Beschleunigung



DID YOU KNOW YOUR TELEVISION SET IS AN ACCELERATOR ?

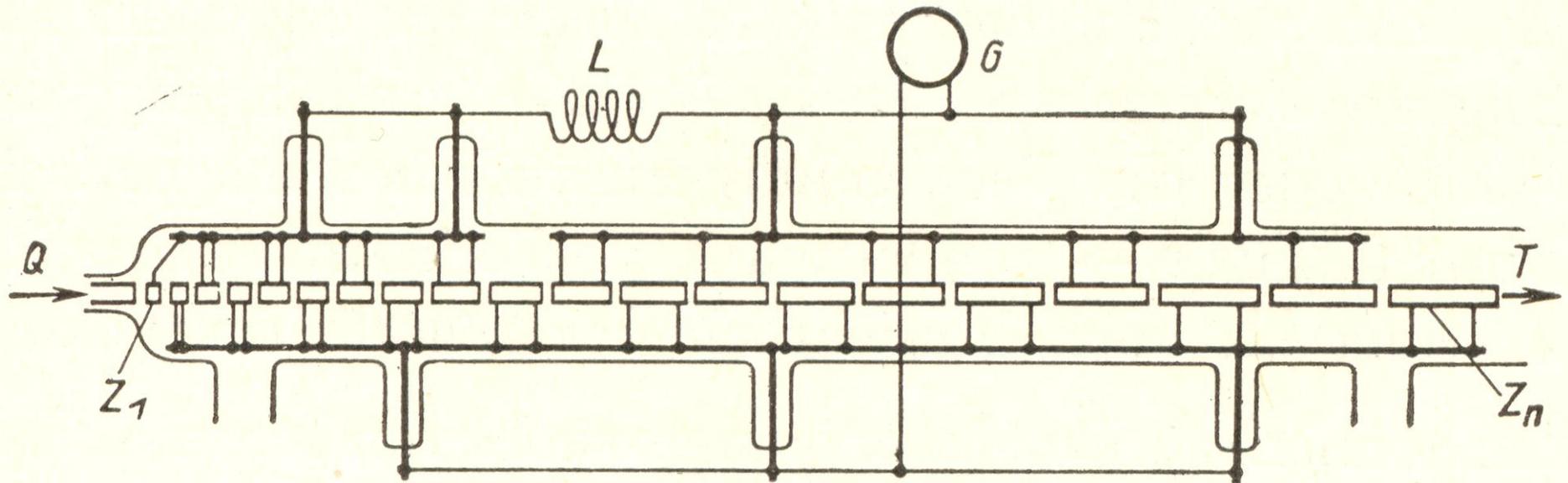


In your TV set, the electrons are accelerated to 20000 volts.

Linearbeschleuniger



Die geladenen Teilchen (Protonen, Elektronen) „sehen“ *zwischen* zwei Röhren ein beschleunigendes hochfrequentes elektrisches Feld und laufen *innerhalb* der Röhren in einem feldfreien Raum.



Kreisbeschleuniger und Speicherringe

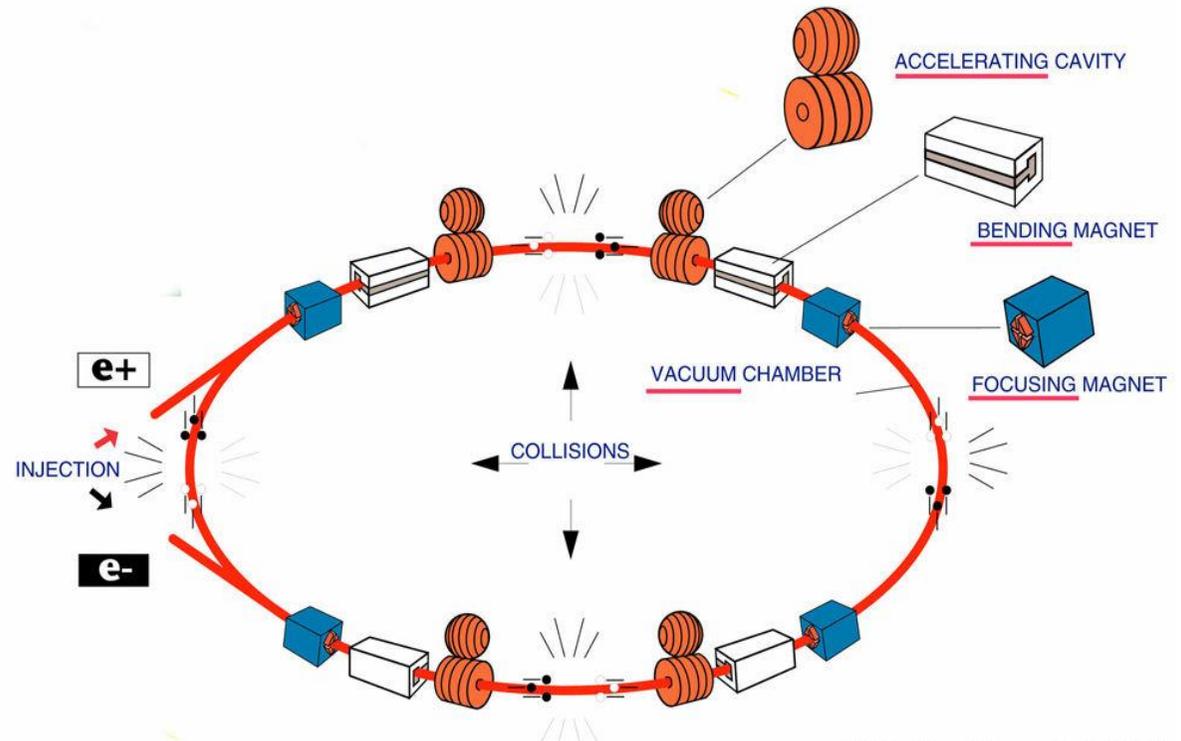


Die Ablenkung bewegter geladener Teilchen erfolgt in einem Magnetfeld durch die Lorentzkraft:

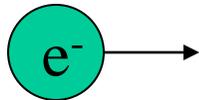
$$\mathbf{K} = q \cdot (\mathbf{u} \times \mathbf{B})$$

So im Speicherring LEP, in dem Elektronen und Positronen bis zu einer Energie von 100 GeV beschleunigt werden.

In LEP, they are accelerated to 100 000 000 000 volts.



Elektron-Positron-Collider LEP



Elektronen sind punktförmig

$$E_{\text{Kollision}} = E_{e^-} + E_{e^+} = 2 E_{\text{Strahl}}$$

In LEP: $E_{\text{Kollision}} \sim 90 \text{ GeV}$

Erzeugung des Z_0

Physiker verwenden hochenergetische Teilchen zur:

1. Untersuchung von Strukturen
2. Erzeugung neuer Teilchen nach der Einsteinschen Beziehung: $E = m \cdot c^2$

HE zur Erzeugung neuer Elementarteilchen



Es gilt die bekannte Einsteinsche Formel $E = m \cdot c^2$

e	Lepton		0,511
μ	Lepton		106
τ	Lepton		1800
π^+	Meson	<u>u</u> <u>d</u>	139
K^+	Meson	<u>u</u> <u>s</u>	494
Ψ^S	Meson	<u>s</u> <u>s</u>	3097
Υ	Meson	<u>b</u> <u>b</u>	9460

P^+	Baryon	uud	938,3
n	Baryon	udd	938,6
Λ^0	Baryon	uds	1116
Ω^*	Baryon	sss	1671
W^{+-}	I-Boson		80400
Z^0	I-Boson		91200
	Higgs		$\sim 250\ 000$

Ruhemasse ausgewählter Elementarteilchen in MeV. Für die Hadronen ist die Quarkzusammensetzung angegeben.

* Aus Symmetriegründen vorausgesagt und 1964 nachgewiesen, dagegen

§ 1974 **November Revolution** (Ting am BNL, Richter am SLAC)

CERN Mitgliedsländer



The Twenty Member States of CERN



Member States (Dates of Accession)

 AUSTRIA (1959)	 DENMARK (1953)	 GREECE (1953)	 NORWAY (1953)	 SPAIN (1/1961-12/1968-1/1983)
 BELGIUM (1953)	 FINLAND (1991)	 HUNGARY (1992)	 POLAND (1991)	 SWEDEN (1953)
 BULGARIA (1999)	 FRANCE (1953)	 ITALY (1953)	 PORTUGAL (1986)	 SWITZERLAND (1953)
 CZECH FR (1993)	 GERMANY (1953)	 NETHERLANDS (1953)	 SLOVAK FR (1993)	 UNITED KINGDOM (1953)

CERN AC/DU/MM - ES368 1999 - ES-6/99

Finanzielle und Personen-Daten des CERN



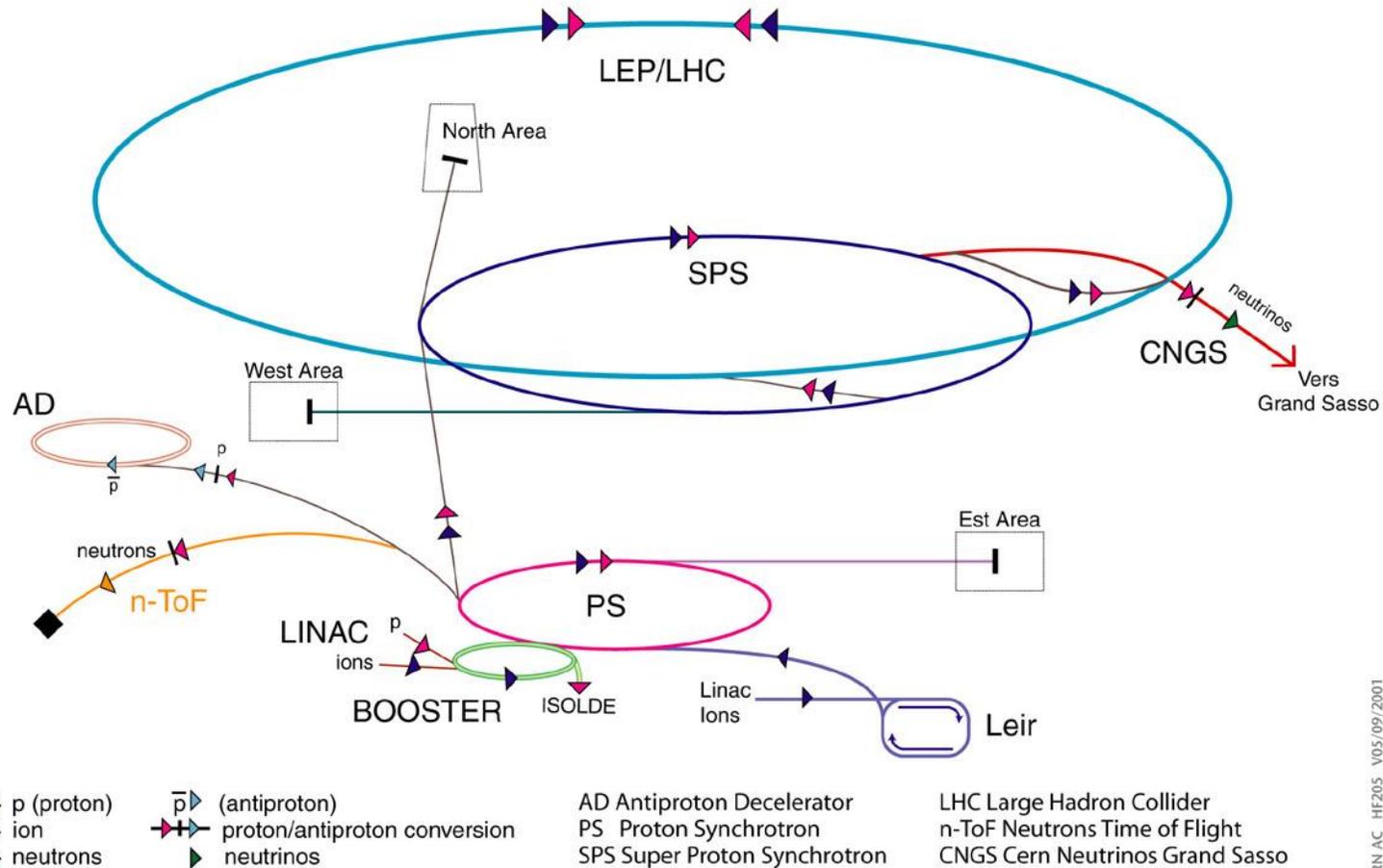
- 2800 festangestellte Mitarbeiter
- 6000 Physiker aus den Mitgliedsländern aber auch aus Russland, USA, China
- Budget 500 M€ pro Jahr

Was wird dafür geboten ?

Die CERN-Beschleuniger

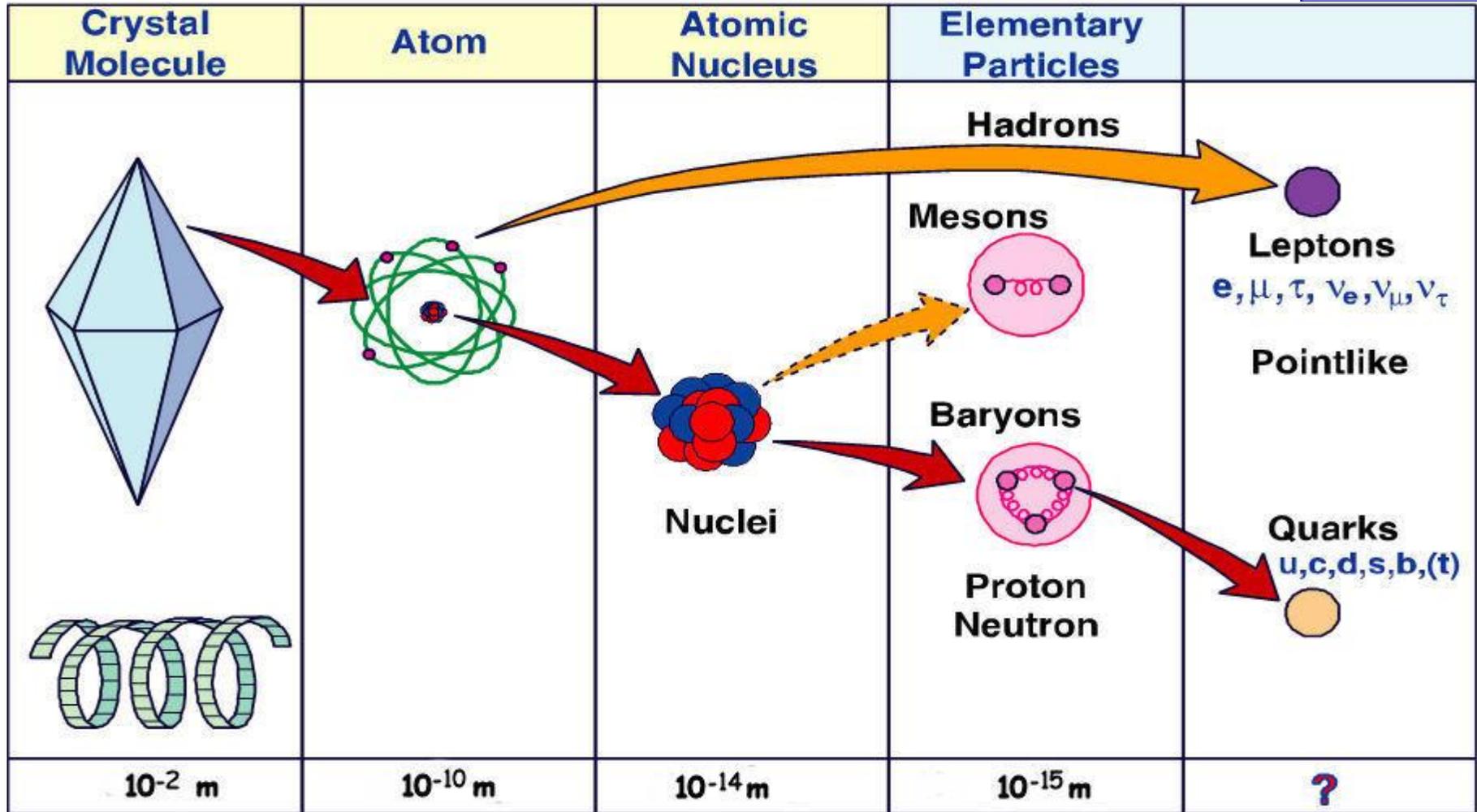


Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



CERN.AC_HF205_V05/09/2001

Von den Atomen zu den Quarks



y1101

Massen- und Kraftteilchen



Leptonen

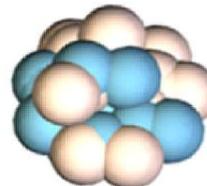
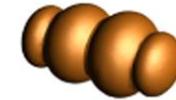
	Ladung	
Tau	-1	Tau Neutrino
Muon	-1	Muon Neutrino
Elektron	-1	Elektron Neutrino

Stark

Gluonen



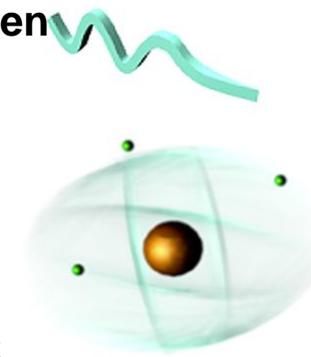
Quarks
Mesonen
Baryonen



Atomkerne

Elektromagnetisch

Photonen



Atome
Licht
Chemie
Elektronik

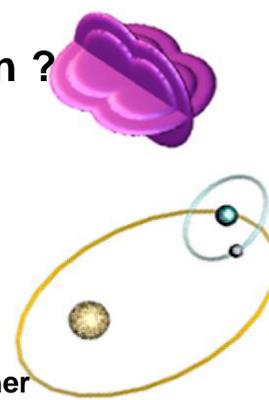
Quarks

	Electric Charge	
Bottom	-1/3	Top
Strange	-1/3	Charm
Down	-1/3	Up

Quarks in : **R**, **B**, **G** 3 Farben

Schwerkraft

Gravitonen ?



Sonnensystem
Galaxien
Schwarze Löcher

Schwach

Bosonen (W,Z)



Neutronzerfall
Betastrahlung
Neutrino Wechselwirkungen
Sonnenszyklus

The particle drawings are simple artistic representations

HE zur Erzeugung neuer Elementarteilchen



Es gilt die bekannte Einsteinsche Formel $E = m \cdot c^2$

e	Lepton		0,511
μ	Lepton		106
τ	Lepton		1800
π^+	Meson	<u>u</u> <u>d</u>	139
K^+	Meson	<u>u</u> <u>s</u>	494
Ψ^s	Meson	<u>s</u> <u>s</u>	3097
Υ	Meson	<u>b</u> <u>b</u>	9460

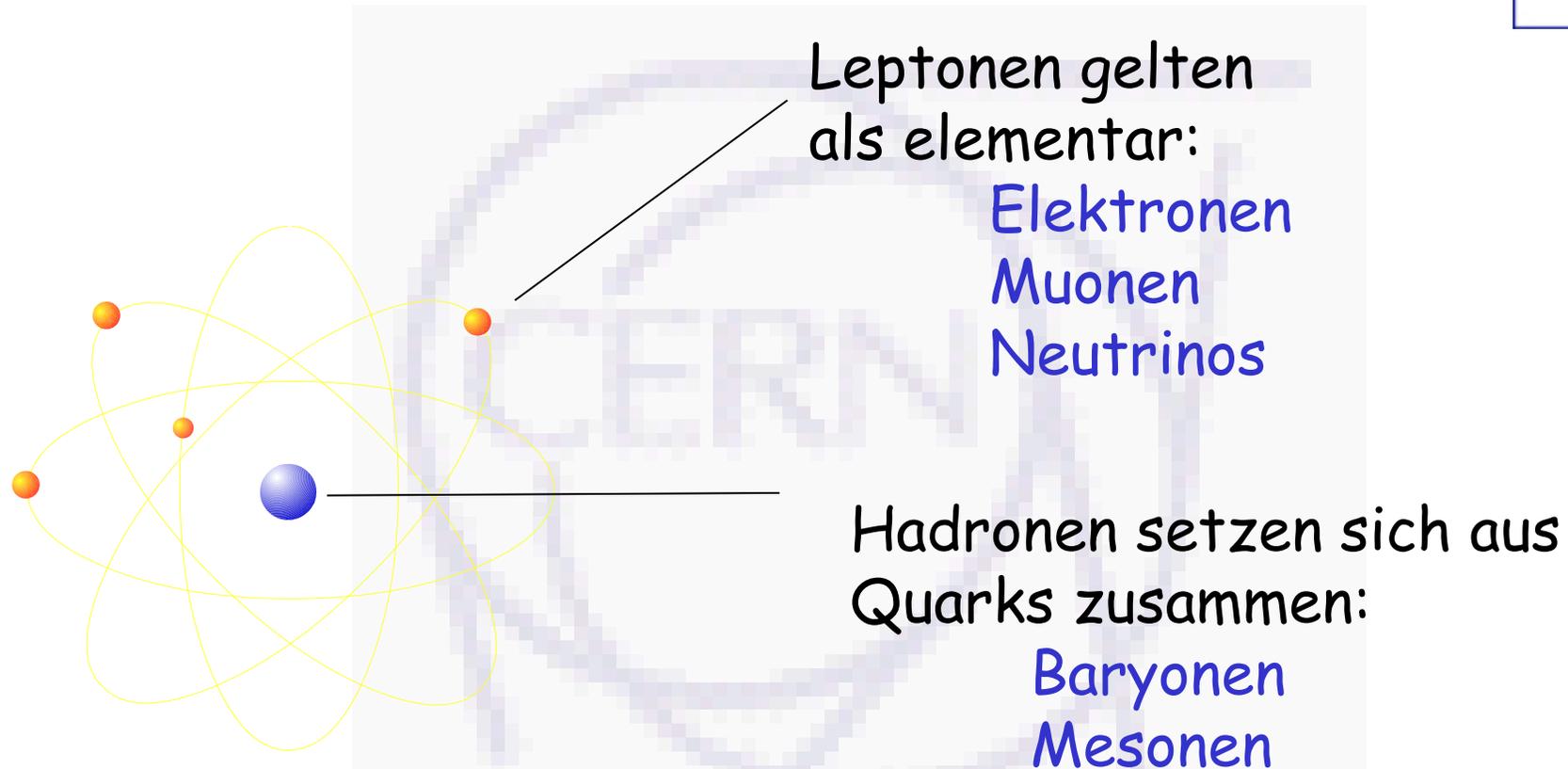
P^+	Baryon	uud	938,3
n	Baryon	udd	938,6
Λ^0	Baryon	uds	1116
Ω^*	Baryon	sss	1671
W^{+-}	I-Boson		80400
Z^0	I-Boson		91200
	Higgs		$\sim 250\ 000$

Ruhemasse ausgewählter Elementarteilchen in MeV. Für die Hadronen ist die Quarkzusammensetzung angegeben.

* Aus Symmetriegründen vorausgesagt und 1964 nachgewiesen, dagegen

§ 1974 **November Revolution** (Ting am BNL, Richter am SLAC)

Von den Atomen zu den Quarks



Leptonen gelten
als elementar:

Elektronen
Muonen
Neutrinos

Hadronen setzen sich aus
Quarks zusammen:

Baryonen
Mesonen

Zum Bau der uns bekannten Materie, d. h. der chemischen Elemente benötigt man nur Protonen, Neutronen und Elektronen.

Massen- und Kraftteilchen



Leptonen

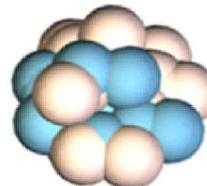
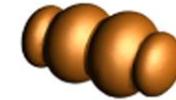
	Ladung	
Tau	-1	Tau Neutrino
Muon	-1	Muon Neutrino
Elektron	-1	Elektron Neutrino

Stark

Glukonen



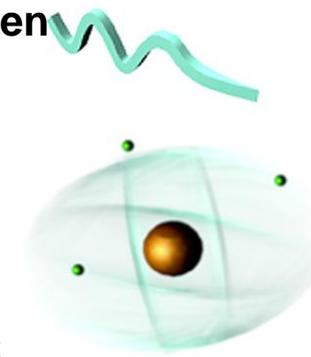
Quarks
Mesonen
Baryonen



Atomkerne

Elektromagnetisch

Photonen



Atome
Licht
Chemie
Elektronik

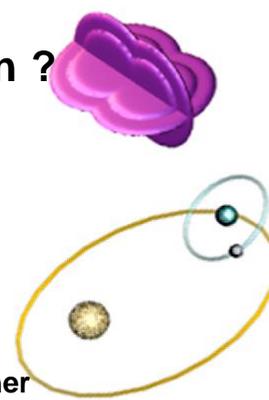
Quarks

	Electric Charge	
Bottom	-1/3	Top
Strange	-1/3	Charm
Down	-1/3	Up

Quarks in : **R**, **B**, **G** 3 Farben

Schwerkraft

Gravitonen ?



Sonnensystem
Galaxien
Schwarze Löcher

Schwach

Bosonen (W,Z)



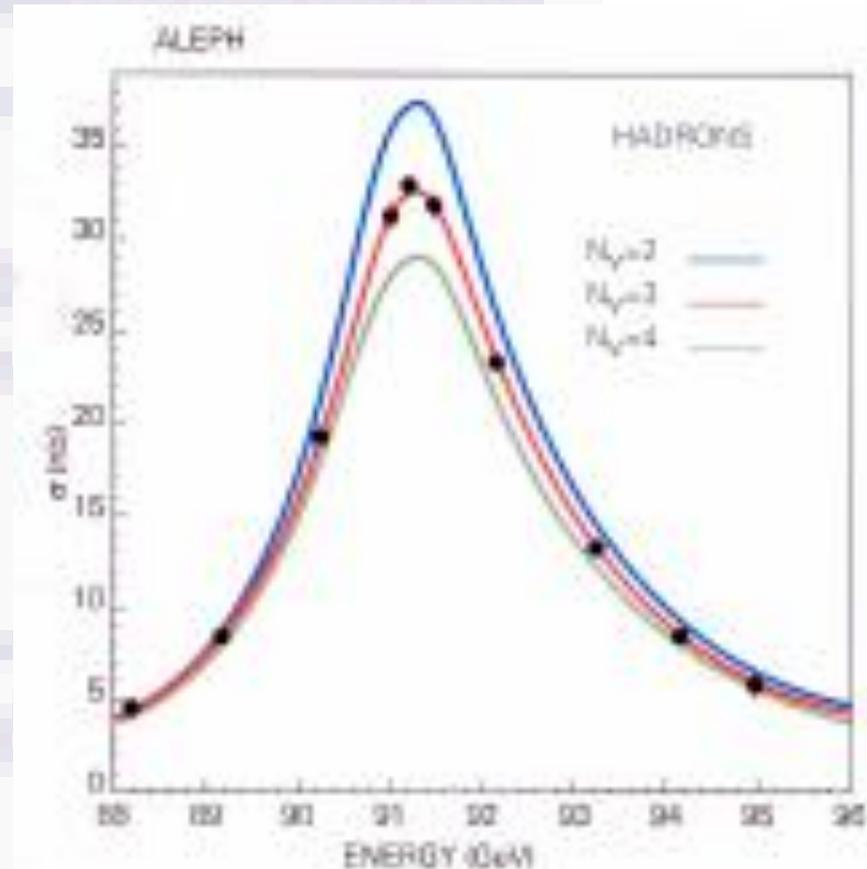
Neutronzerfall
Betastrahlung
Neutrino Wechselwirkungen
Sonnenszyklus

The particle drawings are simple artistic representations

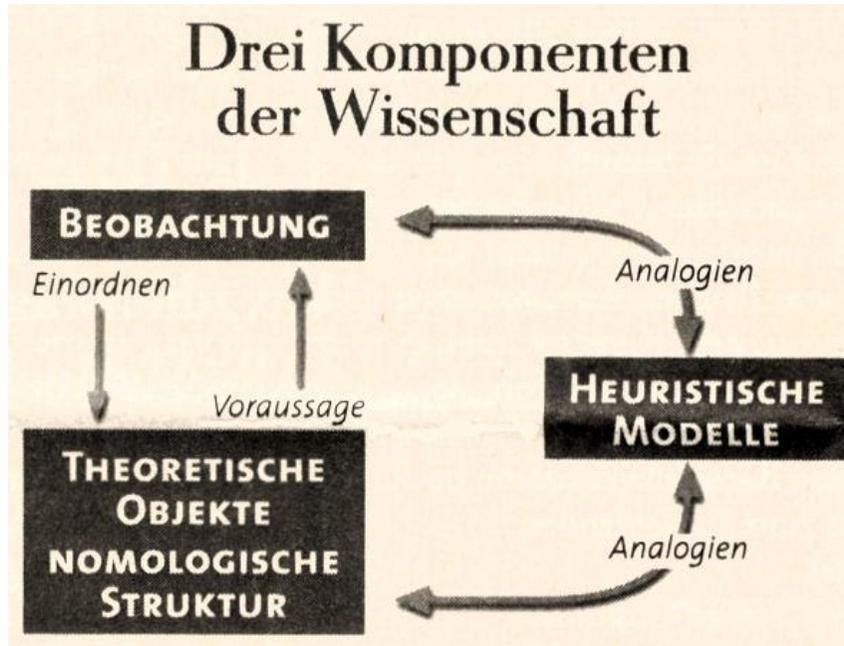
Drei Teilchenfamilien



Aus der Verbreiterung der Z^0 -Resonanz folgt, dass es nur drei Familien von Elementarteilchen gibt



Anschaulichkeit in der Physik



Naturwissenschaft lässt sich mit Bildern popularisieren, aber nur mit Mathematik verstehen

Holm Tetens
DIE ZEIT Nr.37, 1999.

Als der Nobelpreisträger Philipp Lenard auf dem *Kongress der Naturforscher und Ärzte 1920* bei Einstein Anschaulichkeit

in der Relativitätstheorie anmahnte, antwortete Einstein ihm recht aggressiv:

Was der Mensch als anschaulich betrachtet, ist großen Änderungen unterworfen, ist eine Funktion der Zeit. Ein Zeitgenosse Galileis hätte dessen Mechanik auch für sehr unanschaulich erklärt. Diese anschaulichen Vorstellungen haben ihre Tücken, genau wie der viel zitierte gesunde Menschenverstand.

Massen- und Kraftteilchen



Leptonen

	Ladung	
Tau	-1	Tau Neutrino
Muon	-1	Muon Neutrino
Elektron	-1	Elektron Neutrino

Stark

Glukonen

Quarks

Mesonen
Baryonen

Atomkerne

Elektromagnetisch

Photonen

Atome
Licht
Chemie
Elektronik

Quarks

	Electric Charge	
Bottom	-1/3	Top
Strange	-1/3	Charm
Down	-1/3	Up

Quarks in : **R**, **B**, **G** 3 Farben

Schwerkraft

Gravitonen ?

Sonnensystem
Galaxien
Schwarze Löcher

Schwach

Bosonen (W,Z)

Neutronzerfall
Betastrahlung
Neutrino Wechselwirkungen
Sonnenzklus

The particle drawings are simple artistic representations

Kräfte und Wechselwirkungen



Vier fundamentale Kräfte werden durch Teilchen übertragen:

- Die **elektromagnetische Kraft** wirkt über große Entfernungen durch den Austausch virtueller Photonen
- Die **starke Kraft** hält im Atomkern durch Austausch von Gluonen die positiv geladenen Protonen zusammen. Zunahme mit dem Abstand verhindert das Auftreten isolierter Quarks: Jets!
- Die **schwache Wechselwirkung** wirkt nur über eine Entfernung von $< 10^{-18}$ m !! Deshalb haben die intermediären Bosonen wegen der Unschärferelation eine (große) Masse $E \sim (h \cdot c) / \lambda \sim 120$ GeV
- **Gravitation**: Das sehr schwache Feld spielt keine Rolle bei Teilchenreaktionen; Dennoch: Was passiert bei sehr kleinen Abständen? Das gekrümmte Schwerfeld zeigt dann Quanteneigenschaften (Plancklänge 10^{-35} m)

Wie entsteht Masse ?



Annahme: Alle Elementarteilchen sind masselos.

Die masselosen Teilchen bekommen ihre Masse durch die WW mit einem im Vakuum vorhandenen Feld, dem Higgs-Feld - je stärker die WW, umso größer ist die Masse der Teilchen.

Das Higgs-Feld ist ein Quantenfeld. So wie das Photon das Quant des elektromagnetischen Feldes ist, ist das Higgs Boson das Quant des Higgs-Feldes.

Der Nachweis des Higgs Boson würde die Theorie der Masseerzeugung durch das Higgs-Feld bestätigen.

HE zur Erzeugung neuer Elementarteilchen



Es gilt die bekannte Einsteinsche Formel $E = m \cdot c^2$

e	Lepton		0,511
μ	Lepton		106
τ	Lepton		1800
π^+	Meson	<u>u</u> <u>d</u>	139
K^+	Meson	<u>u</u> <u>s</u>	494
Ψ^s	Meson	<u>s</u> <u>s</u>	3097
Υ	Meson	<u>b</u> <u>b</u>	9460

P^+	Baryon	uud	938,3
n	Baryon	udd	938,6
Λ^0	Baryon	uds	1116
Ω^*	Baryon	sss	1671
W^{+-}	I-Boson		80400
Z^0	I-Boson		91200
	Higgs		$\sim 250\ 000$

Ruhemasse ausgewählter Elementarteilchen in MeV. Für die Hadronen ist die Quarkzusammensetzung angegeben.

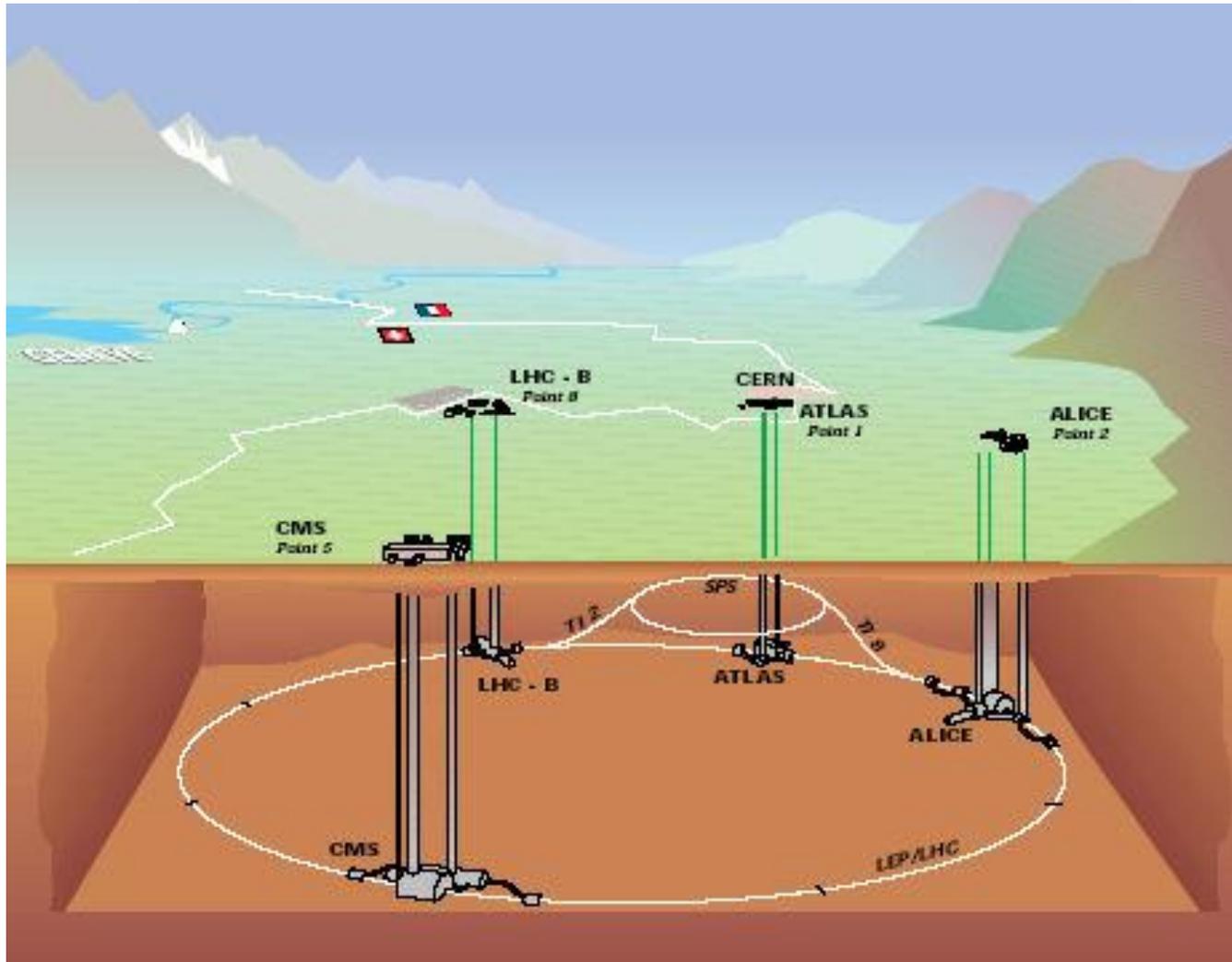
* Aus Symmetriegründen vorausgesagt und 1964 nachgewiesen, dagegen

§ 1974 **November Revolution** (Ting am BNL, Richter am SLAC)

Luftbild von CERN



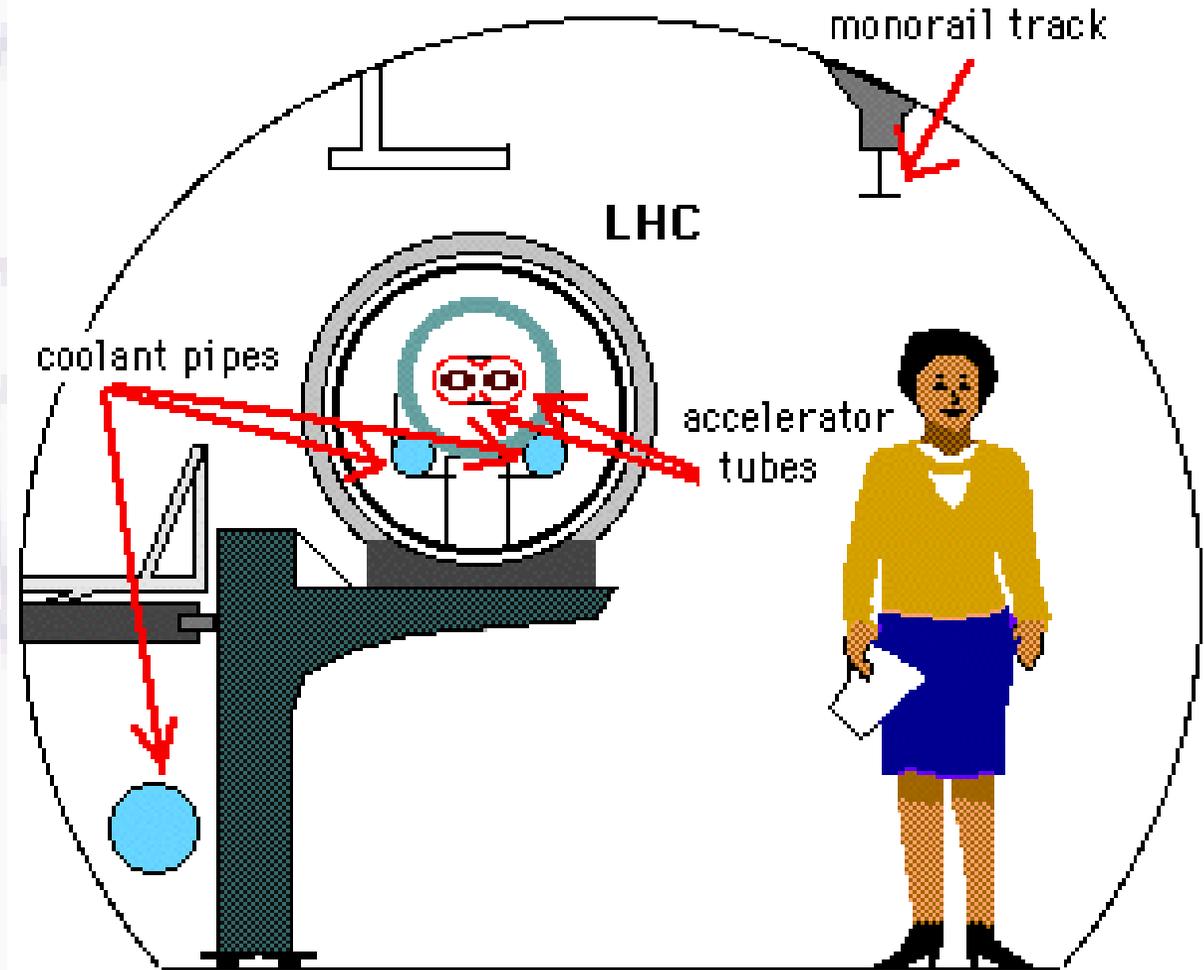
Die Detektoren am LHC



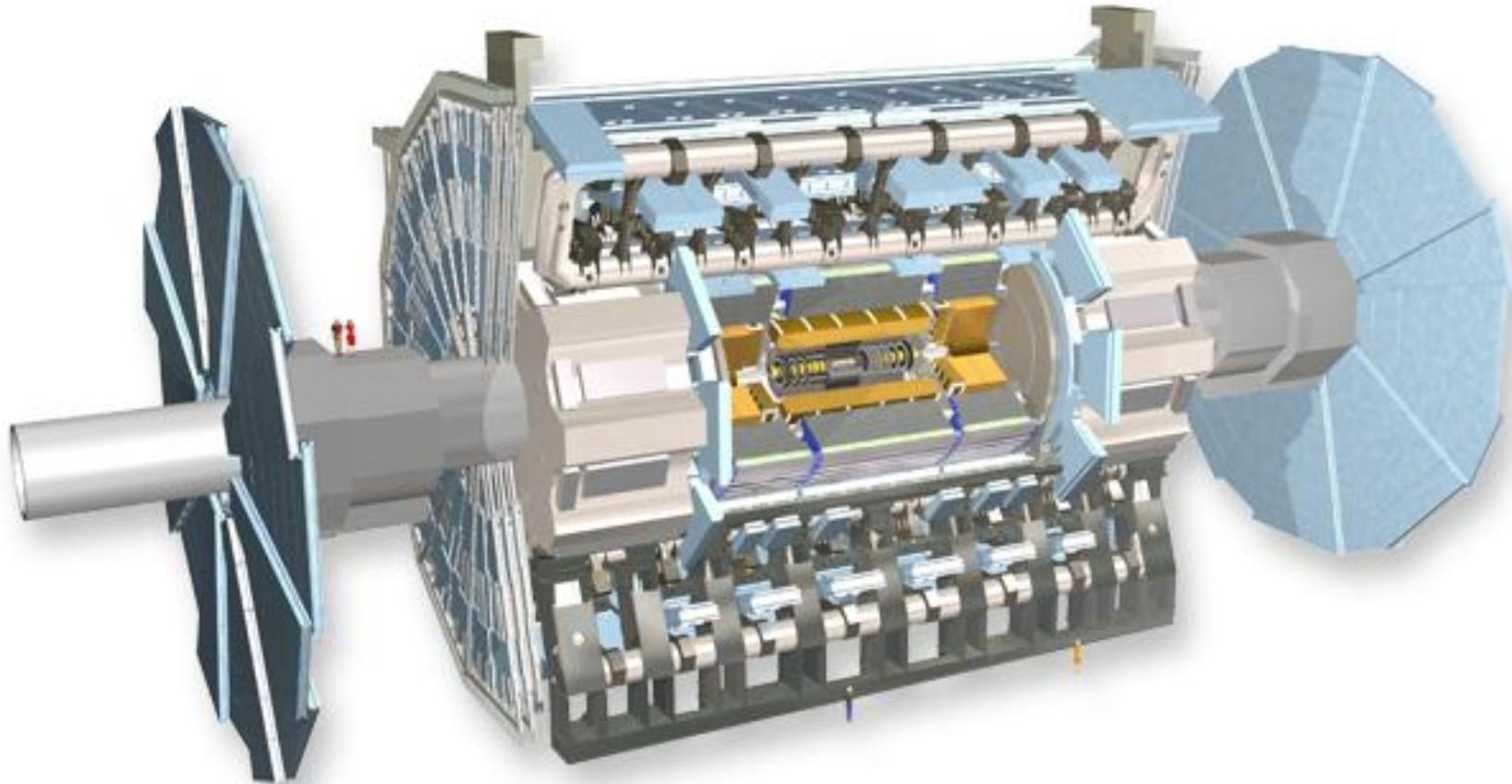
LHC im LEP-Tunnel



Die supraleitenden Ablenkmagnete des LHC sind mit flüssigem Helium (1,9 K) gekühlt. Das Führungsfeld hat eine Stärke von 8T. Die Energie der kollidierenden Protonenstrahlen erreicht damit $2 \times 7 \text{ TeV}$.



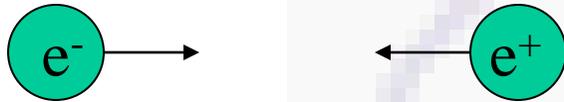
Der ATLAS-Detektor



Unterschied: Elektronen- und Protonen-Collider



Elektron-Positron Collider (LEP)



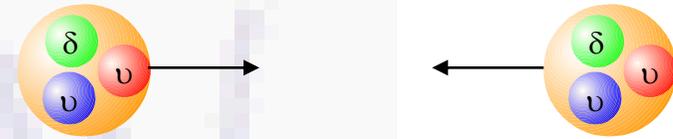
Elektronen sind punktförmig

$$E_{\text{Kollision}} = E_{e^-} + E_{e^+} = 2 E_{\text{Strahl}}$$

z.B. in LEP, $E_{\text{Kollision}} \sim 90 \text{ GeV}$

Die Strahlenergie kann auf das zu suchende Teilchen abgestimmt werden

Proton-Proton Collider (LHC)



$$E_{\text{Proton1}} = E_{d1} + E_{u1} + E_{u2} + E_{\text{Gluonen1}}$$

$$E_{\text{Proton2}} = E_{d2} + E_{u3} + E_{u4} + E_{\text{Gluonen2}}$$

Kollisionen zwischen Gluonen (weich)
und Quarks (hart)

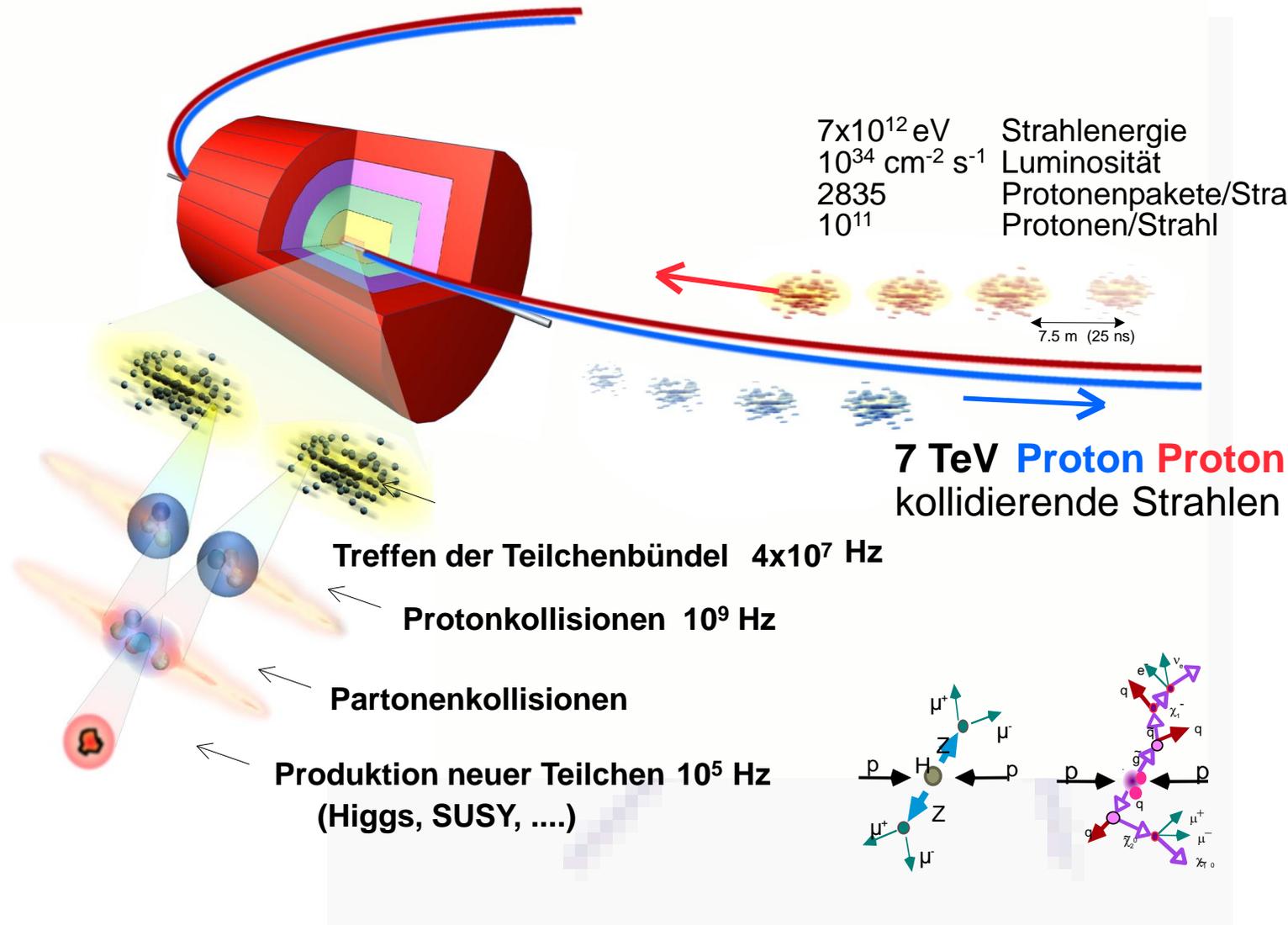
$$0 < E_{\text{Kollision}} < (E_{\text{Proton1}} + E_{\text{Proton2}})$$

Man muss unter vielen Ereignissen nach neuen Teilchen suchen

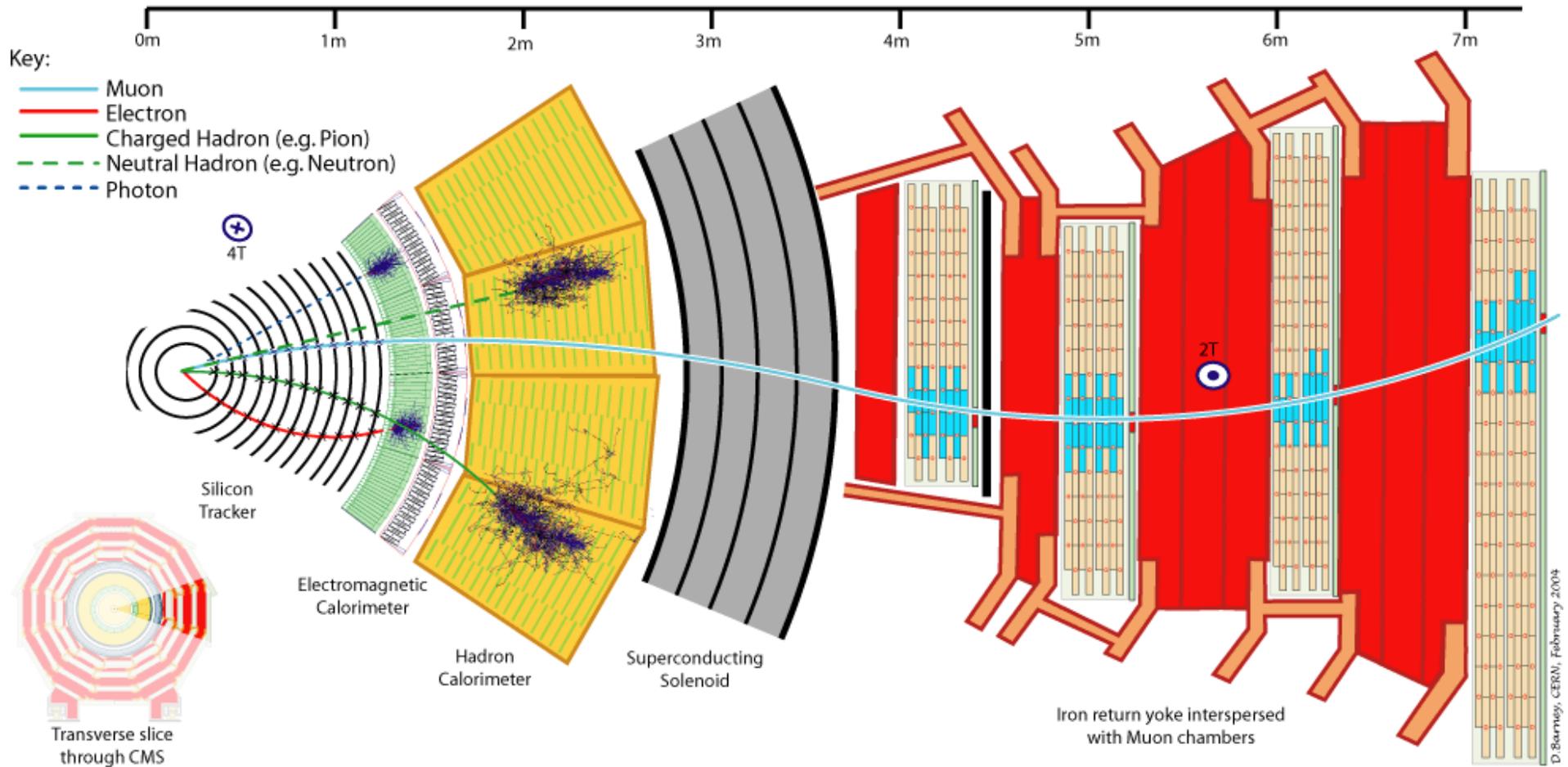
Kollisionen im Large Hadron Collider



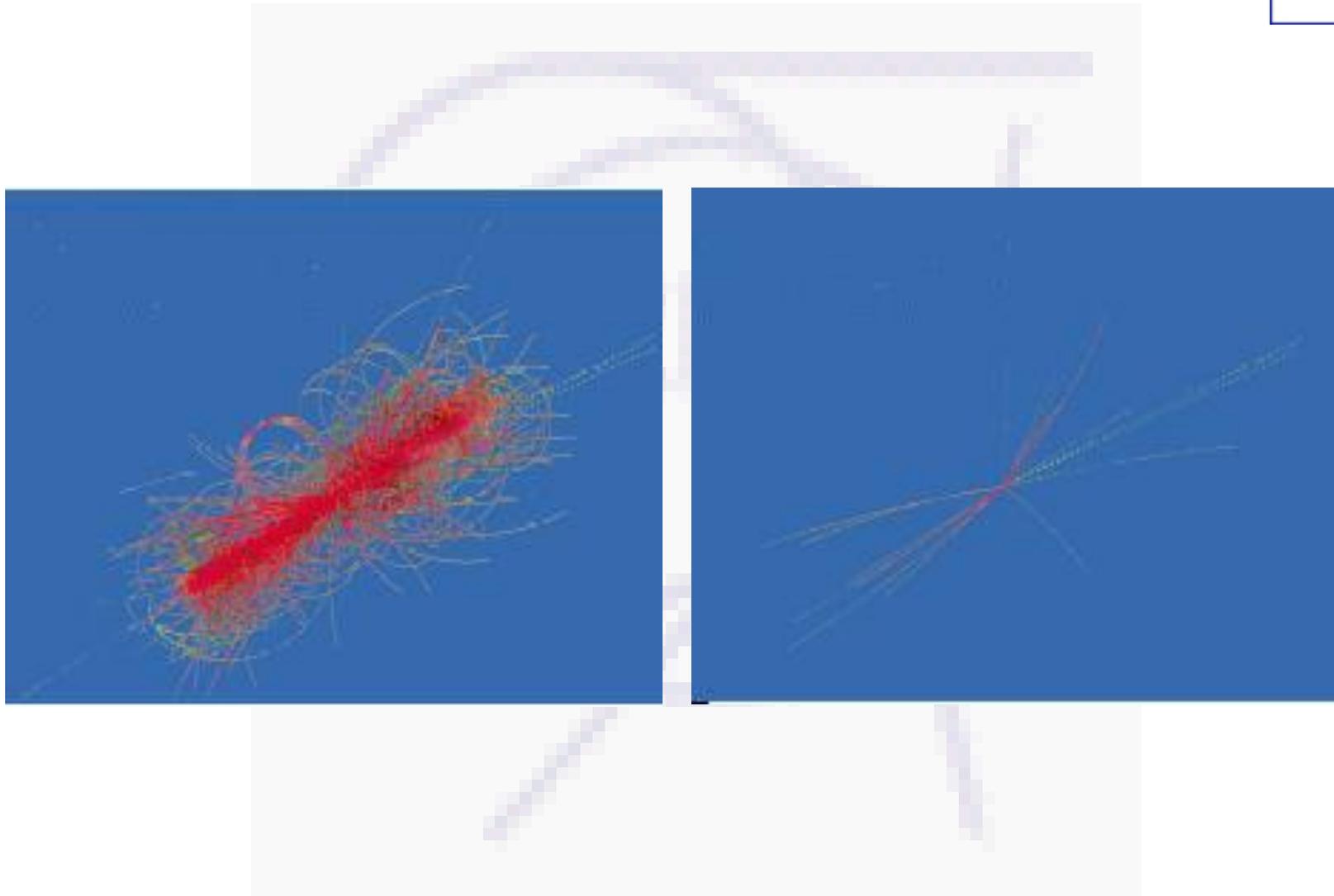
7×10^{12} eV Strahlenergie
 10^{34} cm⁻² s⁻¹ Luminosität
 2835 Protonenpakete/Strahl
 10^{11} Protonen/Strahl



Schnitt durch den CMS-Detektor



Computersimulation eines Ereignisses am LHC



Das Standardmodell



Leptonen

Ladung

Tau		-1	0		Tau Neutrino
Muon		-1	0		Muon Neutrino
Elektron		-1	0		Elektron Neutrino

Stark

Glukonen

Quarks

Mesonen Baryonen

Atomkerne

Elektromagnetisch

Photonen

Atome

Licht

Chemie

Elektronik

Quarks

Electric Charge

Bottom		-1/3	2/3		Top
Strange		-1/3	2/3		Charm
Down		-1/3	2/3		Up

Quarks in : **R**, **B**, **G** 3 Farben

Schwerkraft

Gravitonen ?

Sonnensystem

Galaxien

Schwarze Löcher

Schwach

Bosonen (W,Z)

Neutronzerfall

Betastrahlung

Neutrino Wechselwirkungen

Sonnenzyklus

The particle drawings are simple artistic representations

Offene Fragen an das Standardmodell



Woher bekommen die Elementarteilchen ihre Masse? Higgs-Boson?

Sind Protonen stabile Teilchen?

Warum gibt es nur drei Generationen von Quarks und Leptonen?

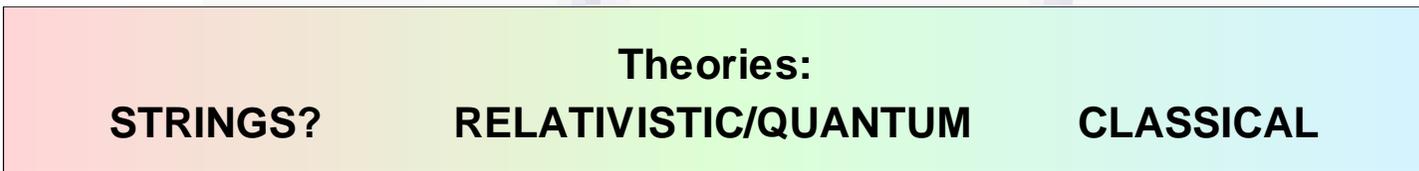
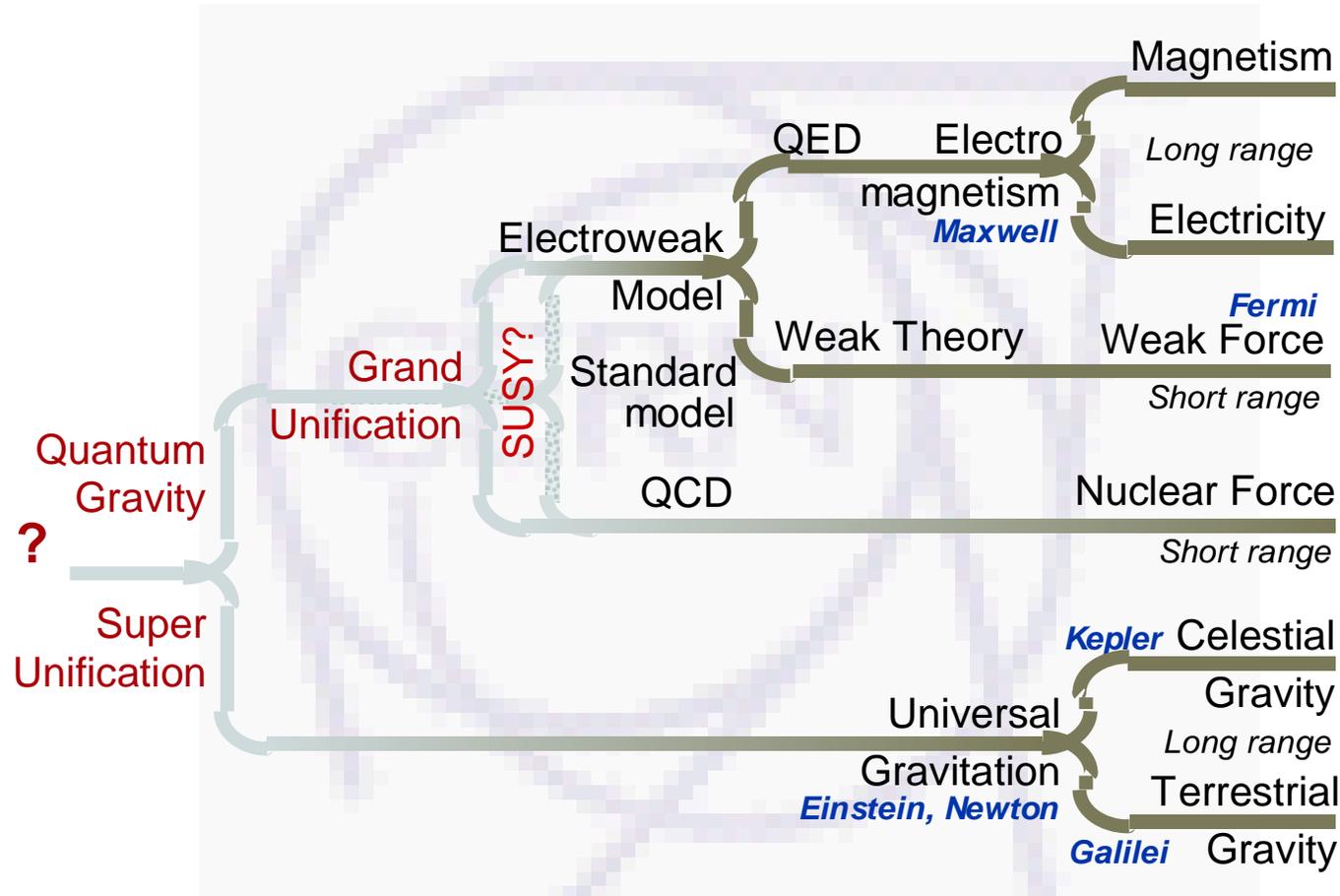
Sind Elementarteilchen fundamental oder besitzen sie eine noch feinere Struktur?

Haben Neutrinos eine Masse, und wenn ja, warum sind sie so leicht?

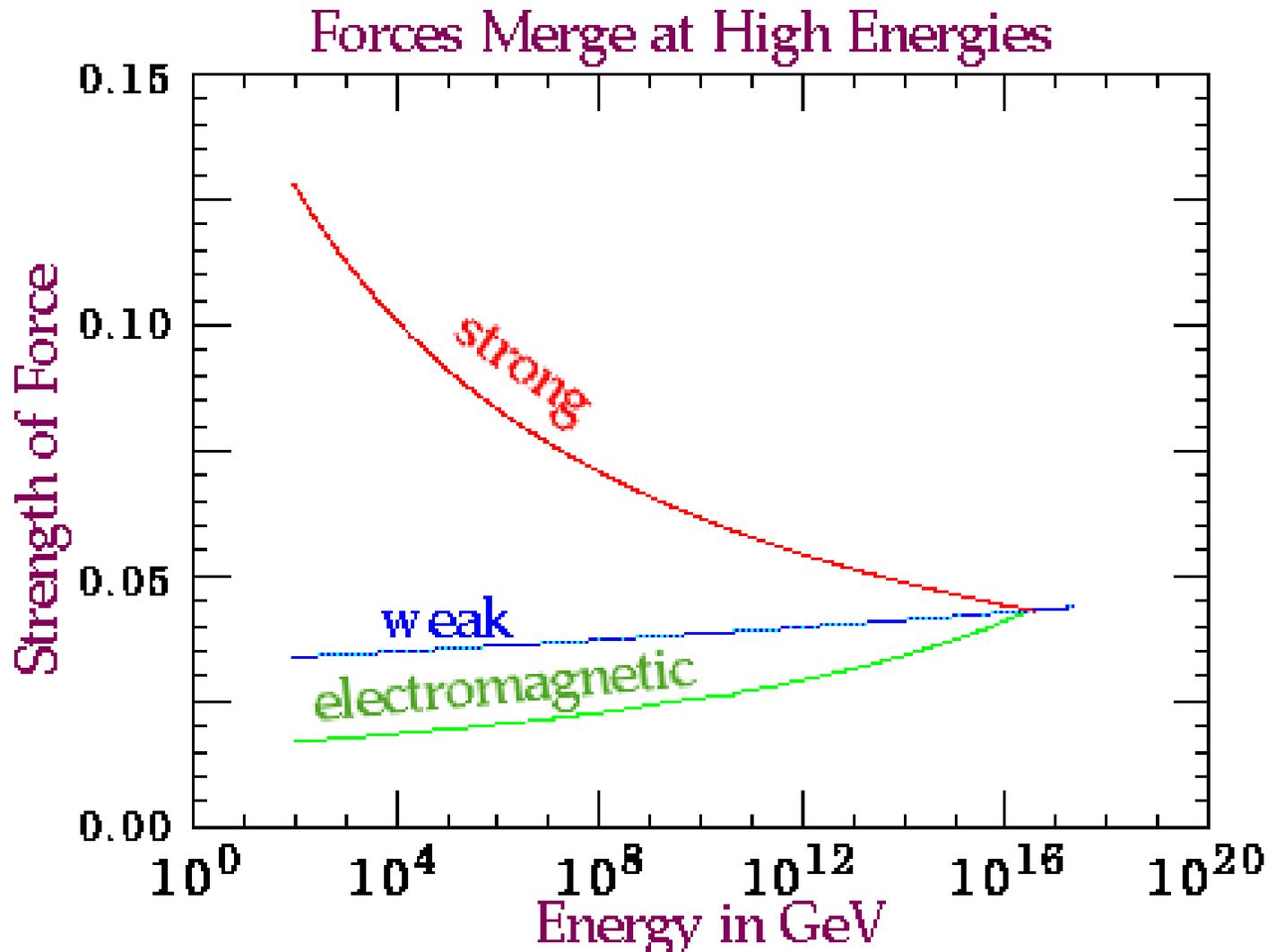
Lässt sich die Schwerkraft zusammen mit den anderen Wechselwirkungen in eine TOE (Theory of Everything) einbauen?

Warum gibt es wesentlich mehr Materie als Antimaterie im Weltall?

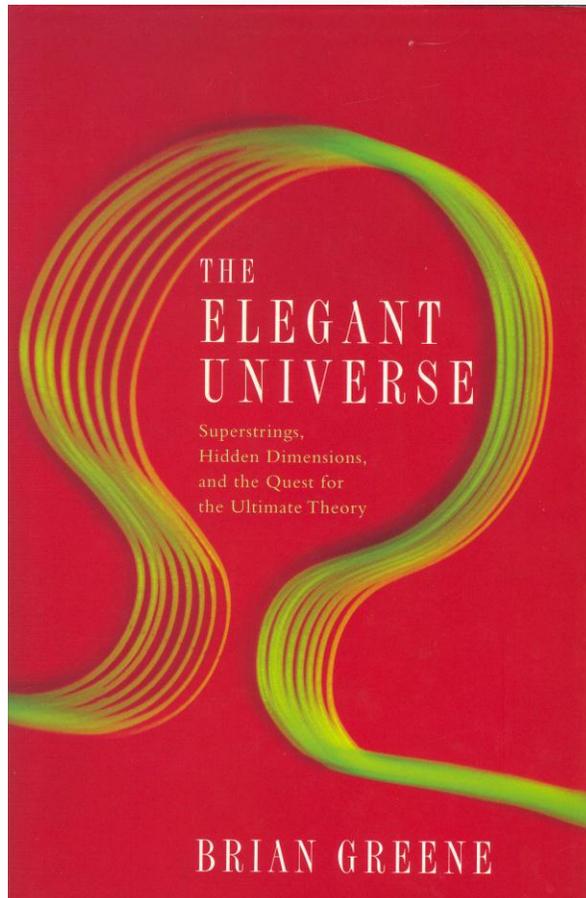
Vereinigung der vier fundamentalen Kräfte ?



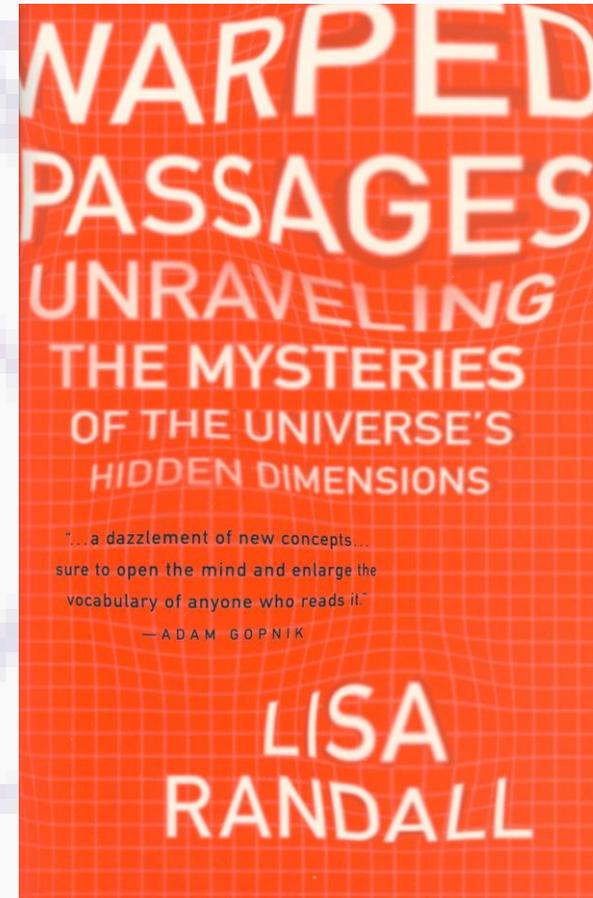
Die fundamentalen Kräfte als Funktion der Energie



Literatur zur Physik

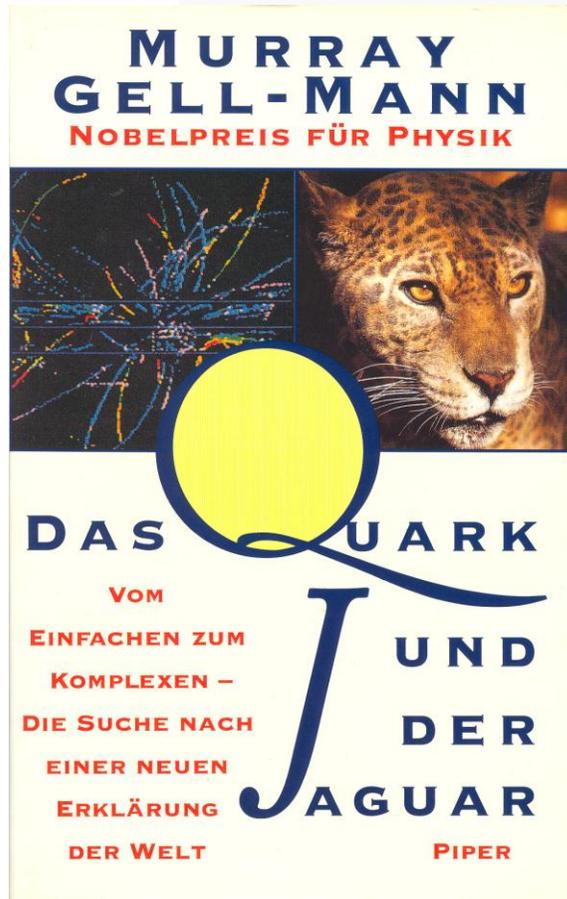


London 1999

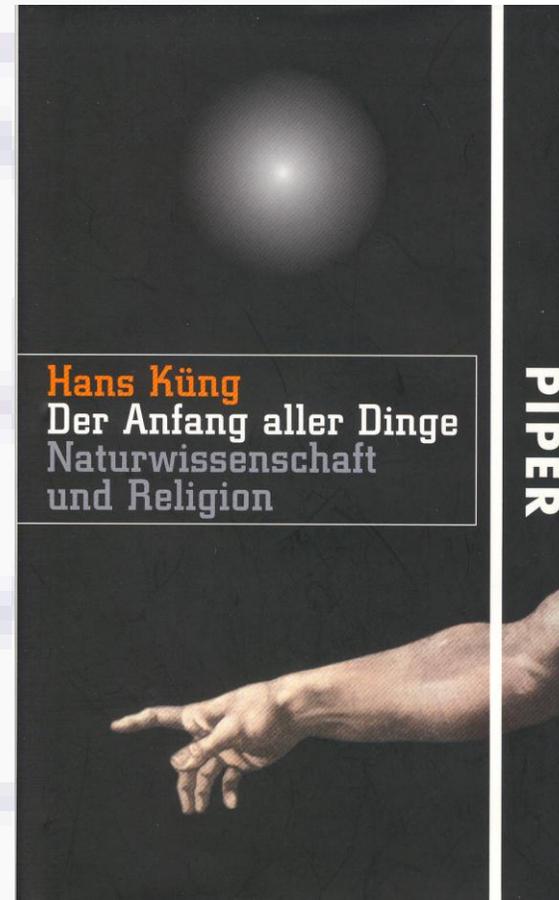


New York 2005

Literatur zum Weltbild

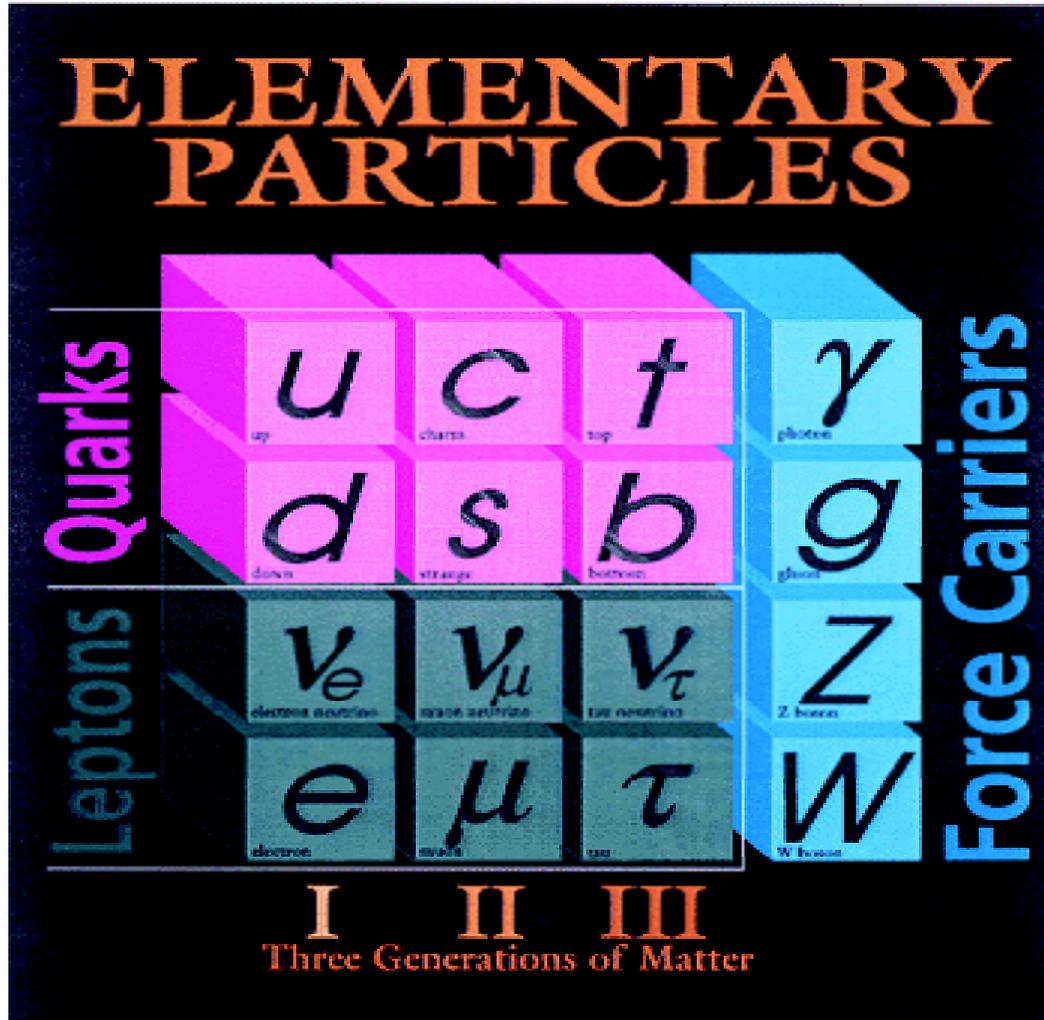


München 1994



München 2005

Fragen an das Standardmodell



$$m_e \sim 0.5 \text{ MeV}$$

$$m_\nu \sim 0$$

$$m_t \sim 175,000 \text{ MeV!}$$

$$m_\gamma = 0$$

$$m_Z \sim 90,000 \text{ MeV}$$

Warum ?

Schwerkraft?

Der Urknall 1



10^{-43} seconds



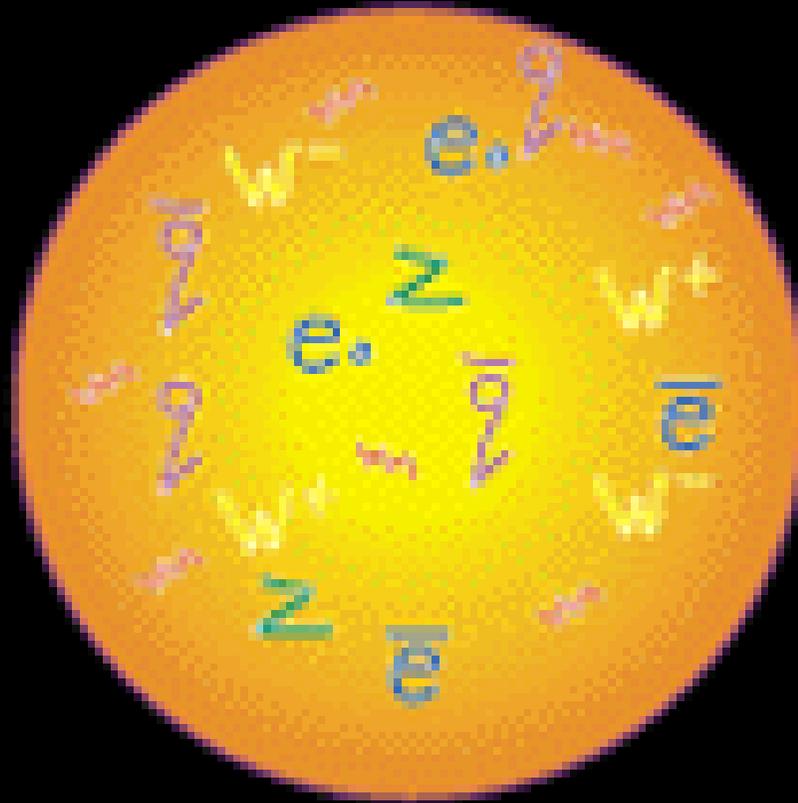
10^{32} degrees

?

Der Urknall 2



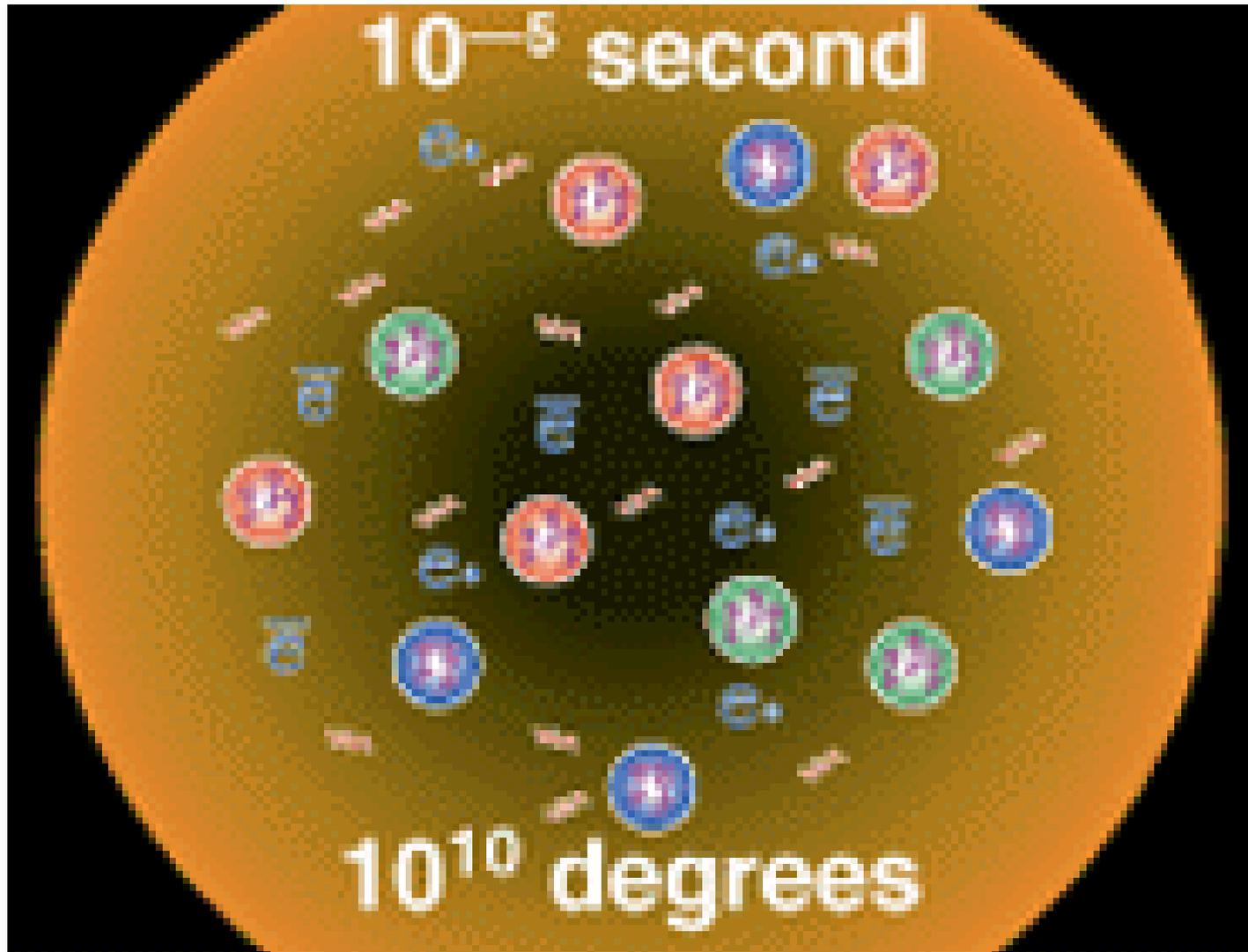
10^{-34} seconds



10^{27} degrees

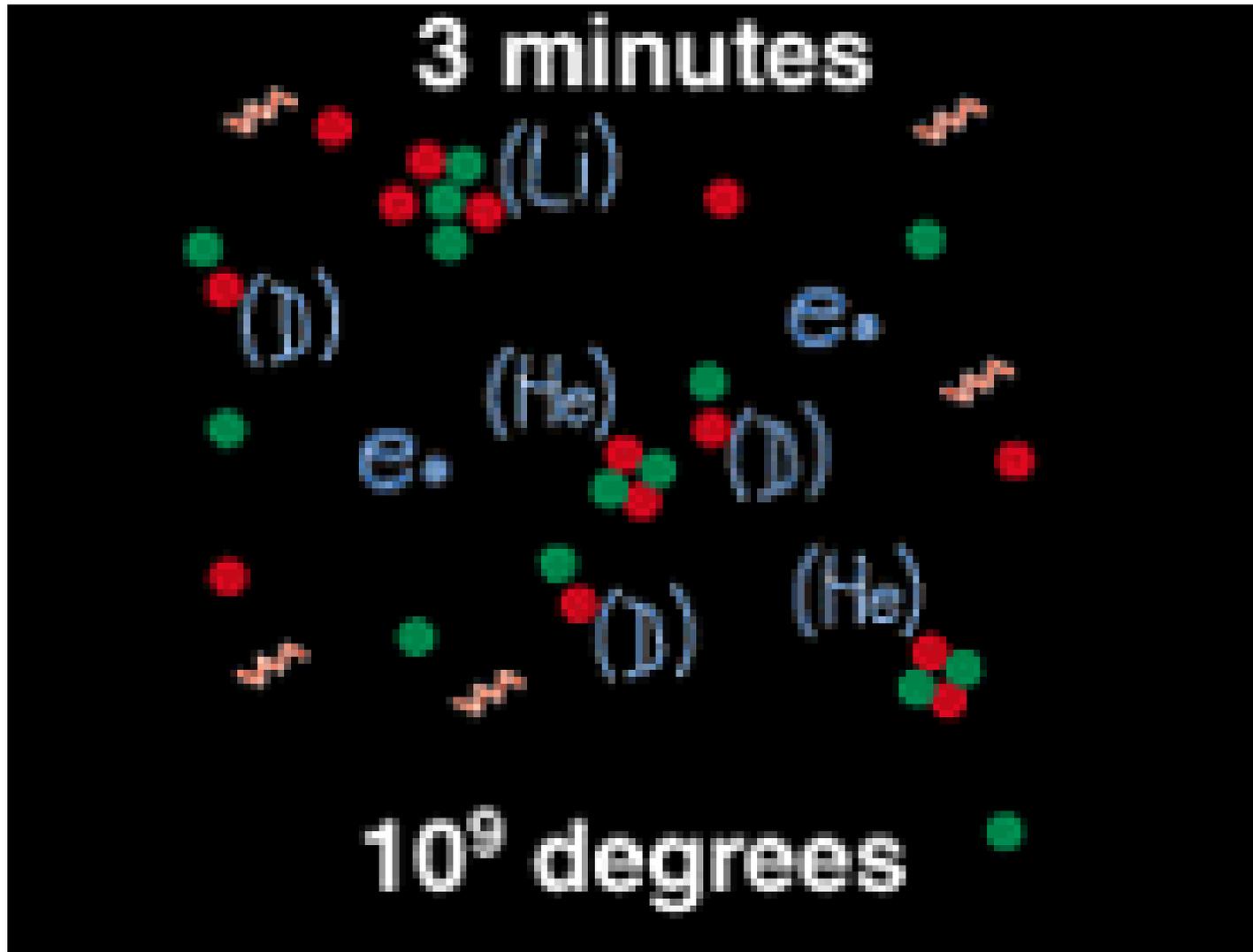
Quarks
und
Bosonen

Der Urknall 3



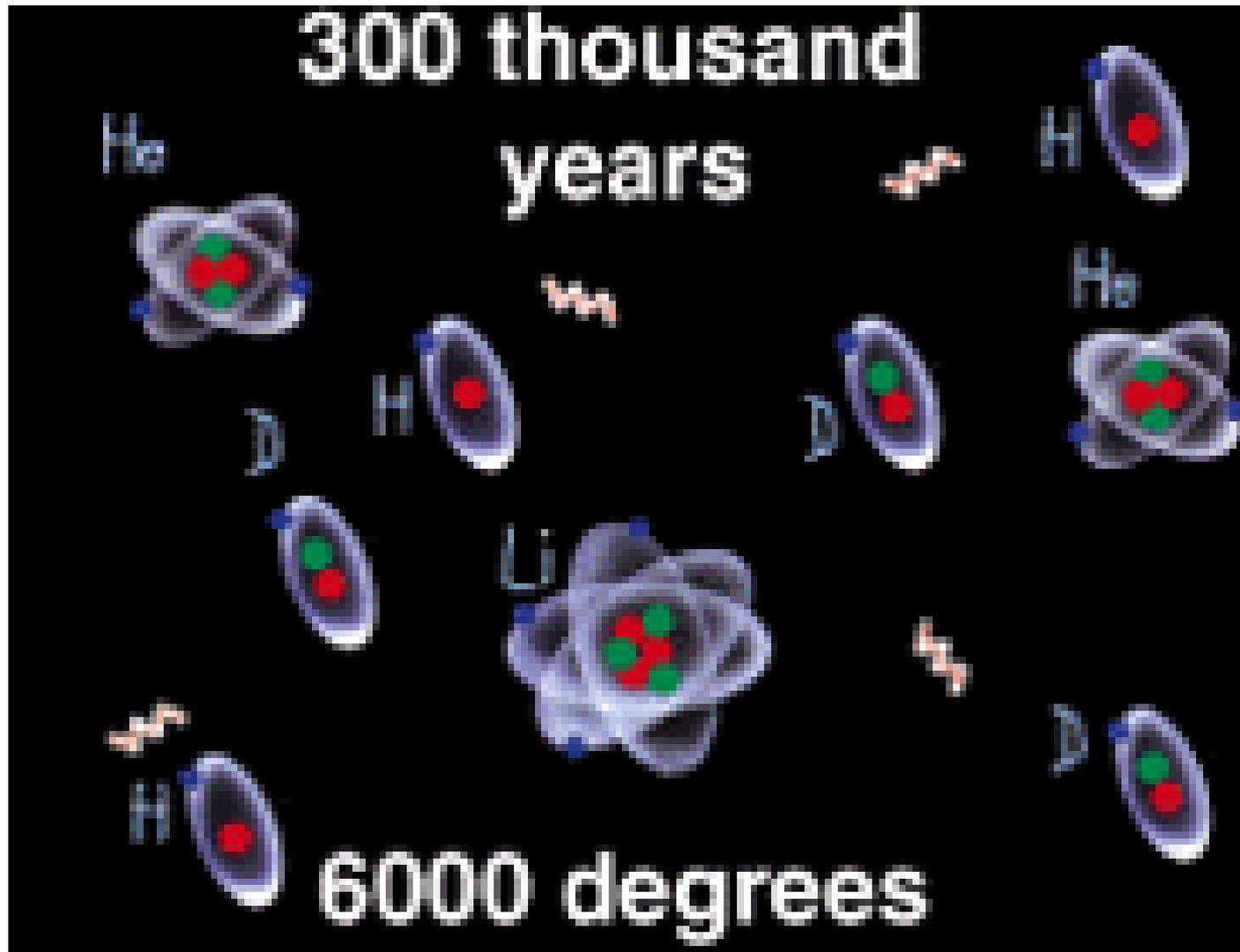
Mesonen,
Baryonen,
Leptonen

Der Urknall 4



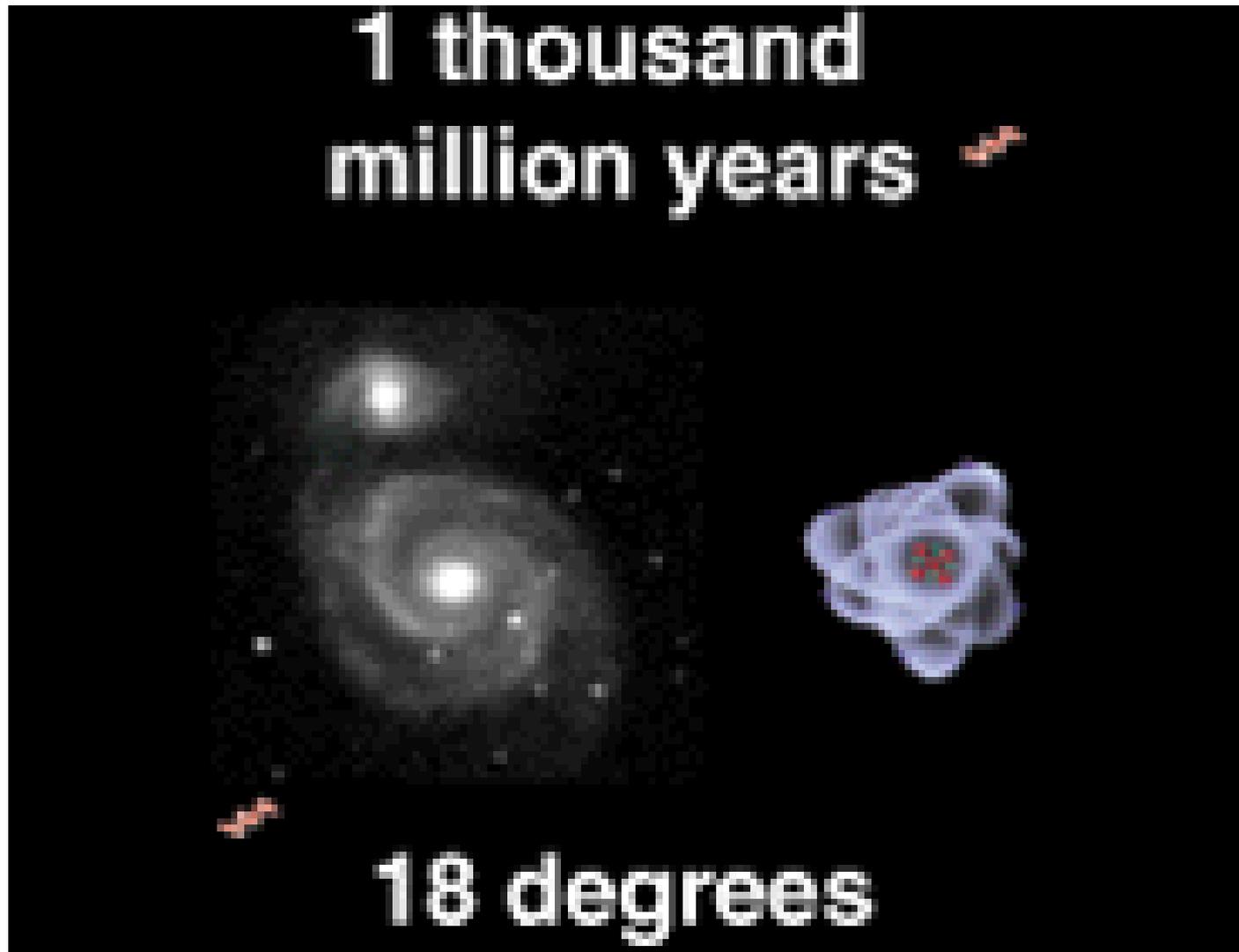
Leichte
Atomkerne

Der Urknall 5



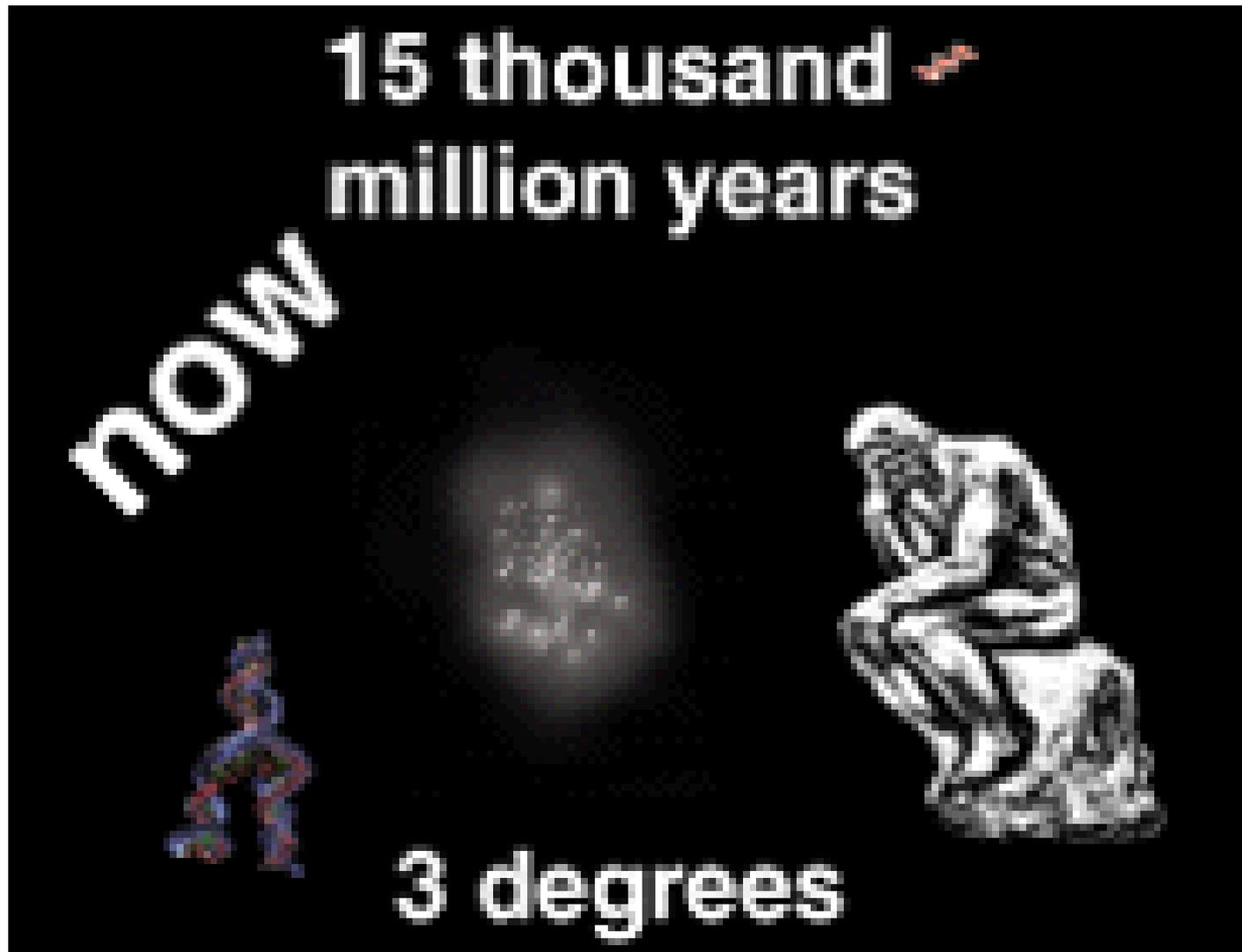
Leichte
Atome

Der Urknall 6



Galaxien

Der Urknall 7



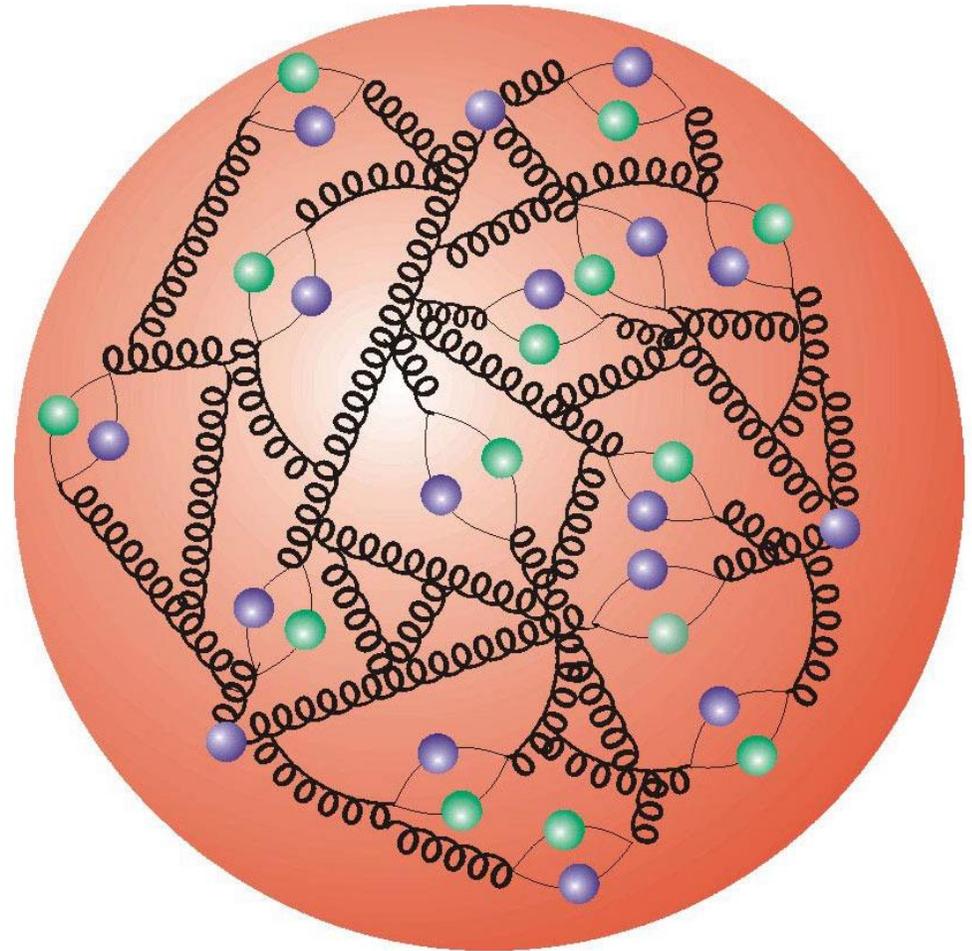
DNS

The structure of the Proton



Proton is not, in fact, simply made from three quarks (uud)

There are actually 3 "valence" quarks (uud) + a "sea" of gluons and short-lived quark-antiquark pairs



Characteristics of the 4 forces



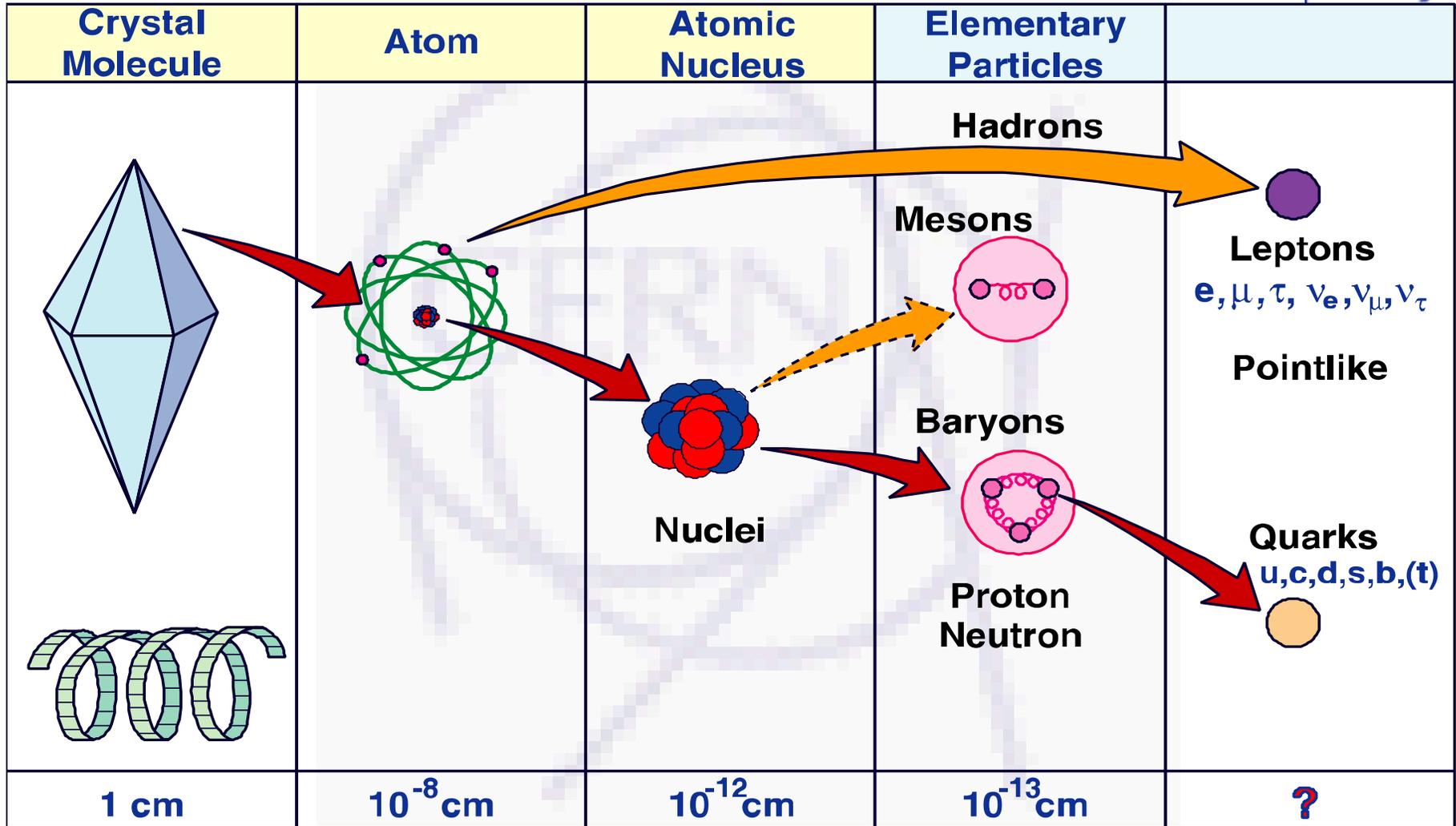
What characterizes a force ? Strength, range and source charge of the field.

Interaction	Exchanged quantum (source ch)	Range (m)	Relative Strength	Examples in nature
Strong	gluon <i>colour</i>	10^{-15}	1	proton (quarks)
Electromagnetic	photon <i>electric</i>		$<10^{-2}$	atoms
Weak	W, Z <i>hypercharge</i>	$<10^{-17}$	10^{-5}	radioactivity
Gravity	graviton ? <i>mass</i>		10^{-38}	solar system

Ratio of electrical to gravitational force between two protons is $\sim 10^{38}$!!

Can such different forces have the same origin ??

From atoms to quarks I



Unanswered questions in Particle Physics



- a. Can gravity be included in a theory with the other three interactions ?
- b. What is the origin of mass? → LHC**
- c. How many space-time dimensions do we live in ?
- d. Are the particles fundamental or do they possess structure ?
- e. Why is the charge on the electron equal and opposite to that on the proton?
- f. Why are there three generations of quark and lepton ?
- g. Why is there overwhelmingly more matter than anti-matter in the Universe ?
- h. Are protons unstable ?
- i. What is the nature of the dark matter that pervades our galaxy ?
- j. Are there new states of matter at exceedingly high density and temperature?
- k. Do the neutrinos have mass, and if so why are they so light ?

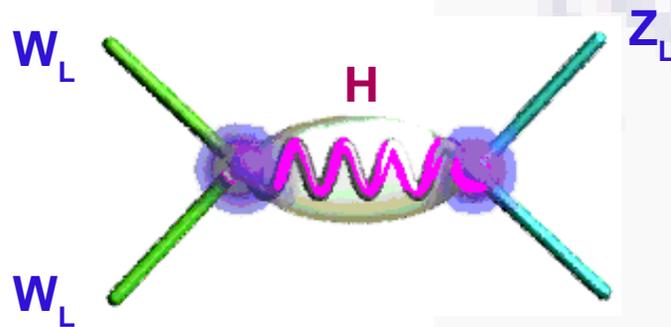
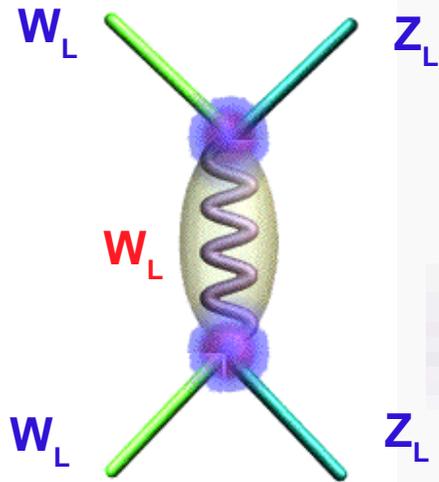
Mathematical consistency of the SM



At energies > 1 TeV the probability of scattering of one W boson off of another becomes greater than **1**



SM gives nonsense !



A popular solution is to introduce a Higgs exchange to cancel bad high energy behaviour

What is wrong with the SM?



- SM contains too many apparently arbitrary features
- SM has an unproven element - not some minor detail but a central element - namely mechanism to generate observed masses of the known particles
a popular solution is to invoke the Higgs mechanism
- SM gives nonsense at high energies.
At centre of mass energies > 1000 GeV the probability of $W_L W_L$ scattering becomes greater than 1!
a popular solution is to introduce a Higgs exchange to cancel the bad high energy behaviour
- SM is logically incomplete - does not incorporate gravity - build TOE
is superstring theory the TOE ?

Origin of mass and the Higgs mechanism



Simplest theory - all particles are massless !!

A field pervades the universe

Particles interacting with this field acquire mass -
stronger the interaction larger the mass

The field is a quantum field - the quantum is the Higgs
boson

Finding the Higgs establishes the presence of the field

Particle Detectors I



- Cannot directly “see” the collisions/decays
 - Interaction rate is too high
 - Lifetimes of particles of interest are too small
 - Even moving at the speed of light, some particles (e.g. Higgs) may only travel a few mm (or less)
- Must infer what happened by observing long-lived particles
 - Need to identify the visible long-lived particles
 - Measure their momenta
 - Energy
 - (speed)
 - Infer the presence of neutrinos and other invisible particles
 - Conservation laws - measure missing energy

Energy Measurement - Calorimeters



- Idea is to “stop” the particles and measure energy deposit
- Particles stop via energy loss processes that produce a “shower” of many charged and neutral particles - pair-production, bremsstrahlung etc.
- Detector can be to measure either hadrons or electrons/photons
- Two main types of calorimeter:
 - **Homogeneous**: shower medium is also used to produce the “signal” that is measured - e.g. CMS electromagnetic calorimeter
 - **Sampling**: the shower develops in one medium, whilst another is used to produce a signal proportional to the incident particle energy - e.g. CMS Hadron Calorimeter