



# Von den kleinsten Teilchen bis zum Kosmos

**Claudia-Elisabeth Wulz**

Institut für Hochenergiephysik der ÖAW  
c/o CERN, Genf

**Forschertage Perchtoldsdorf**  
Wien, 8. Okt. 2009, 19:00

The background is a deep space scene filled with various galaxies, including several prominent spiral galaxies with bright yellow and white cores and blueish-purple dust lanes. The stars are scattered across the dark void. In the lower foreground, a magnifying glass is positioned over a molecular model. The model consists of several red spheres (likely representing hydrogen or oxygen atoms) and purple spheres (likely representing carbon atoms) connected by green lines representing chemical bonds. The magnifying glass has a silver frame and a black handle.

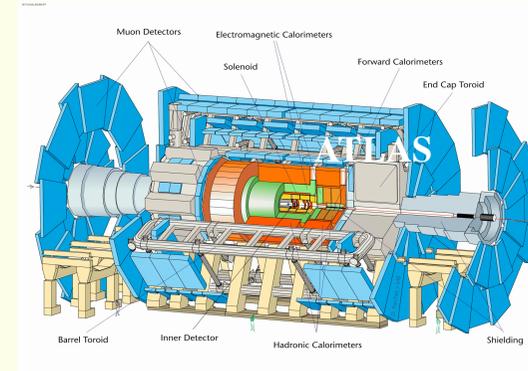
**Wie und wann ist das Universum entstanden?  
Wie wird es sich weiterentwickeln?**

**Woraus besteht es?  
Welche Kräfte wirken zwischen seinen Bestandteilen?**

# Werkzeuge zur Beantwortung der Fragen

## Experimente an Beschleunigern

- z.B. Fermilab (USA): Tevatron
- Brookhaven (USA): RHIC
- DESY (Deutschland): HERA (geschlossen)
- CERN (Schweiz): Large Hadron Collider (LHC)
- ?: International Linear Collider



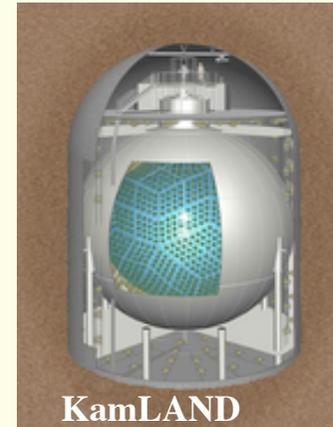
## Experimente in Untergrundlaboratorien

### Experimente an Kernreaktoren

### Raumsonden



FERMI/GLAST



KamLAND



Gran Sasso



SDSS

## Terrestrische Teleskope

# Die fundamentalen Kräfte

KRAFT	REICHWEITE	VERMITTLER
<b>Stark</b>	$10^{-15}$ m	Gluonen
Schwach	$10^{-18}$ m	W, Z 
<b>Elektromagnetisch</b>		Photon 
<b>Gravitationell</b>		Graviton (?)

# Theory of Everything ?

Vereinigung von Elektrizität und Magnetismus -> **elektromagnetische Wechselwirkung**: J. C. Maxwell et al.

Vereinigung von elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung (**elektroschwache Wechselwirkung**):

Theorie: S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg

Experiment: C. Rubbia et al. (CERN-Experimente UA1, UA2)

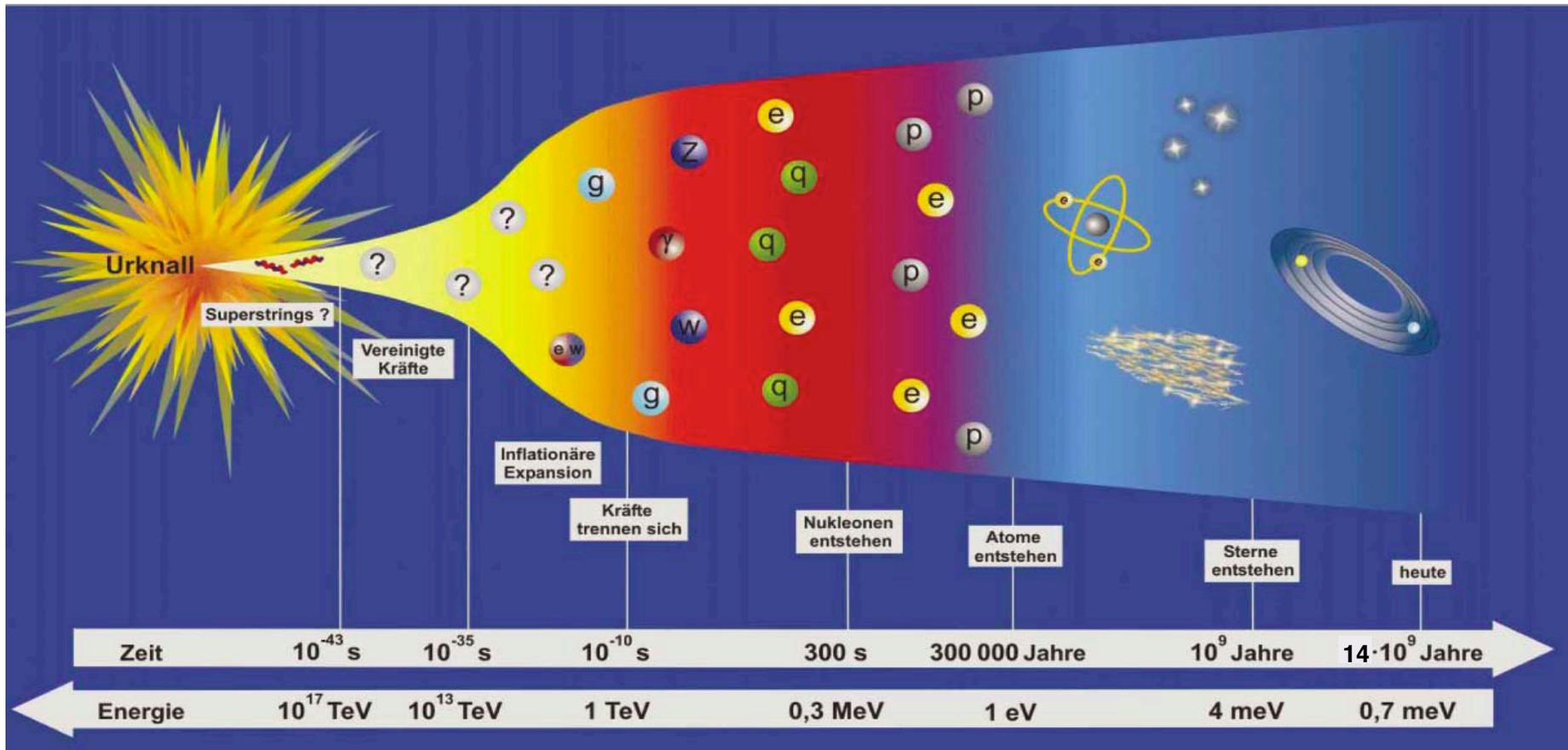
Grand Unified Theories: inkludieren zusätzlich die **starke Wechselwirkung**

**Theory of Everything (?)**:

inkludiert auch **Gravitation** (Quantengravitation)

**Ziel**: Vereinigung aller fundamentalen Kräfte bei hohen Energien, wie bei  $10^{-43}$  s (Planckzeit) nach dem Urknall

# Blick zurück zum Urknall



# Entstehung des Weltalls

Anfang:

Big Bang!

$10^{-35}$  s -  $10^{-43}$  s :

Kräfte sind alle vereint, Temperatur über  $10^{32}$  K.

$10^{-43}$  s:

Gravitation trennt sich von den anderen drei Kräften

$10^{-35}$  s:

Die starke Kraft trennt sich von den anderen Kräften -

Quarks und Antiquarks dominieren das Universum (mehr Quarks als Antiquarks - Asymmetrie!)

Das Universum dehnt sich extrem schnell aus (inflationäre Expansion). Temperatur  $10^{27}$  K.

$10^{-10}$  s:

Alle vier Kräfte sind getrennt. Temperatur  $10^{15}$  K.

$10^{-4}$  s:

Protonen und Neutronen bilden sich. Temperatur  $10^{13}$  K.

0.01 s:

Elektronen und Positronen bilden sich.

3 min.:

Atomkerne entstehen. Temperatur  $10^9$  K.

300000 Jahre:

Atome entstehen.

Das Universum wird transparent und füllt sich mit Licht (heute: Rotverschiebung - Mikrowellenbereich -> Kosmische Hintergrundstrahlung: heute sichtbar!)

Temperatur 3000 K.

1 Milliarde J.:

Galaxien entstehen

14 Mill J. (heute): Temperatur 3K.

ca. 14 000 000 000 Jahre

## Atomismus

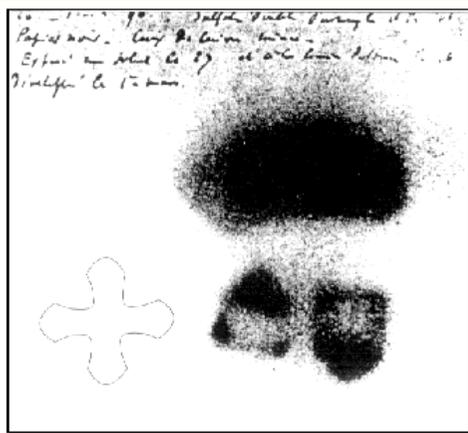


Nach **Demokrit** (460 - 370 v. Chr.) besteht die Welt aus dem **Vollen** und dem **Leeren**. Die Elemente des Kosmos sind die Atome. Diese sind unsichtbar und unteilbar (d.h. ihre Größe kann nicht verkleinert werden).

**Jedoch Vorsicht: Das Demokritische Modell ist keine gültige wissenschaftliche Theorie im heutigen Sinn (z.B. fehlte Übereinstimmung mit experimentellen Beobachtungen, Voraussagefähigkeit)!**

## Der Weg zum modernen Atommodell

**John Dalton:** Atomtheorie als Grundlage der Chemie formuliert (Anfang 19. Jhdt.).  
Das Atom sei das kleinste Teilchen eines chemischen Elements. Es gibt ebenso viele Atome wie Elemente. Atome wurden als massive, unteilbare Kugeln angesehen.

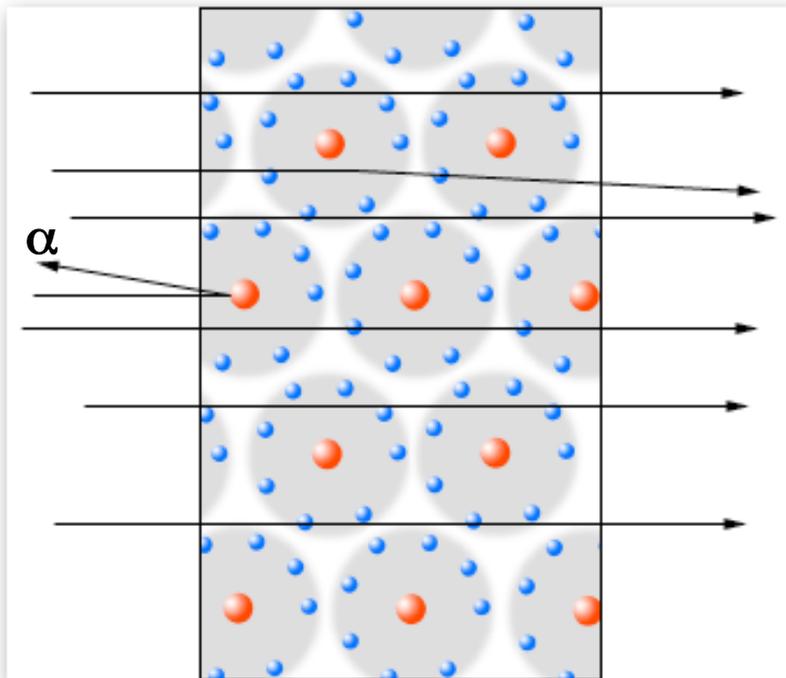
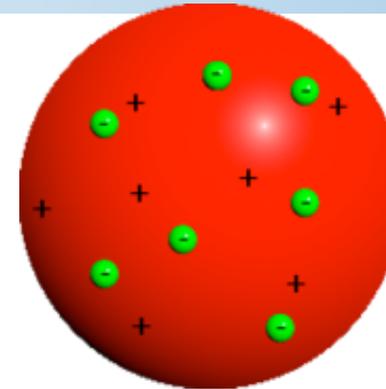


**Henri Becquerel:** entdeckt 1896 die natürliche Radioaktivität, d.h. Atome können sich ineinander umwandeln!



# Thompsons und Rutherfords Atommodelle

J. J. Thompson untersucht 1897 die Kathodenstrahlen und entdeckt die **Elektronen** (1. Elementarteilchen!). Er stellt das “Rosinenkuchenmodell” auf:



## Rutherford'scher Streuversuch (1911)

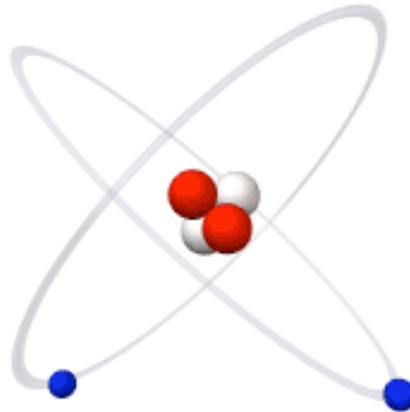
Alphastrahlen gehen meist ungehindert durch Goldfolie. Manchmal werden sie jedoch stark abgelenkt.

- Das Atom (ca.  $10^{-10}$  m ist praktisch “leer”)
- Der “Atomkern” ist auf kleinem Raum ( $10^{-14}$  bis  $10^{-15}$  m) konzentriert und enthält fast die ganze Masse.

# Das moderne Atommodell

Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Ernst Schrödinger, u.v.a.

Heliumatom



- Protonen
- Neutronen
- Elektronen

Dimitri Mendeleev (1869):

Klassifizierung der bekannten Elemente nach Atommasse (Massenverhältnisse aus chemischen Reaktionen bestimmt).  
Er sagte Elemente voraus: Gallium, Germanium, Scandium.

Moderne Version: Periodensystem der Elemente  
Klassifizierung nach Ordnungszahl (Anzahl der Protonen im Atomkern).

# PERIODENSYSTEM DER ELEMENTE

<http://www.ktf.spit.ch/periodnt/de/>

PERIODEN	GRUPPE I A		GRUPPE II A		GRUPPE IUPAC										GRUPPE CAS						GRUPPE VIII A			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
1	1 1.0079 <b>H</b> WASSERSTOFF																			2 4.0026 <b>He</b> HELIUM				
2	3 6.941 <b>Li</b> LITHIUM	4 9.0122 <b>Be</b> BERYLLIUM																	5 10.811 <b>B</b> BOR	6 12.011 <b>C</b> KOHLENSTOFF	7 14.007 <b>N</b> STICKSTOFF	8 15.999 <b>O</b> SAUERSTOFF	9 18.998 <b>F</b> FLUOR	10 20.180 <b>Ne</b> NEON
3	11 22.990 <b>Na</b> NATRIUM	12 24.305 <b>Mg</b> MAGNESIUM																	13 26.982 <b>Al</b> ALUMINIUM	14 28.086 <b>Si</b> SILIZIUM	15 30.974 <b>P</b> PHOSPHOR	16 32.065 <b>S</b> SCHWEFEL	17 35.453 <b>Cl</b> CHLOR	18 39.948 <b>Ar</b> ARGON
4	19 39.098 <b>K</b> KALIUM	20 40.078 <b>Ca</b> CALCIUM	21 44.956 <b>Sc</b> SCANDIUM	22 47.867 <b>Ti</b> TITAN	23 50.942 <b>V</b> VANADIUM	24 51.996 <b>Cr</b> CHROM	25 54.938 <b>Mn</b> MANGAN	26 55.845 <b>Fe</b> EISEN	27 58.933 <b>Co</b> KOBALT	28 58.693 <b>Ni</b> NICKEL	29 63.546 <b>Cu</b> KUPFER	30 65.39 <b>Zn</b> ZINK	31 69.723 <b>Ga</b> GALLIUM	32 72.64 <b>Ge</b> GERMANIUM	33 74.922 <b>As</b> ARSEN	34 78.96 <b>Se</b> SELEN	35 79.904 <b>Br</b> BROM	36 83.80 <b>Kr</b> KRYPTON						
5	37 85.468 <b>Rb</b> RUBIDIUM	38 87.62 <b>Sr</b> STRONTIUM	39 88.906 <b>Y</b> YTRIUM	40 91.224 <b>Zr</b> ZIRKONIUM	41 92.906 <b>Nb</b> NOB	42 95.94 <b>Mo</b> MOLYBDÄN	43 (98) <b>Tc</b> TECHNETIUM	44 101.07 <b>Ru</b> RUTHENIUM	45 102.91 <b>Rh</b> RHODIUM	46 106.42 <b>Pd</b> PALLADIUM	47 107.87 <b>Ag</b> SILBER	48 112.41 <b>Cd</b> CADMIUM	49 114.82 <b>In</b> INDIUM	50 118.71 <b>Sn</b> ZINN	51 121.76 <b>Sb</b> ANTIMON	52 127.60 <b>Te</b> TELLUR	53 126.90 <b>I</b> IOD	54 131.29 <b>Xe</b> XENON						
6	55 132.91 <b>Cs</b> CÄSIUM	56 137.33 <b>Ba</b> BARIUM	57-71 <b>La-Lu</b> Lanthaniden	72 178.49 <b>Hf</b> HAFNIUM	73 180.95 <b>Ta</b> TANTAL	74 183.84 <b>W</b> WOLFRAM	75 186.21 <b>Re</b> RHENIUM	76 190.23 <b>Os</b> OSMIUM	77 192.22 <b>Ir</b> IRIDIUM	78 195.08 <b>Pt</b> PLATIN	79 196.97 <b>Au</b> GOLD	80 200.59 <b>Hg</b> QUECKSILBER	81 204.38 <b>Tl</b> THALLIUM	82 207.2 <b>Pb</b> BLEI	83 208.98 <b>Bi</b> BISMUT	84 (209) <b>Po</b> POLONIUM	85 (210) <b>At</b> ASTAT	86 (222) <b>Rn</b> RADON						
7	87 (223) <b>Fr</b> FRANCIUM	88 (226) <b>Ra</b> RADIUM	89-103 <b>Ac-Lr</b> Actiniden	104 (261) <b>Rf</b> RUTHERFORDIUM	105 (262) <b>Db</b> DUBNIUM	106 (266) <b>Sg</b> SEABORGIUM	107 (264) <b>Bh</b> BOHRUM	108 (277) <b>Hs</b> HASSIUM	109 (268) <b>Mt</b> METNERIUM	110 (281) <b>Uun</b> UNUNNILIUM	111 (272) <b>Uuu</b> UNUNUNIUM	112 (285) <b>Uub</b> UNUNBIUM												

RELATIVE ATOMMASSE (1)

GRUPPE IUPAC

GRUPPE CAS

ORDNUNGSZAHL

ELEMENTSYMBOL

NAME DES ELEMENTES

■ Metalle    ■ Halbmetalle    ■ Nichtmetalle  
1 Alkalimetalle    16 Chalkogene  
2 Erdalkalimetalle    17 Halogene  
10 Ubergangselemente    18 Edelgase  
14-15 Lanthaniden  
89-103 Actiniden

ZUSTAND (100 °C; 101 kPa)  
**Ne** - gasförmig    **Fe** - fest  
**Ga** - flüssig    **Tc** - künstliche

(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 667-683 (2001)  
 Die relative atommasse wird auf fünf Stellen angezeigt. Für Elemente ohne stabile Isotope ist die Atommasse des stabilsten Isotops in Klammern angegeben.  
 Drei dieser Elemente (Tc, Pa und U) spielen eine bedeutende Rolle aufgrund ihrer Häufigkeit in der Erdkruste und ihrer atomgewichte und werden deshalb aufgelistet.

LANTHANIDEN

57 138.91 <b>La</b> LANTHAN	58 140.12 <b>Ce</b> CER	59 140.91 <b>Pr</b> PRASEODYM	60 144.24 <b>Nd</b> NEODYM	61 (145) <b>Pm</b> PROMETHIUM	62 150.36 <b>Sm</b> SAMARIUM	63 151.96 <b>Eu</b> EUROPIUM	64 157.25 <b>Gd</b> GADOLINIUM	65 158.93 <b>Tb</b> TERBIUM	66 162.50 <b>Dy</b> DYSPROSIUM	67 164.93 <b>Ho</b> HOLMIUM	68 167.26 <b>Er</b> ERBIUM	69 168.93 <b>Tm</b> THULIUM	70 173.04 <b>Yb</b> YTTERIUM	71 174.97 <b>Lu</b> LUTETIUM
-----------------------------------	-------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

Copyright © 1998-2003 ENIG (enig@kif-epfl.ch)

ACTINIDEN

89 (227) <b>Ac</b> ACTINIUM	90 232.04 <b>Th</b> THORIUM	91 231.04 <b>Pa</b> PROTACTINIUM	92 238.03 <b>U</b> URAN	93 (237) <b>Np</b> NEPTUNIUM	94 (244) <b>Pu</b> PLUTONIUM	95 (243) <b>Am</b> AMERICIUM	96 (247) <b>Cm</b> CURIUM	97 (247) <b>Bk</b> BERKELIUM	98 (251) <b>Cf</b> CALIFORNIUM	99 (252) <b>Es</b> EINSTEINIUM	100 (257) <b>Fm</b> FERMIUM	101 (258) <b>Md</b> MENDELEVIUM	102 (259) <b>No</b> NOBELIUM	103 (262) <b>Lr</b> LAWRENCIUM
-----------------------------------	-----------------------------------	--	-------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

Redakteur: Marc Hers (mhers@gmx.de)

## Teilchenzoo

In den Fünfziger- bis Siebzigerjahren wurden laufend neue Teilchen entdeckt, was zum Begriff des sogenannten **Teilchenzoo**s führte.

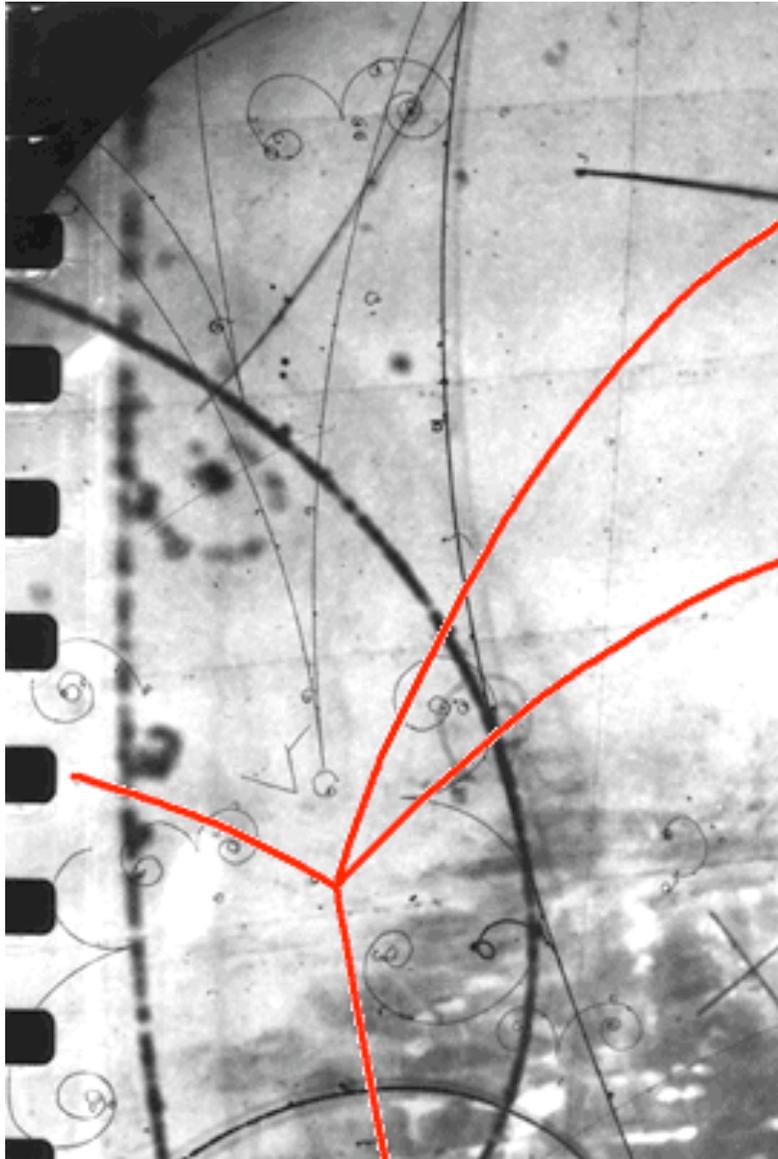
Willis Lamb in seiner Nobelpreisrede 1955:

*Als 1901 zum ersten Mal die Nobelpreise verliehen wurden, wußten die Physiker nur von zwei Objekten, die jetzt “Elementarteilchen” genannt werden: dem Elektron und dem Proton. Eine Flut von anderen “elementaren Teilchen” kam nach 1930 zutage - Neutron, Neutrino,  $\mu$ -Meson,  $\pi$ -Meson, schwerere Mesonen und verschiedene Hyperonen. Ich hörte, wie jemand sagte, daß ein Entdecker eines neuen Elementarteilchens normalerweise mit einem Nobelpreis belohnt wurde, nun aber mit einer Geldstrafe von 10000 \$ belegt werden sollte.*

Ähnliches antwortete Enrico Fermi zu einem Studenten anlässlich eines Vortrags:

*Junger Mann, wenn ich mir die Namen aller dieser Teilchen merken könnte, wäre ich Botaniker geworden.*

# Detektoren - Blasenkammern



C.-E. Wulz



14

Perchtoldsdorf, Okt. 2009

## Der achtfache Weg zur Weisheit

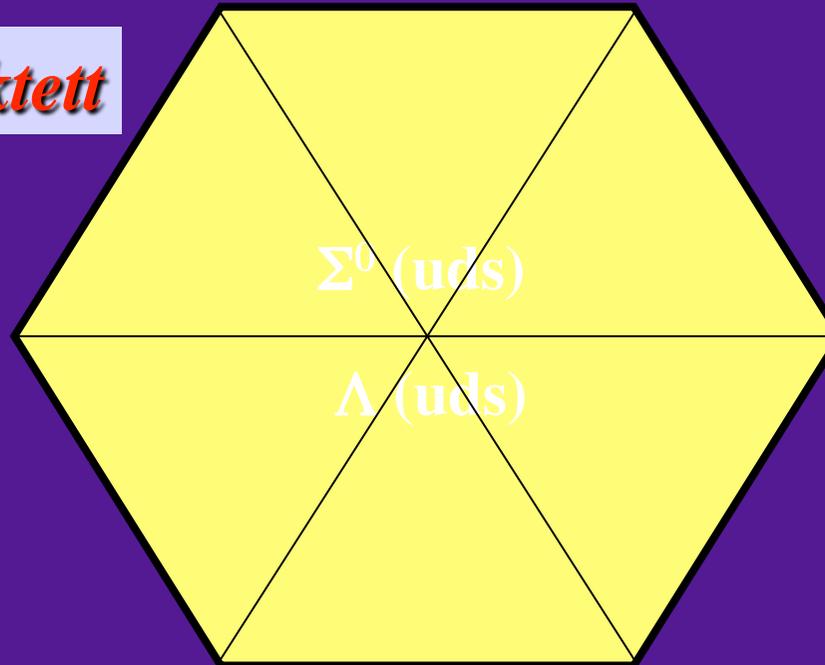
*Murray Gell-Mann, Yuval Ne'eman (1961):  
"Eightfold Way" - Versuch zur Klassifizierung der Teilchen*

Neutron  $n$  ( $udd$ )

Proton  $p$  ( $uud$ )

***Baryonenoktett***

$\Sigma^-$  ( $dds$ )



$\Sigma^+$  ( $uus$ )

$\Xi^-$  ( $dss$ )

$\Xi^0$  ( $uss$ )

# *Das Quarkmodell*

**1964: Murray Gell-Mann, George Zweig**



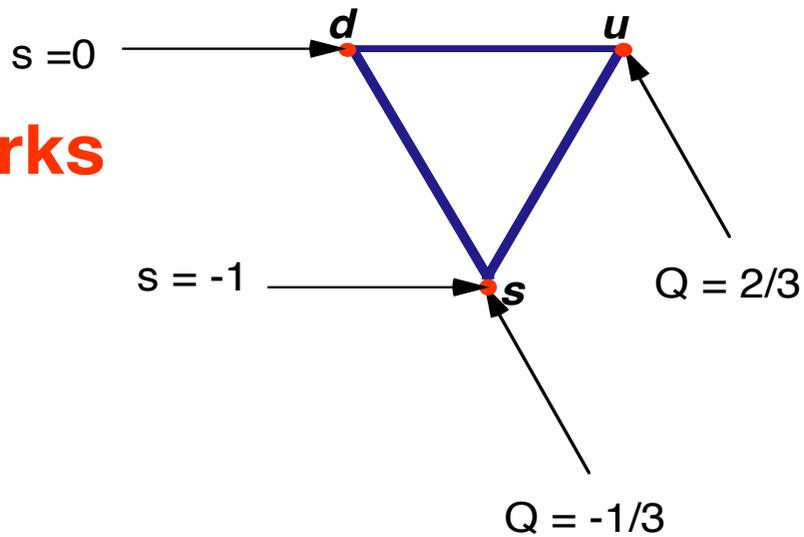
**Elementare Bausteine der Materie:**

**Quarks in 3 “Flavors”:  
up, down, strange**

**Der Name Quark kommt aus *Finnegans Wake* (James Joyce):  
*Three quarks for Muster Mark!***

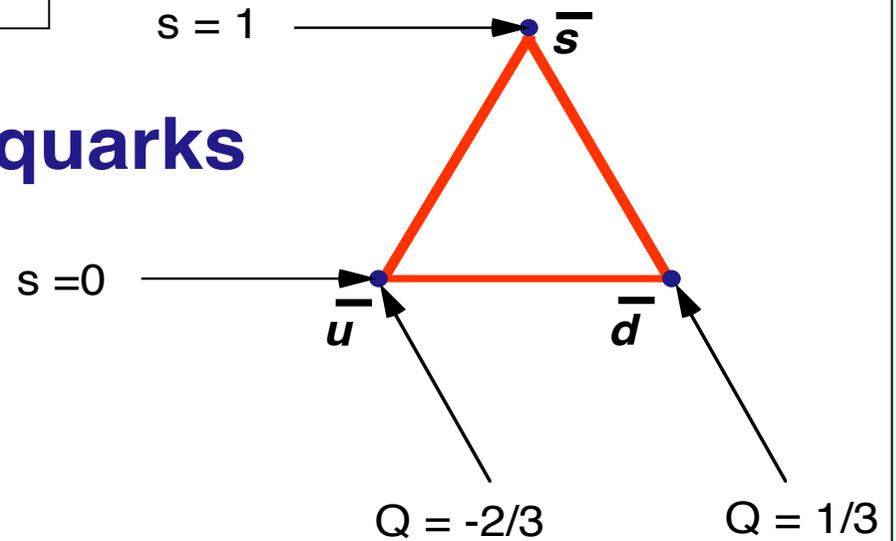
# Das Quarkmodell

## Quarks



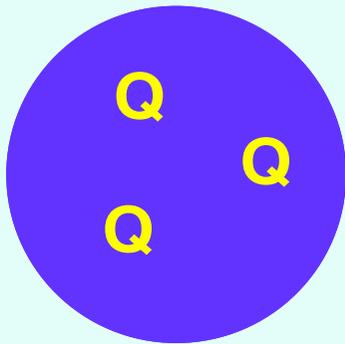
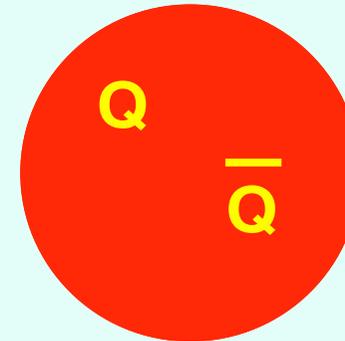
**Q:** elektrische Ladung  
**S:** Strangeness

## Antiquarks



# Mesonen, Baryonen

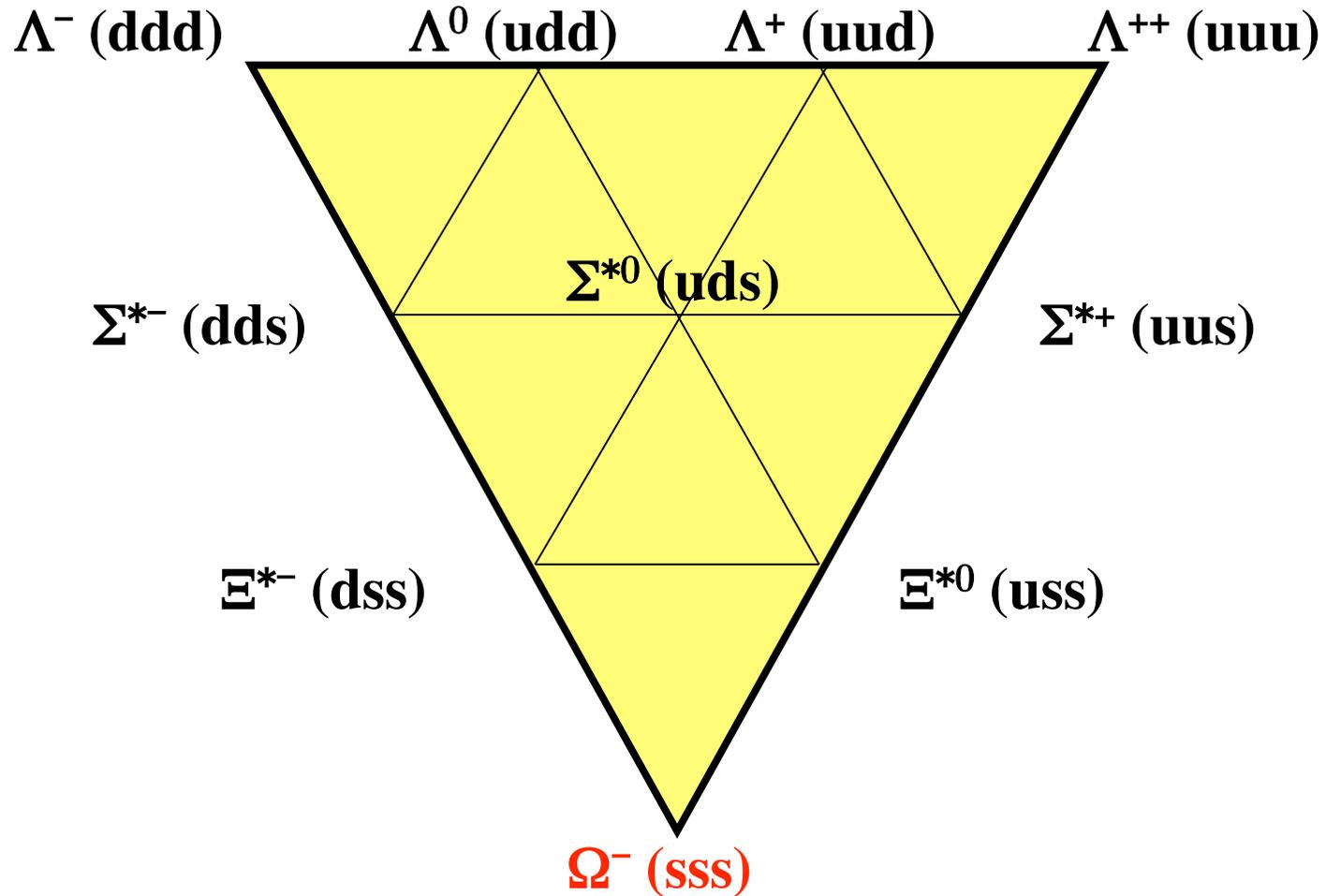
**Jedes Meson besteht aus 1 Quark und 1 Antiquark.**



**Jedes Baryon besteht aus 3 Quarks.**



## Der Weg nach Stockholm

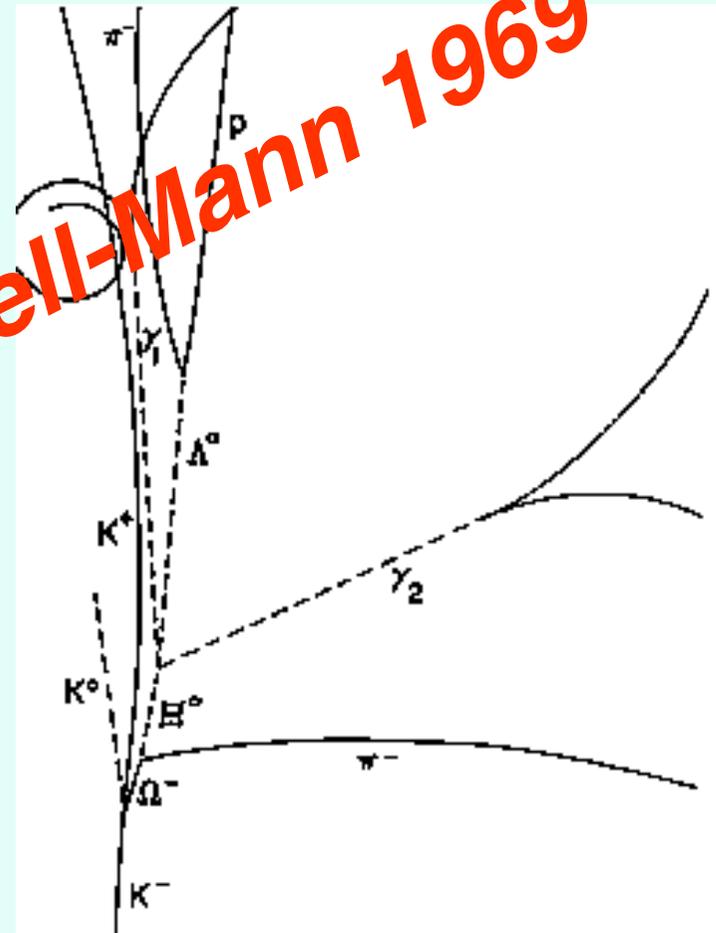


## Baryonendekuplett

# Das Omega-Minus

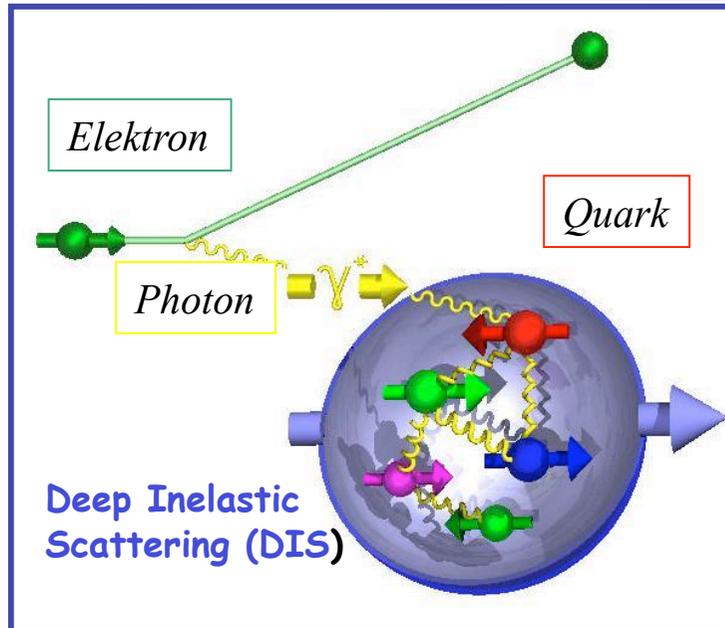


**Nobelpreis für Gell-Mann 1969**



**Brookhaven, 1964**

# Das SLAC-MIT-Streuexperiment (1969)



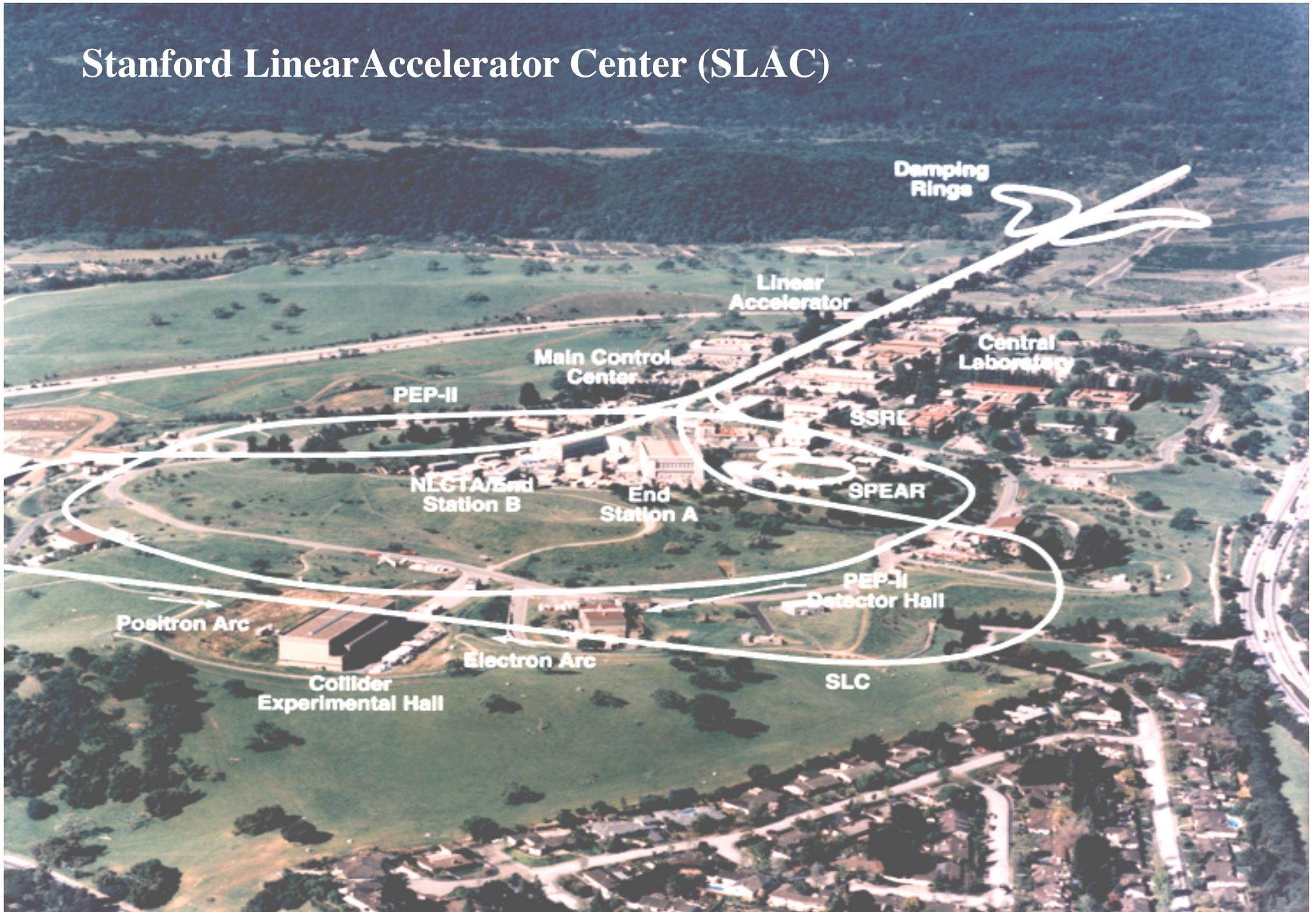
Mehr Elektronen als erwartet, wenn Protonen Kugeln mit gleichverteilter Masse wären, wurden mit großen Winkeln und bei höheren Energien gestreut. (1. Präsentation: W. Panofsky, Wien ICHEP 1968)

Das Proton enthält punktförmige Teilchen, die mit **Quarks** zu identifizieren sind!



R. Taylor, J. Friedman, H. Kendall (1990)

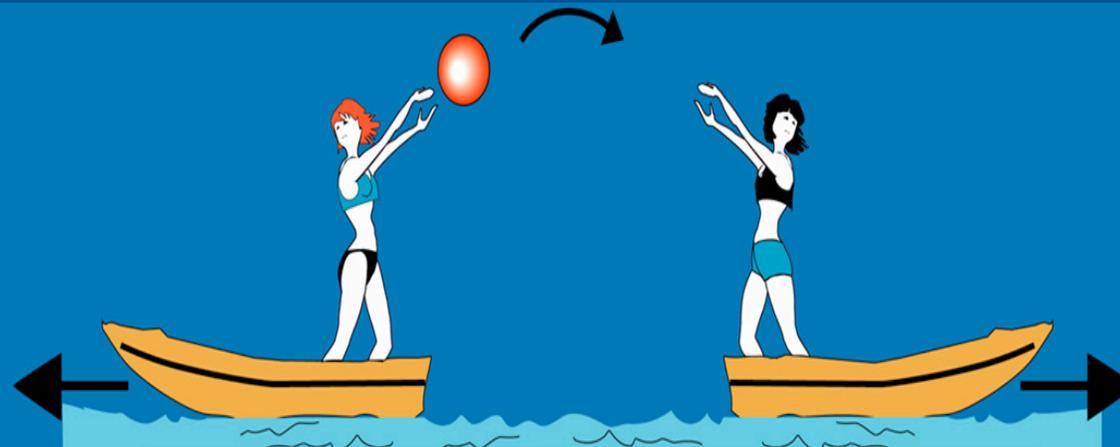
# Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)



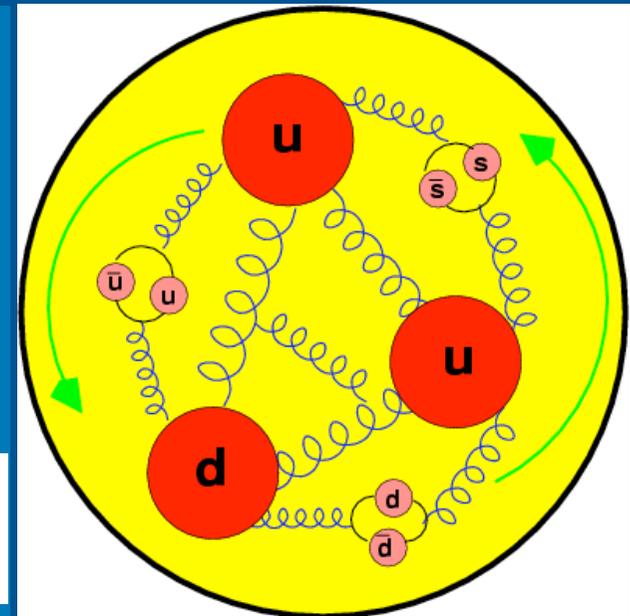
# Was hält das Proton (und die Atomkerne) zusammen?



In DIS-Experimenten wurde auch gefunden, daß die Impulse der Quarks im Proton nicht den gesamten Protonimpuls ausmachen. Es müssen daher noch andere Teilchen vorhanden sein: die **Gluonen** (glue = Klebstoff) wurden postuliert!

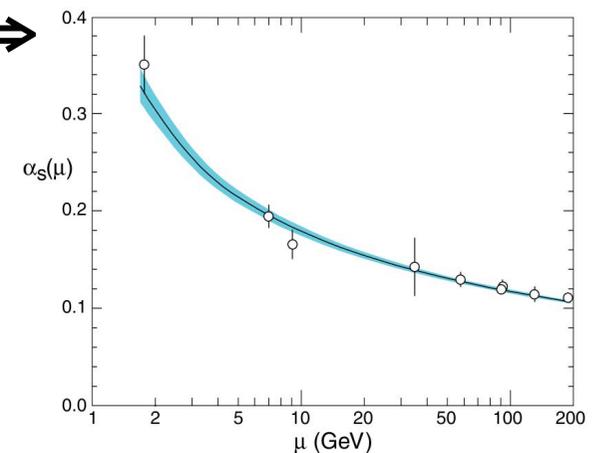
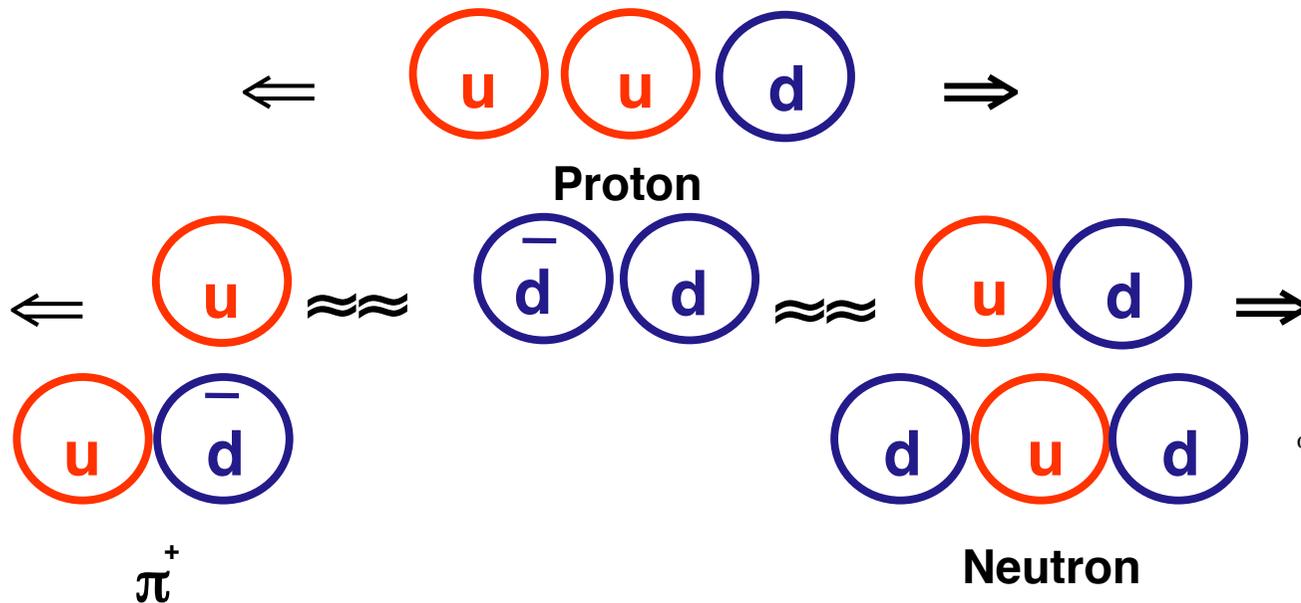
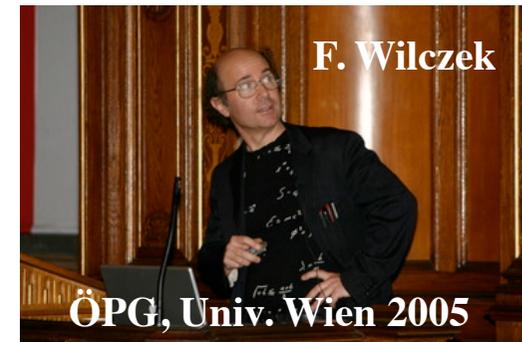


**TEILCHENAUSTAUSCH IST FÜR KRAFT VERANTWORTLICH!**  
(Bemerkung: Kraft kann auch anziehend sein!)



# Asymptotische Freiheit

Trotz langer Suche wurden freie Quarks oder Gluonen nie gefunden! Der Grund liegt in der ‘asymptotischen Freiheit’ (Confinement) -> Nobelpreis 2004: Gross, Politzer, Wilczek.



# WANTED: Quarks und Gluonen

Der Nachweis von Gluonjets gelang 1979 am Beschleuniger PETRA des DESY in Hamburg.

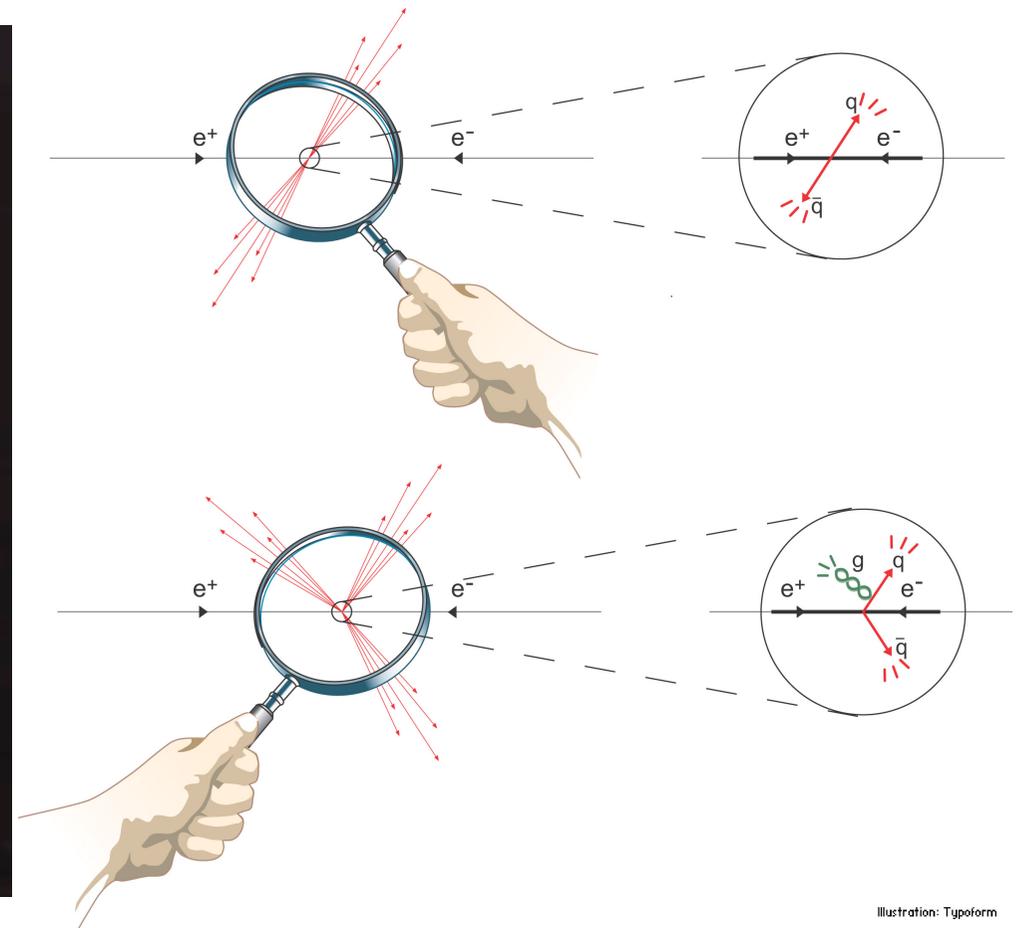
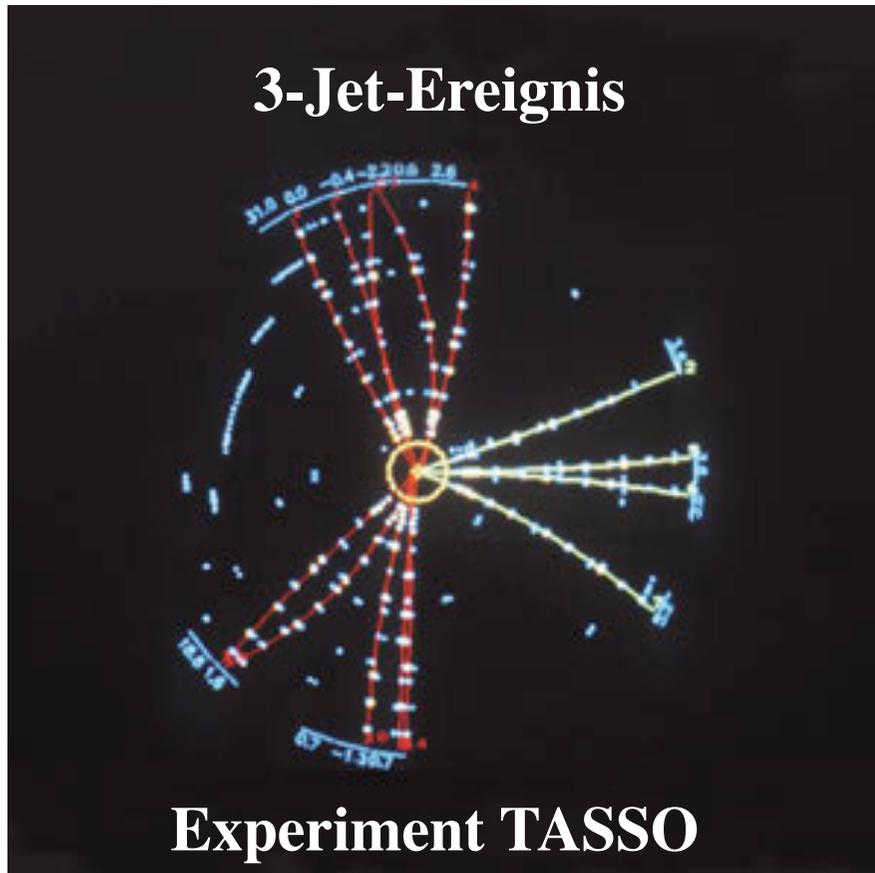


Illustration: Typoform

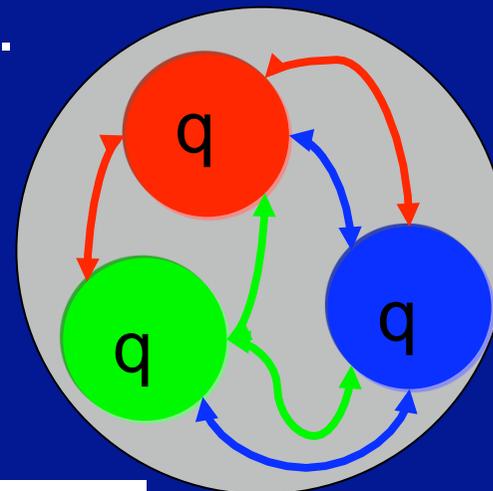
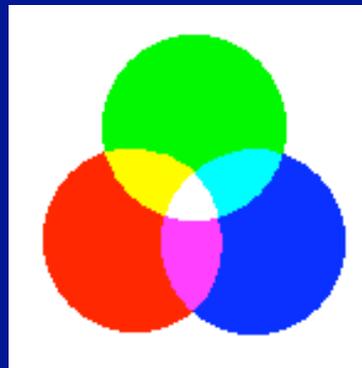
# Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)



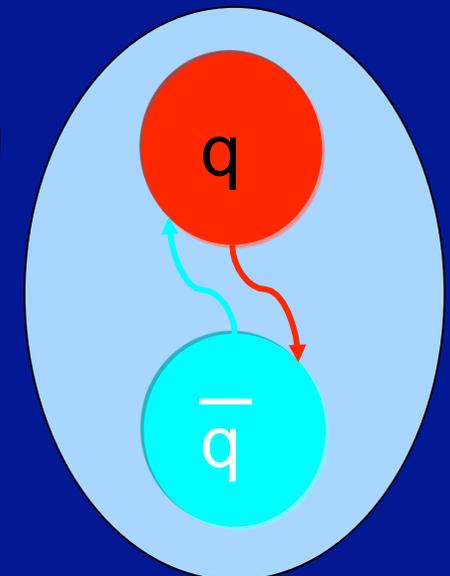
# Farbe - Quantenchromodynamik

Quarks haben neben der elektrischen Ladung auch noch eine „Farbladung“ (nicht wörtlich im optischen Sinn zu nehmen). Gluonen haben ebenfalls Farbe, sind allerdings Farbmischzustände. Die Theorie der starken Kraft heißt deshalb auch Quantenchromodynamik.

Farbe	Antifarbe
ROT	TÜRKIS
BLAU	GELB
GRÜN	PINK



Baryonen



Mesonen

## Die schwache Wechselwirkung

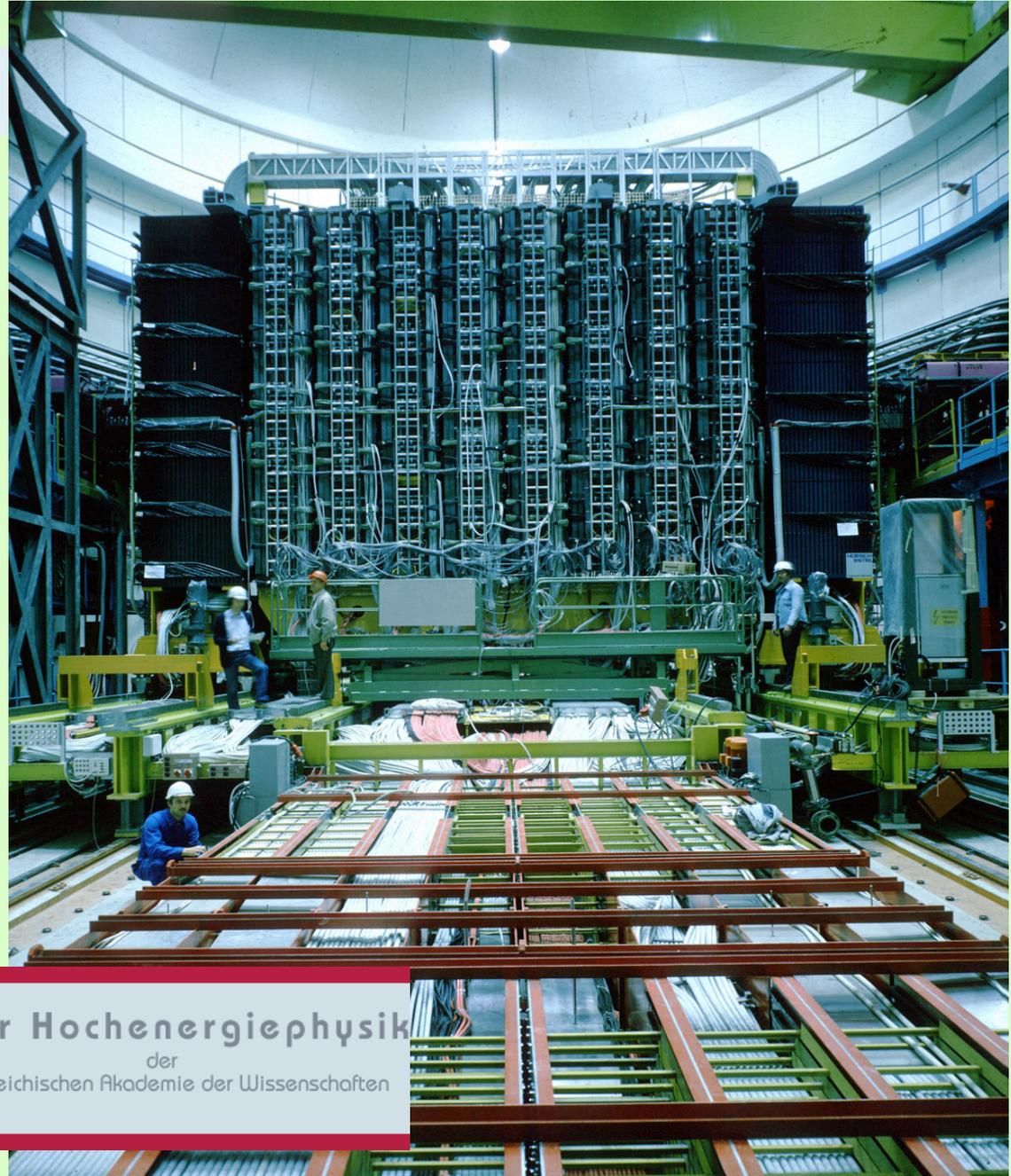
Sie tritt z.B. beim radioaktiven  $\beta$ -Zerfall (z.B.  ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}$ ) auf:



Teilchen ohne starke Wechselwirkung heißen **LEPTONEN** (z.B. Elektron, Myon, Neutrino).

Die schwache Wechselwirkung wird durch die **INTERMEDIÄREN VEKTORBOSONEN** ( $W^\pm$ ,  $Z$ ) vermittelt. Diese sind fast 100 mal so schwer wie das Proton und wurden 1983/1984 an den Experimenten UA1 und UA2 des Superprotonsynchrotrons am CERN entdeckt. Carlo Rubbia und Simon van der Meer bekamen für ihre entscheidenden Beiträge den Nobelpreis.

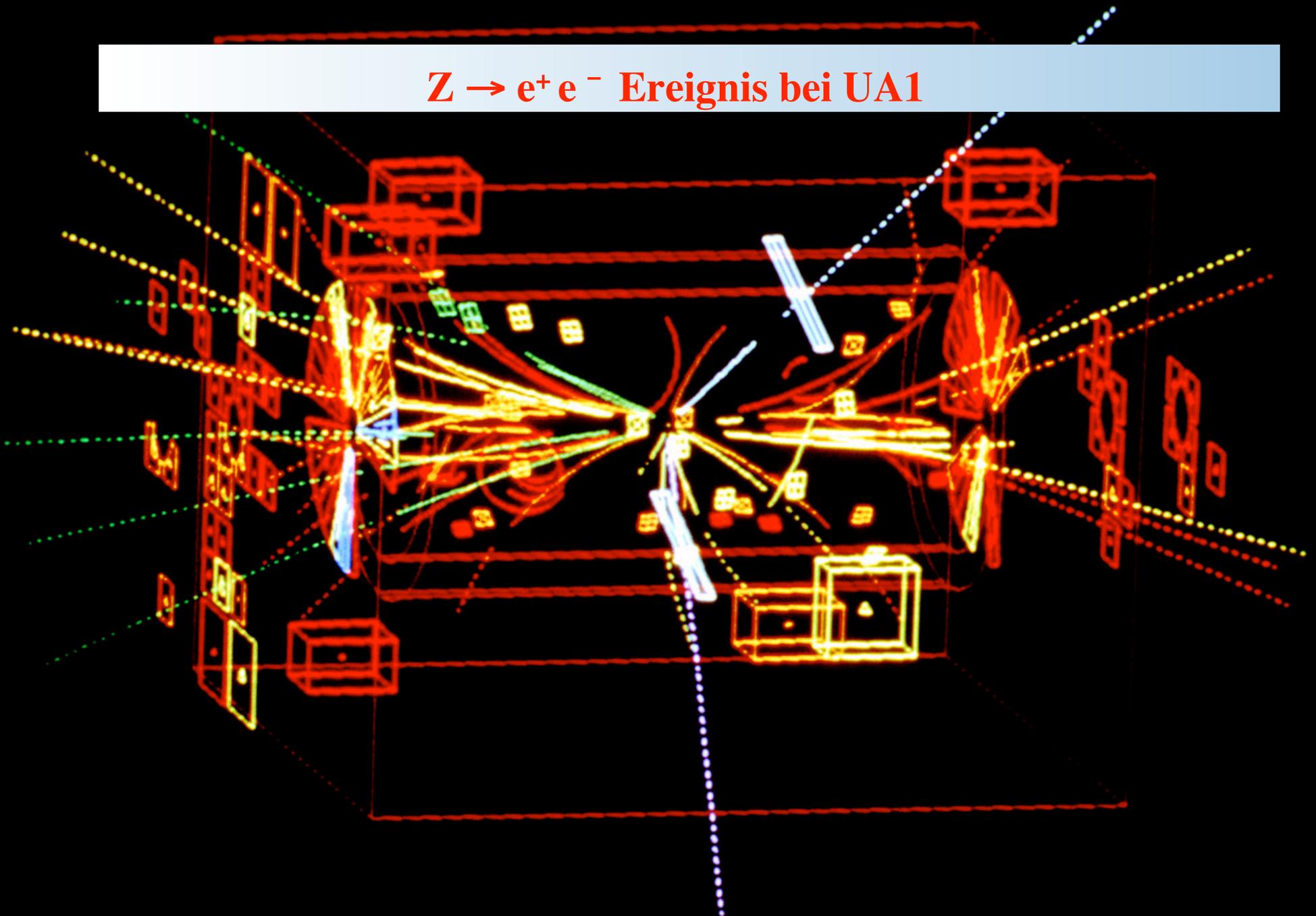
# UA1-Experiment



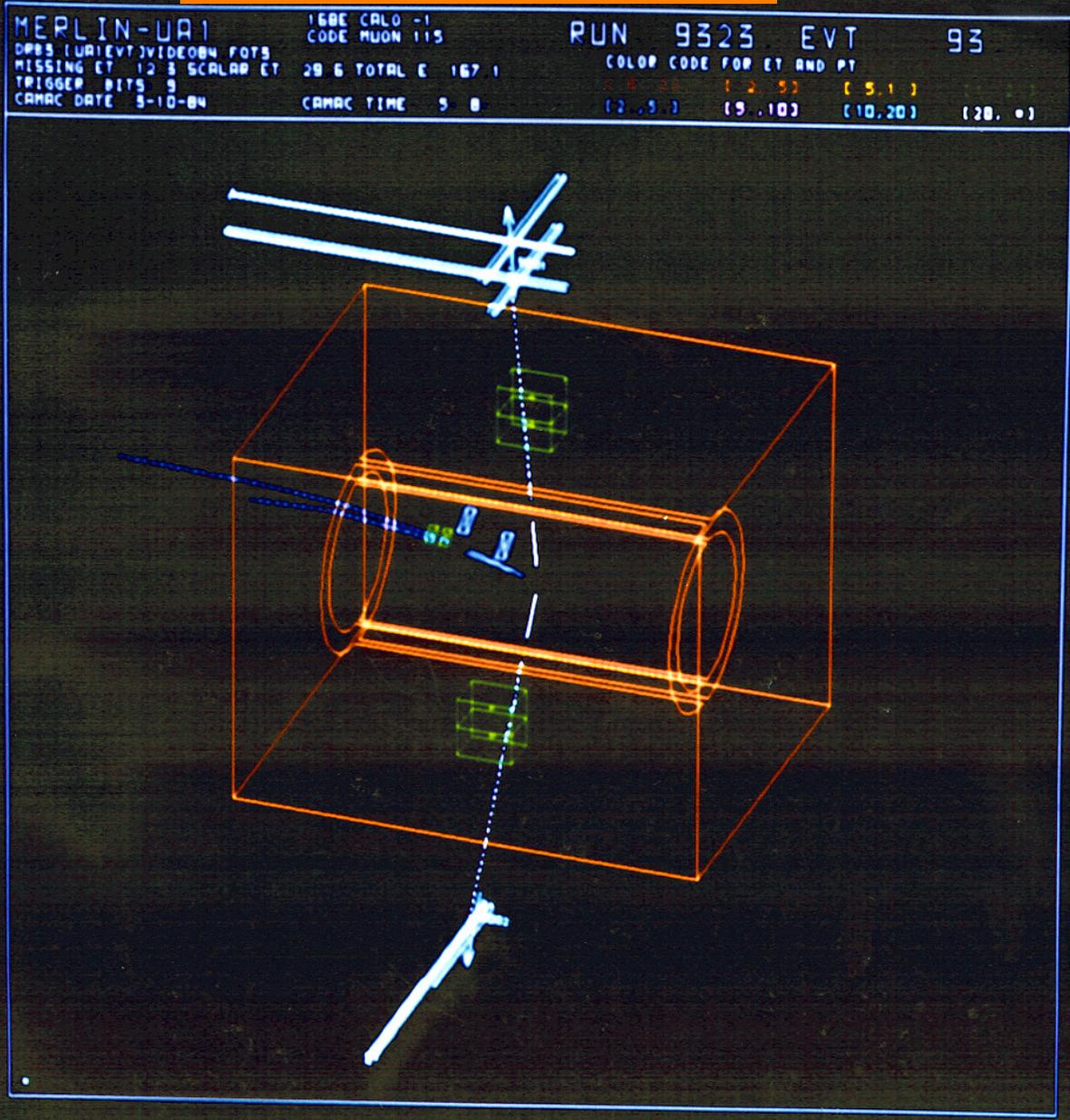
Mitwirkung:

hephy Institut für Hochenergiephysik  
der hephy Österreichischen Akademie der Wissenschaften

$Z \rightarrow e^+ e^-$  Ereignis bei UA1



# $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$ Ereignis bei UA1

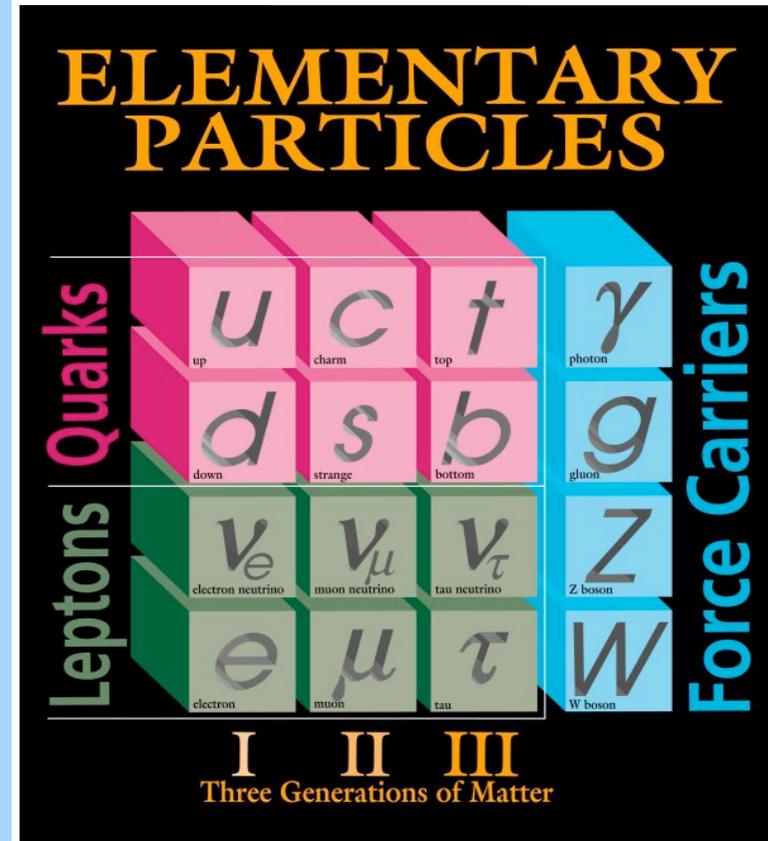


X591-2-85

+

# Teilchenphysik am Ende des 20. Jhdts

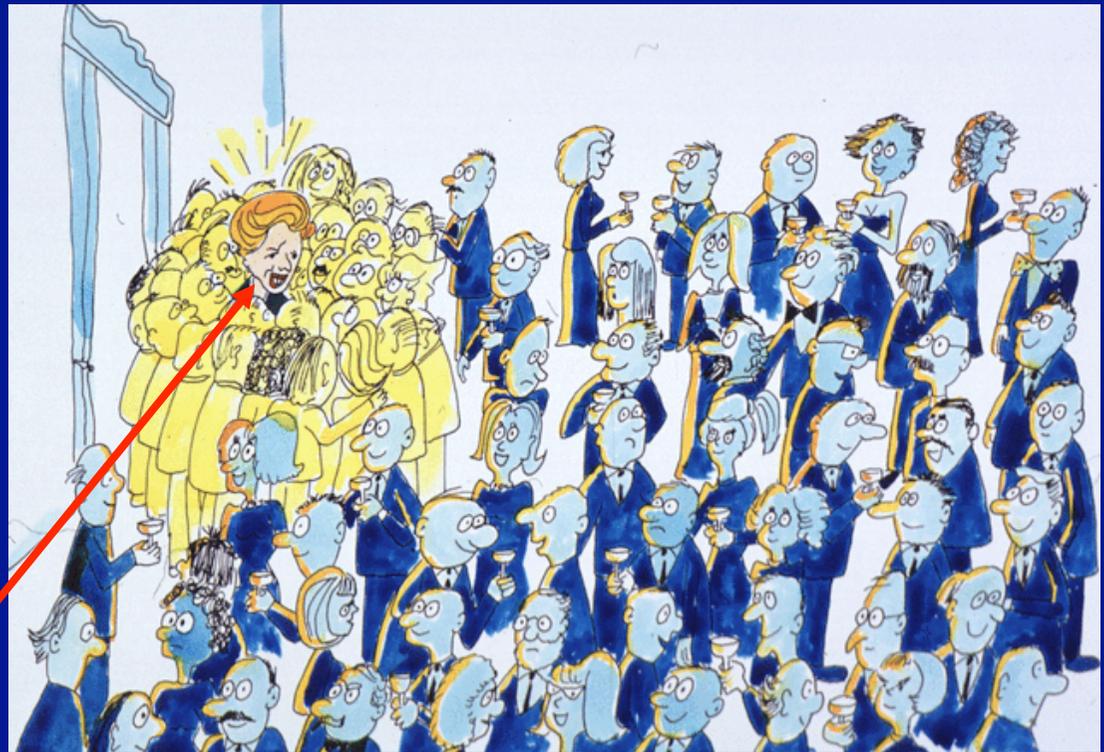
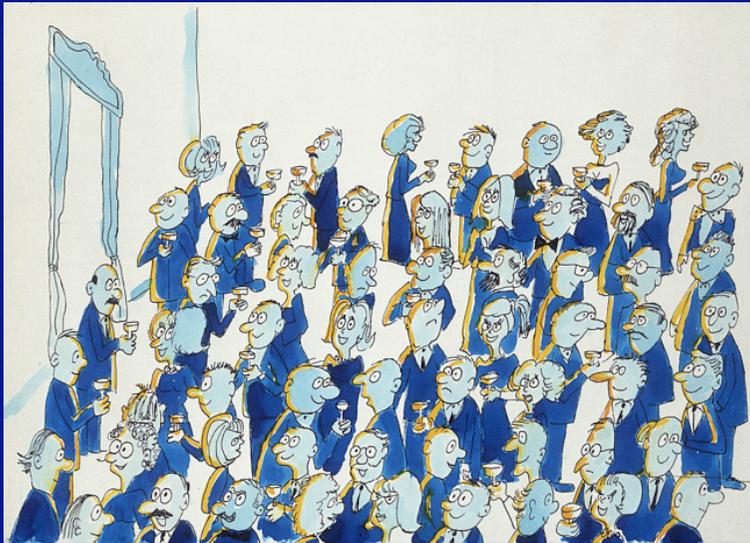
Das **Standardmodell** der Teilchenphysik enthält die Materieteilchen Quarks [up, down, charm, strange, top, bottom (beauty)] und Leptonen (Elektron, Myon, Tau und ihre Neutrinos), die Vermittlerteilchen der elektroschwachen (Photon, W- und Z-Bosonen) und der starken Wechselwirkung (Gluonen). Alle diese Teilchen sind gefunden, und ihre vorhergesagten Eigenschaften wurden bisher eindrucksvoll, teilweise mit höchster Präzision, experimentell bestätigt. Jedoch fehlt noch die Entdeckung des **Higgsteilchens**, das mit dem Feld assoziiert ist, das allen anderen (außer den Neutrinos) Masse gibt. Ebenso ist die Gravitation nicht inkludiert. Das Standardmodell muß also erweitert werden, insbesondere auch für höhere Energien als sie bisher zugänglich waren!



**“Periodensystem”**

# Higgsmechanismus

Erklärung für Mr. Waldegrave (Minister, GB) von David Miller



Ein Teilchen  
bekommt **Masse!**

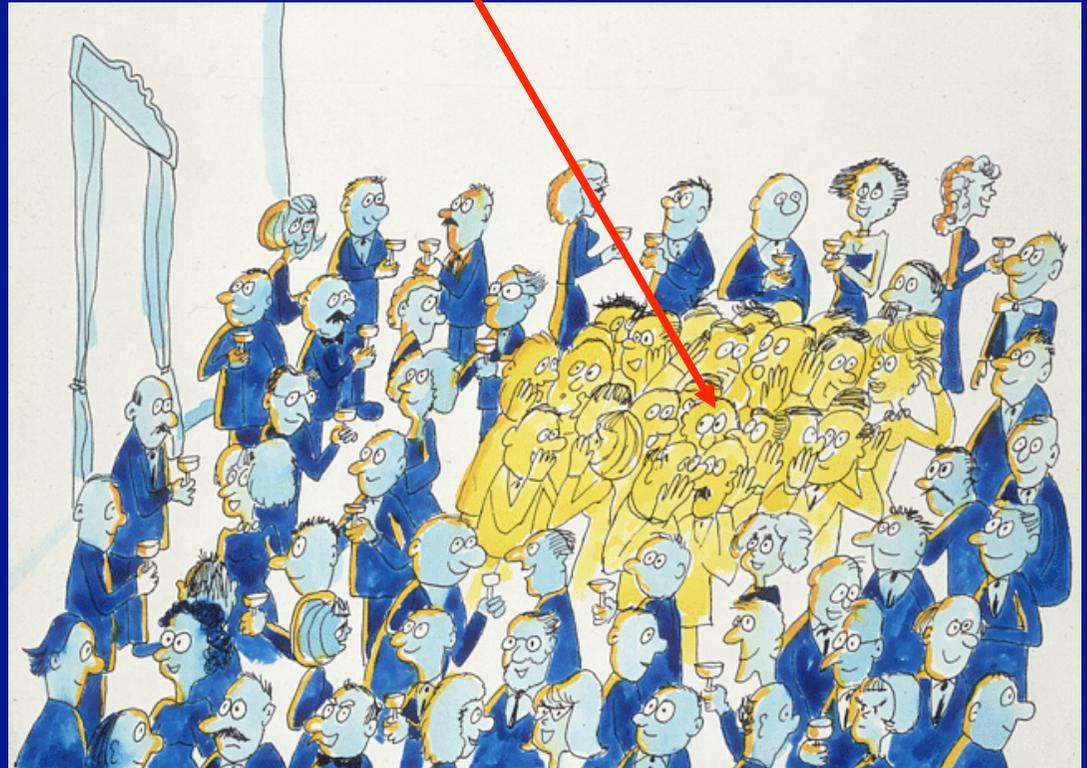
# Das Higgsteilchen



**Ein Gerücht verbreitet sich**

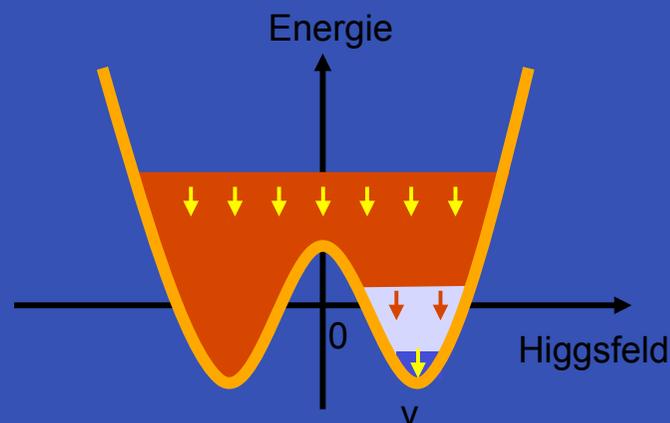
**Das Standardmodell sagt jedoch die Masse des Higgsteilchens nicht vorher!**

**Das Higgsteilchen entsteht!**



# Erzeugung von Masse durch den Higgsmechanismus

- Standardmodell „funktioniert“ nur mit ursprünglich **masselosen** Teilchen!
- Masse entsteht erst durch die Wechselwirkung mit einem (hypothetischen) **Higgs-Feld**
- Durch **spontane Symmetriebrechung** ist das gesamte Universum von diesem Higgs-Feld durchdrungen
- „Schwingungen“ in diesem Higgs-Feld erscheinen als **Higgs-Teilchen**, deren Nachweis am LHC / CERN in einigen Jahren gelingen soll



Spontane Symmetriebrechung

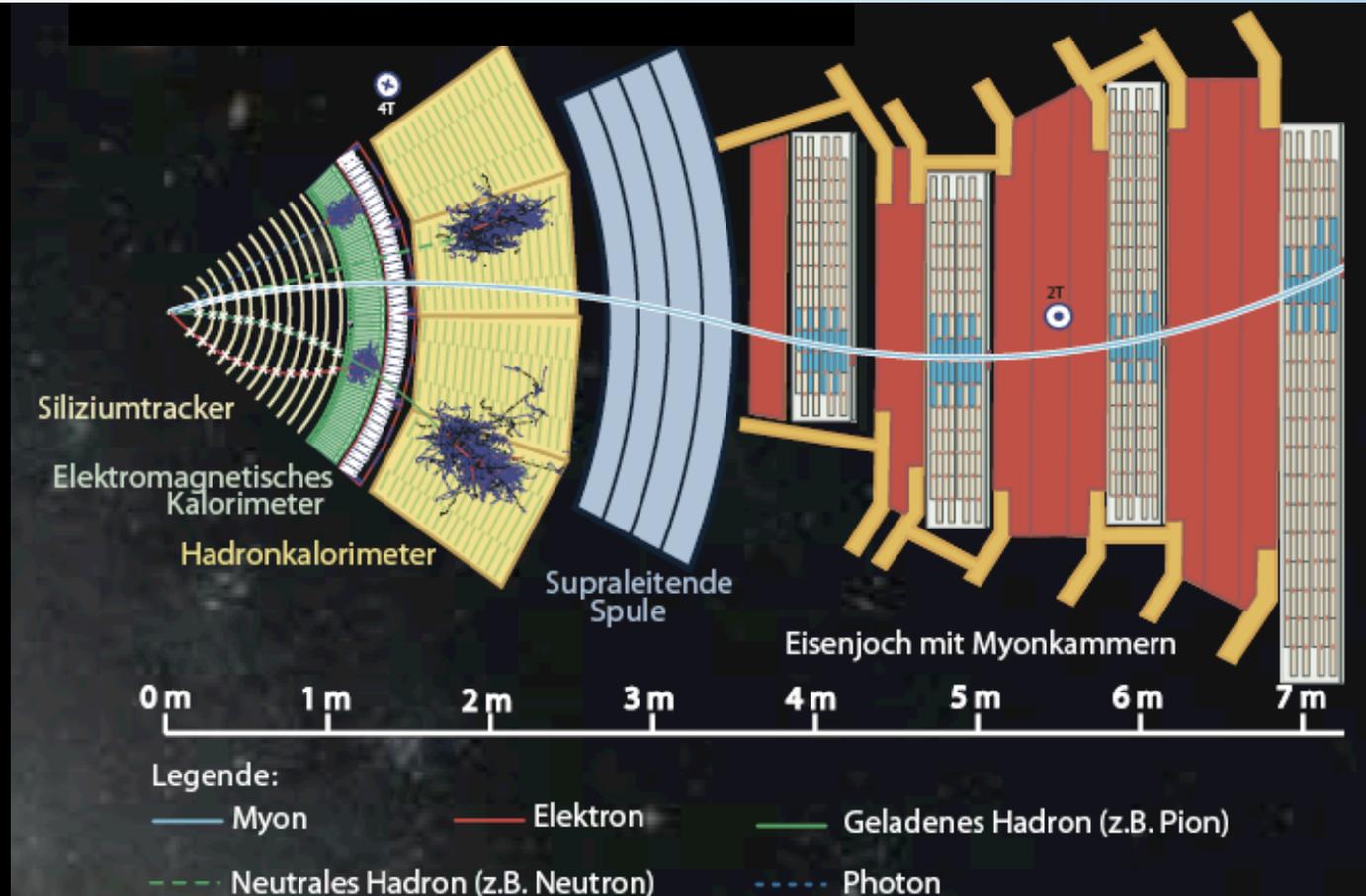
**heißes Universum**  
(kurz nach Urknall)

**Teilchen sind masselos**

**kaltes Universum**  
(kondensiert in einen  
asymmetrischen Zustand  
mit Higgsfeld)

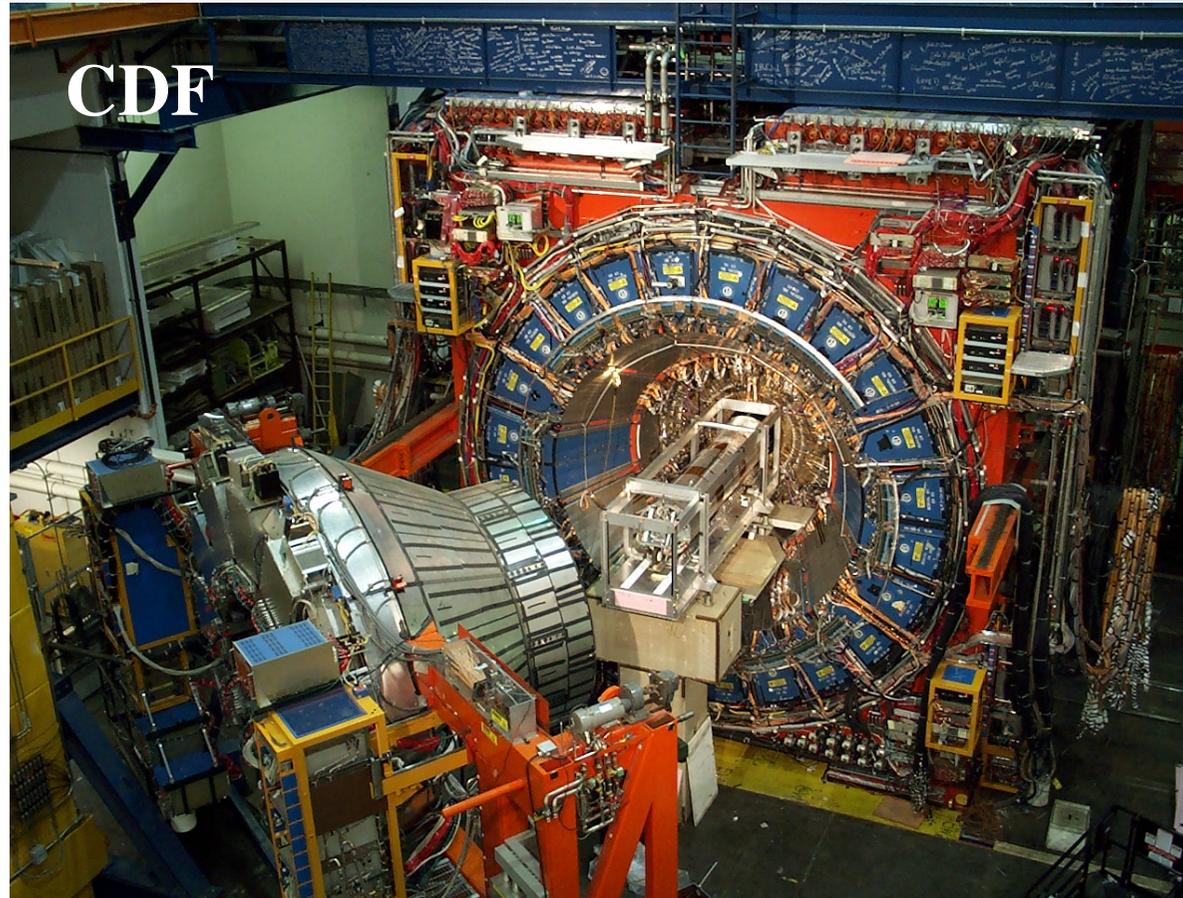
**Teilchen haben  
nun Masse**

# Die Suche nach dem Higgsteilchen

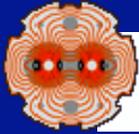


Das Higgsboson sollte in bekannte Teilchen zerfallen. Zur Zeit können nur die Beschleunigerexperimente CDF und D0 am **Tevatron** des Fermilab (USA) nach dem Higgsteilchen suchen. Jedoch ist der erforschbare Massenbereich sehr eng. Die beste Hoffnung auf Entdeckung haben die Experimente ATLAS und CMS am **LHC**.

# Detektoren zur Suche nach dem Higgssteilchen

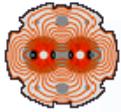


Zur Zeit können nur die Beschleunigerexperimente CDF und D0 am **Tevatron** des Fermilab (USA) nach dem Higgssteilchen suchen. Jedoch ist der erforschbare Massenbereich sehr eng. Die beste Hoffnung auf Entdeckung hat der **Large Hadron Collider** in Genf.

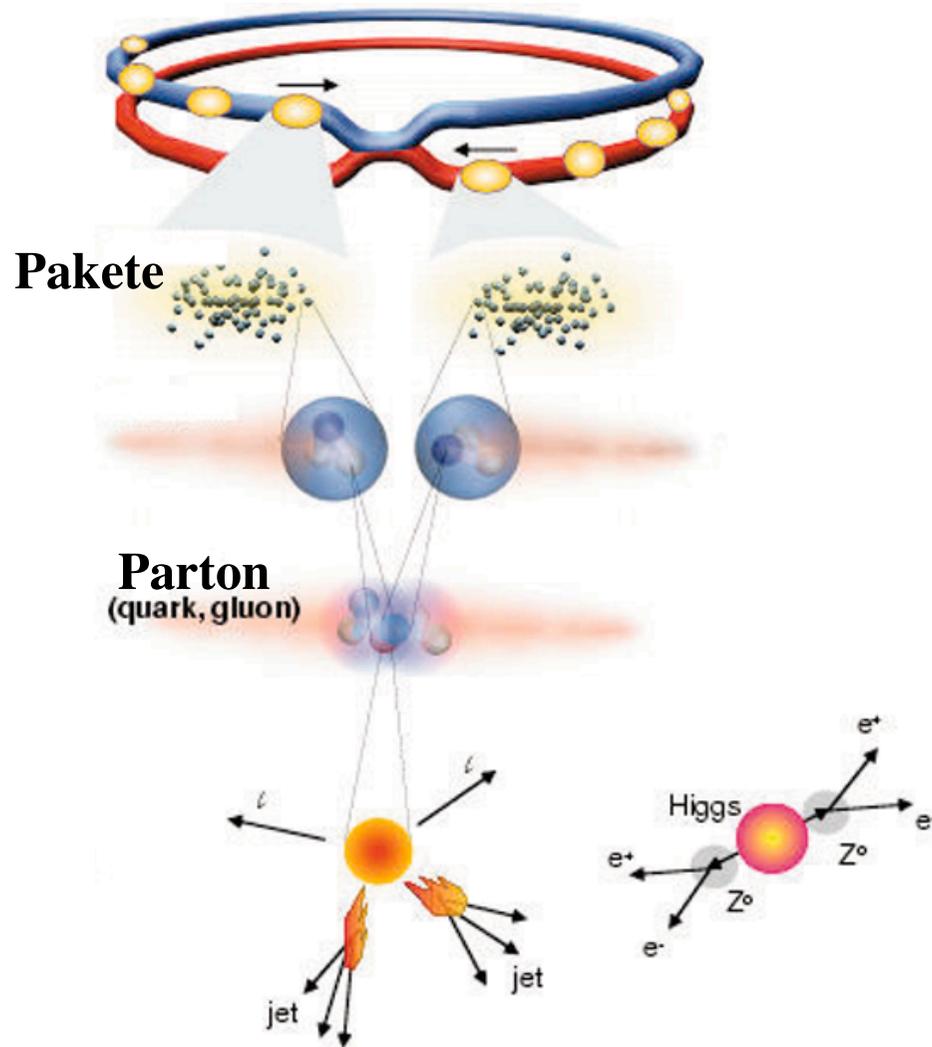


# LHC und die Experimente





# Parameter des Large Hadron Collider



**Umfang: 27 km**

**Proton - Proton**

**Teilchenpakete: 2 x 2808 (3564)**

**Protonen / Paket: 1.15 x 10<sup>11</sup>**

**Strahlenergie: 2 x 7 TeV**

**Luminosität: 10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>**

**Strahlkreuzungsintervall: 25 ns**

**Kollisionsrate: bis zu 10<sup>9</sup> pro Sekunde**

**Flußdichte der Dipolmagnete: 8.33 T**

**Anzahl der Dipolmagnete: 1232**

**Schwerionen (Pb-Pb)**

**Strahlenergie:**

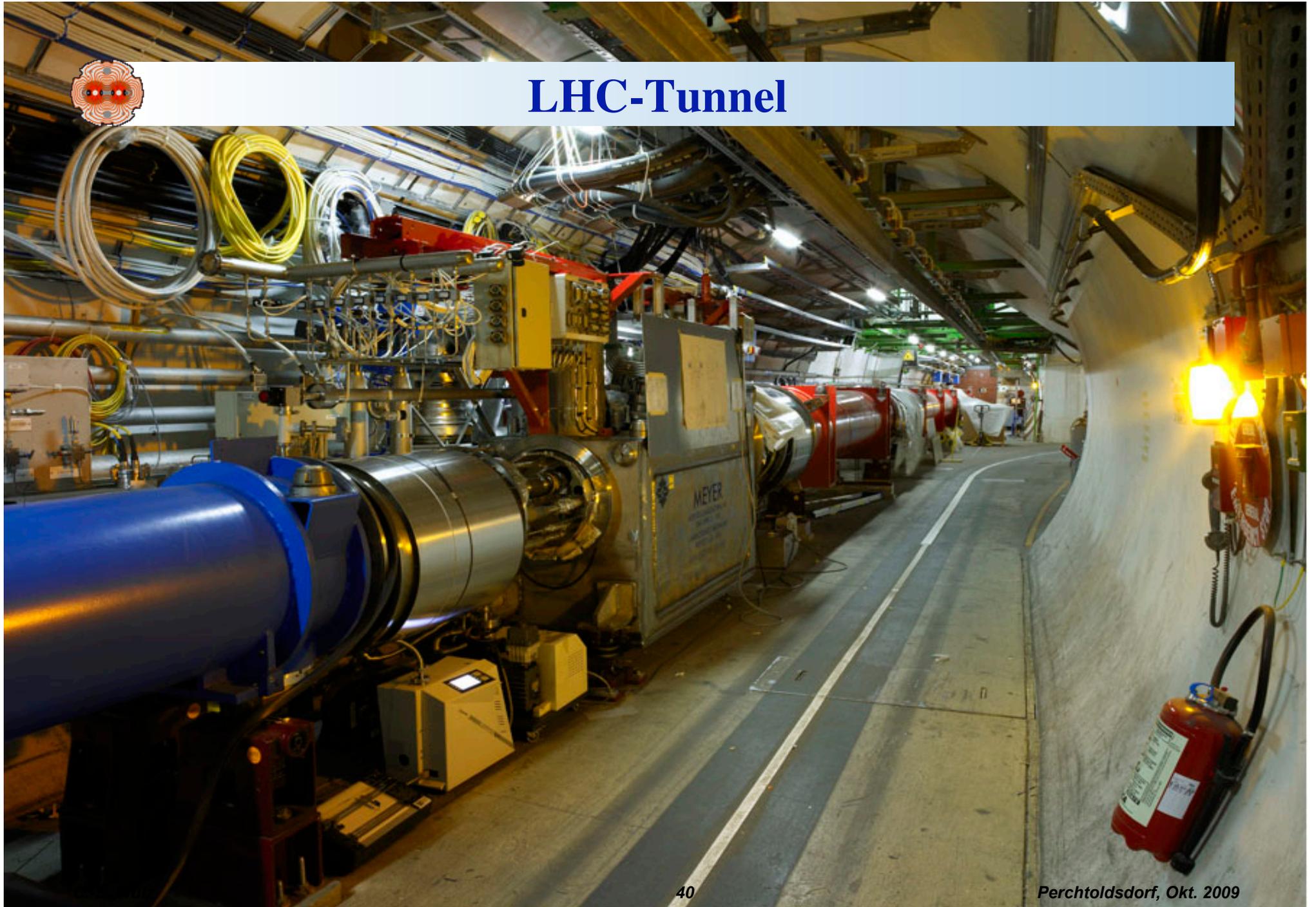
**5.5 TeV/Nukleonenpaar**

**Luminosität: 10<sup>27</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>**

**Strahlkreuzungsintervall: 125 ns**

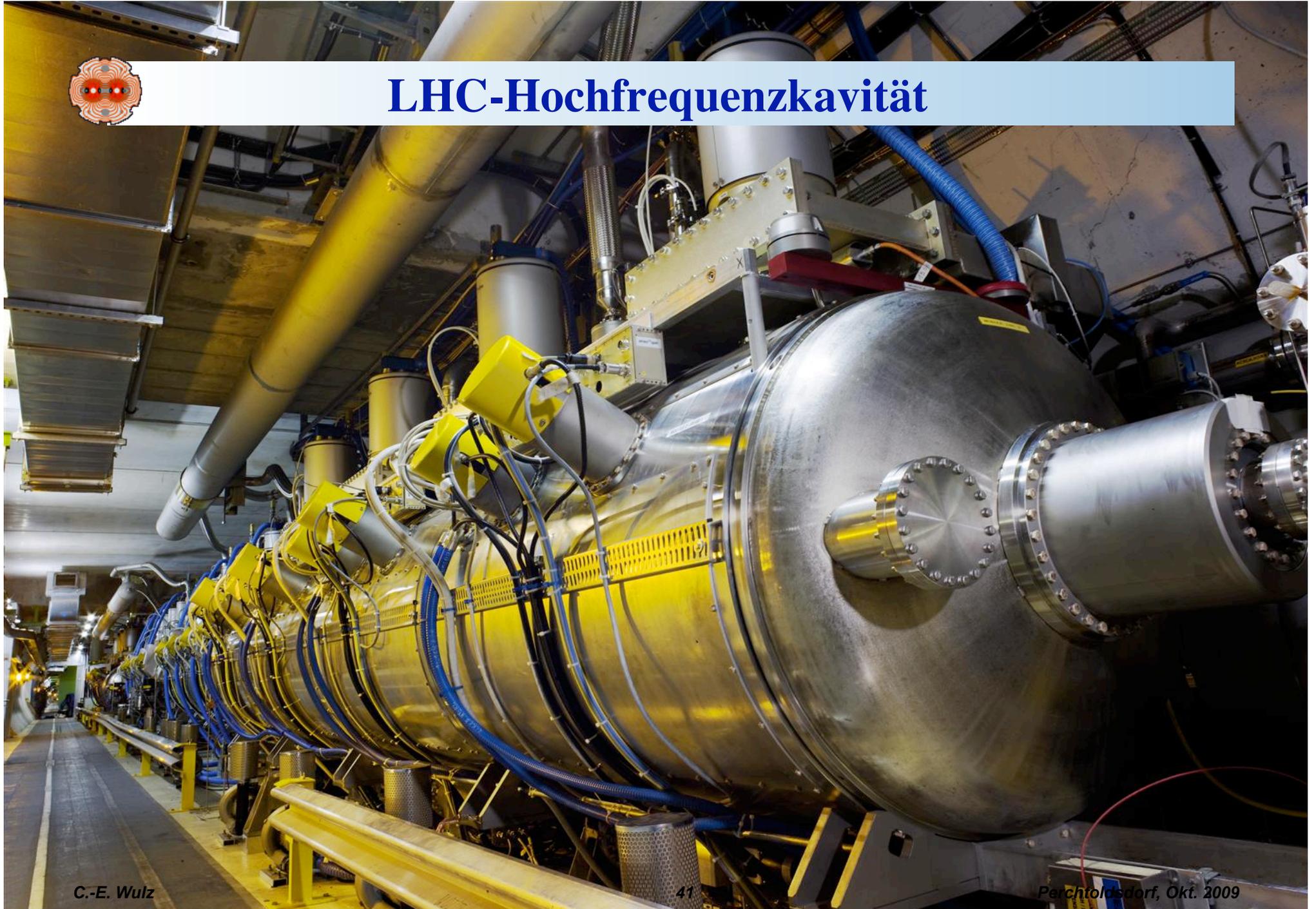


# LHC-Tunnel



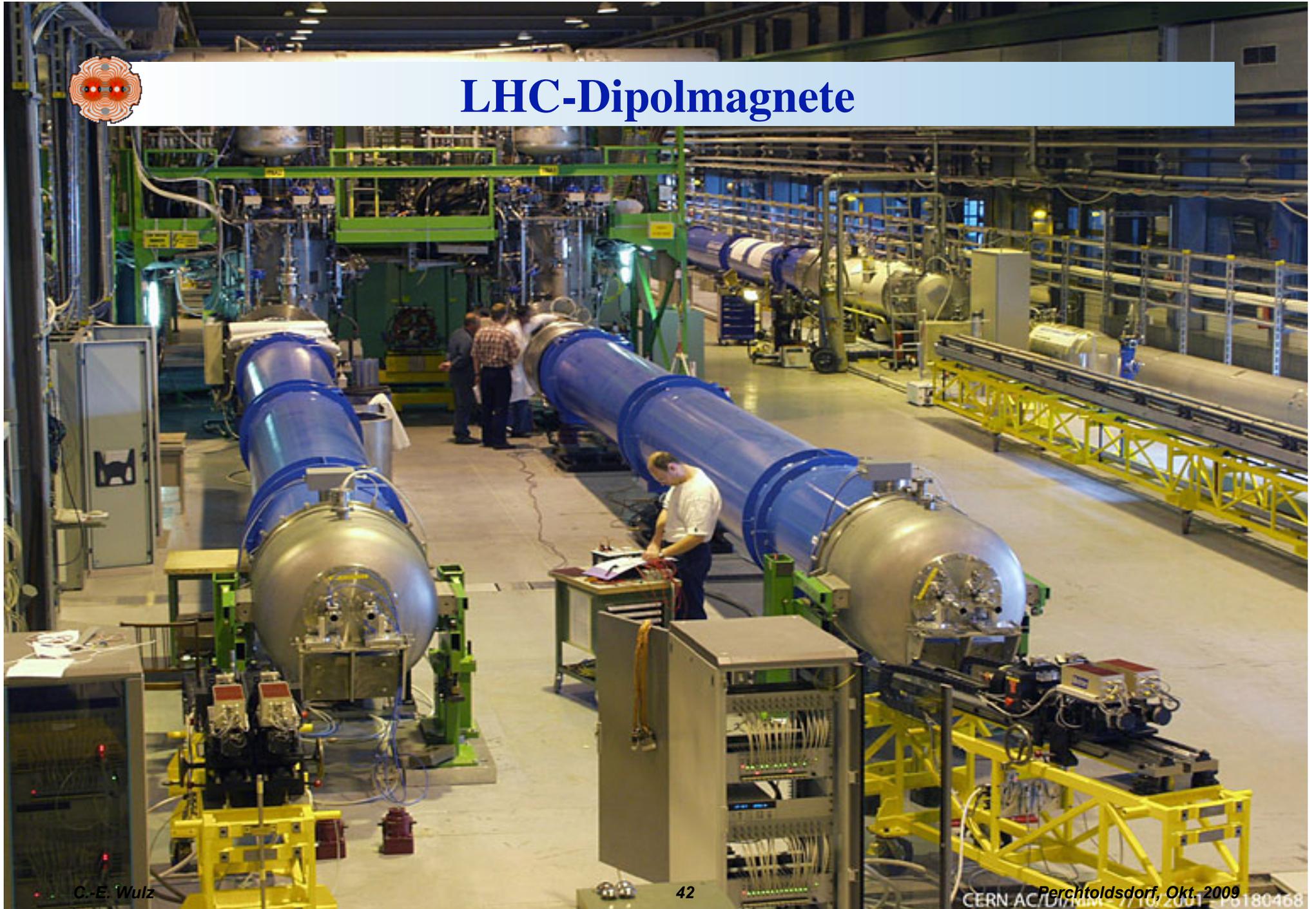


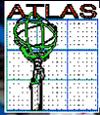
# LHC-Hochfrequenzkavität



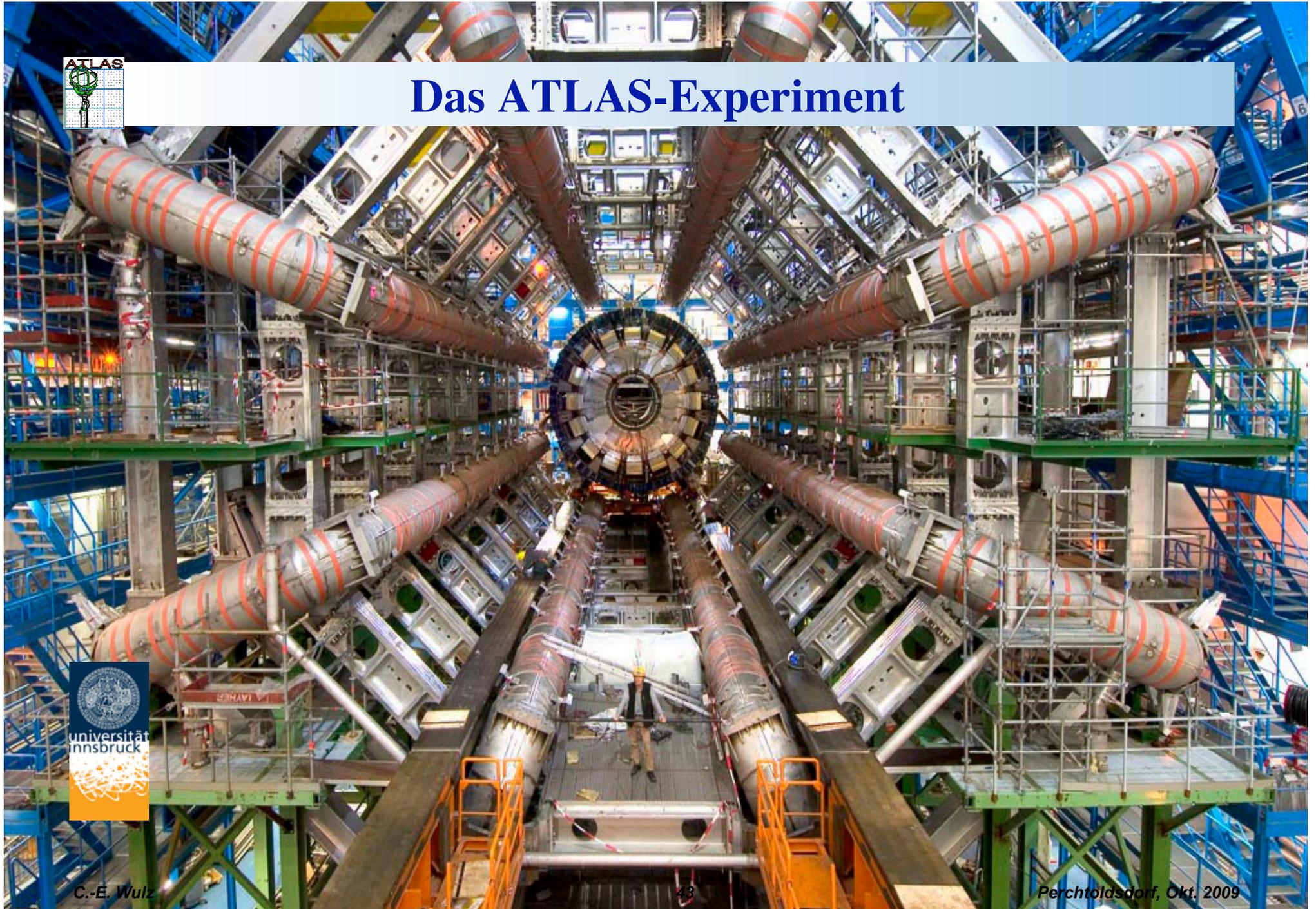


# LHC-Dipolmagnete



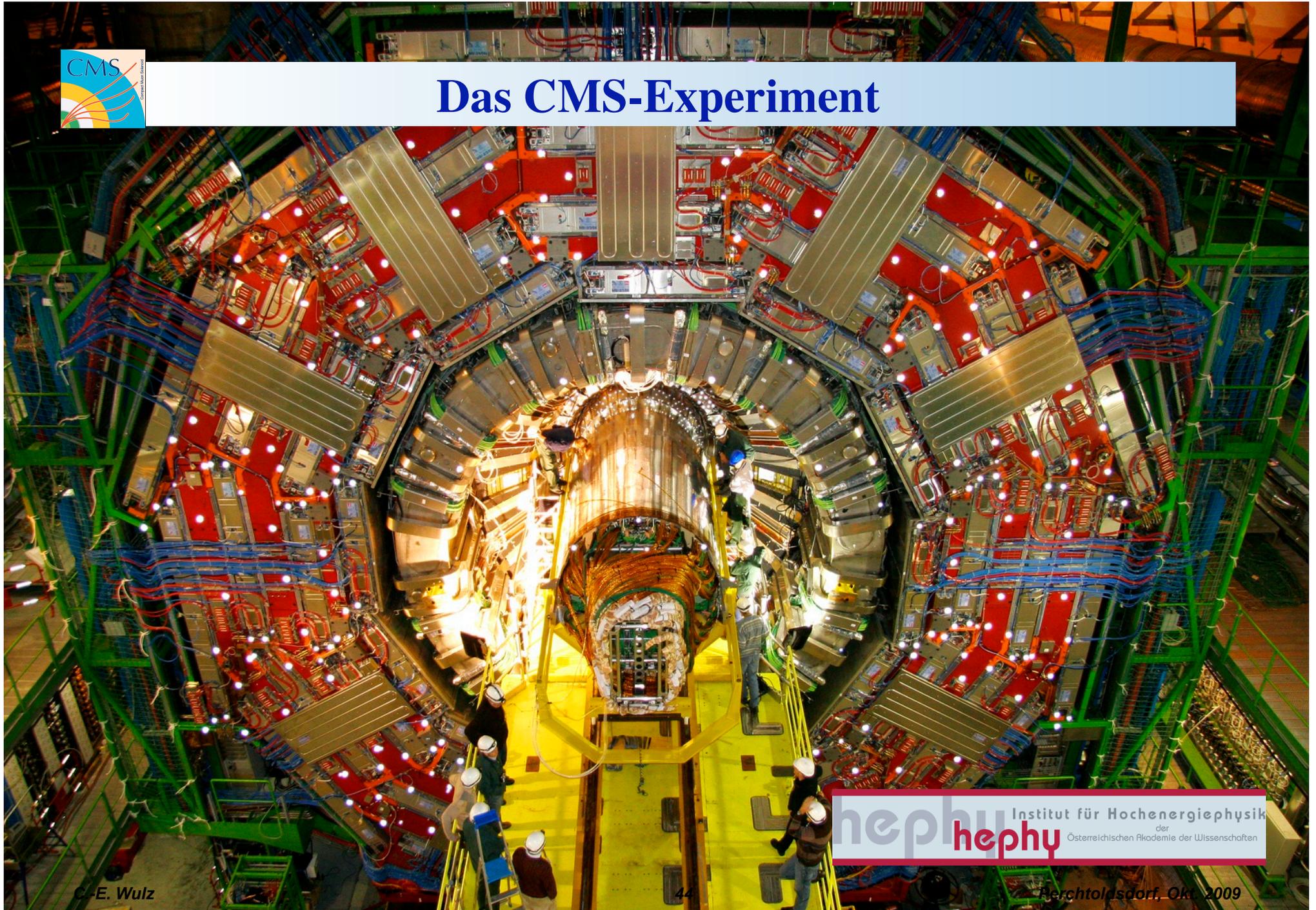


# Das ATLAS-Experiment





# Das CMS-Experiment



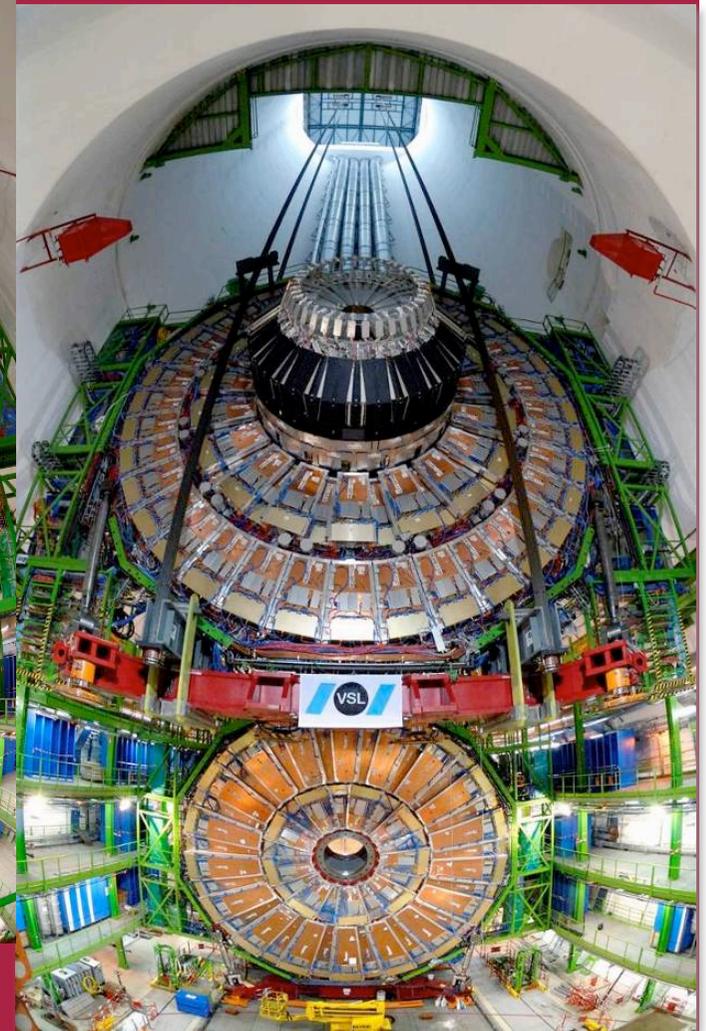
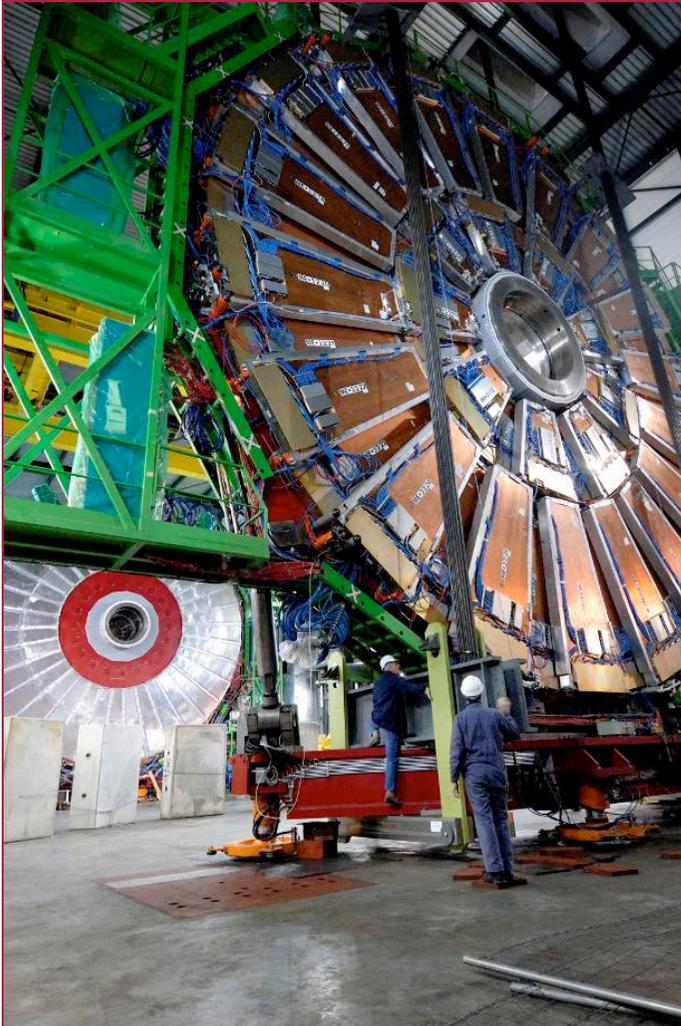


# Installation des Zentralelements von CMS



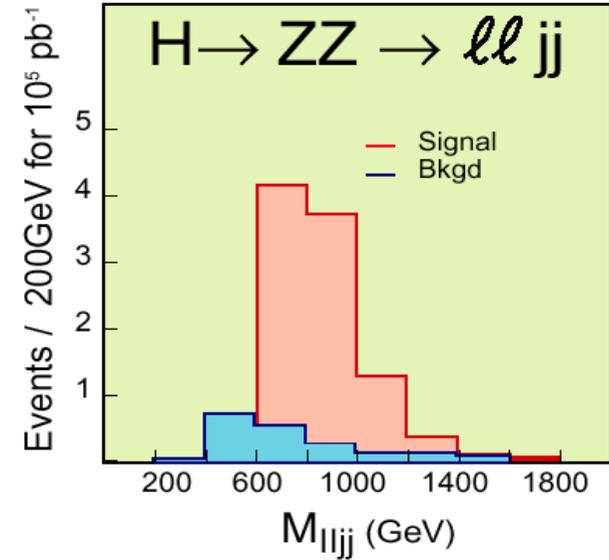
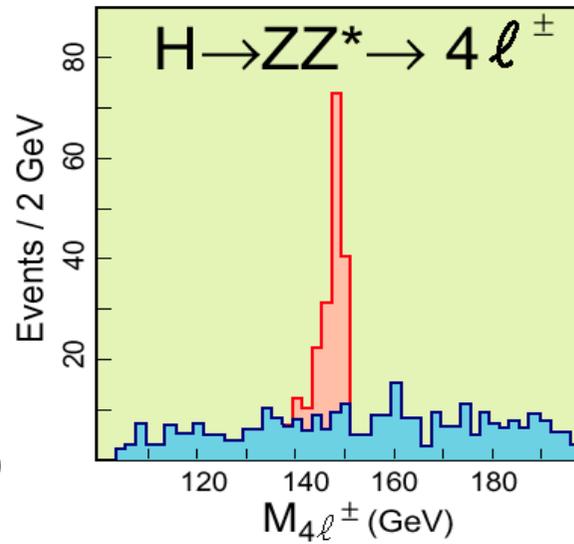
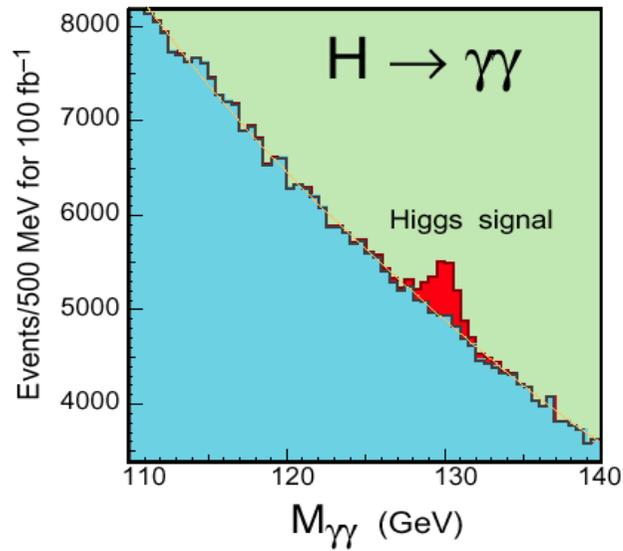
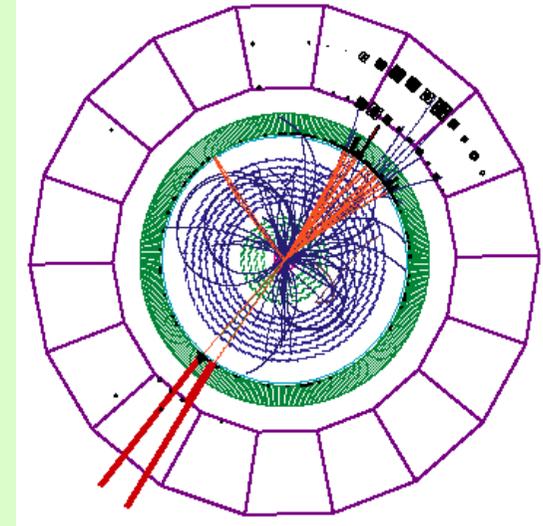
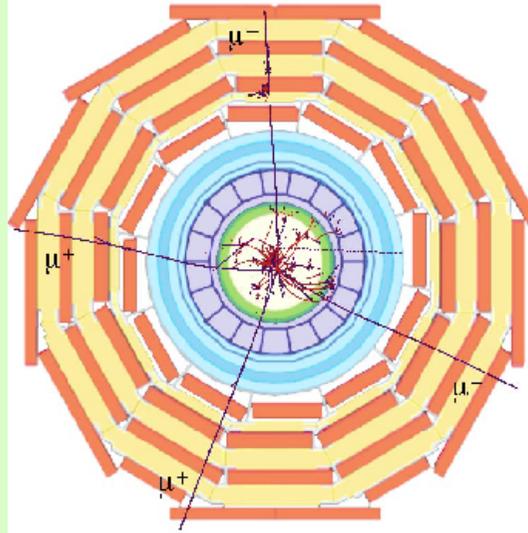
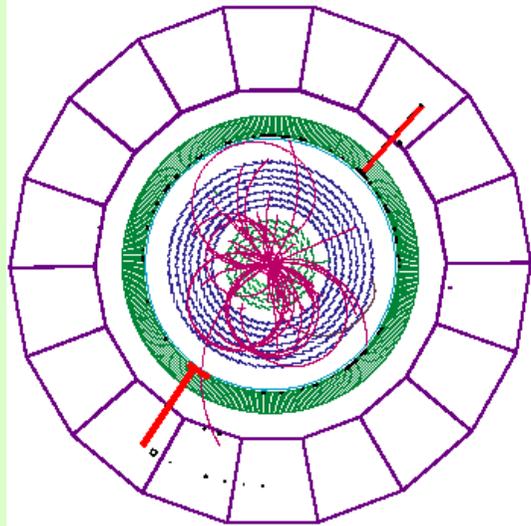


# Installation der CMS-Endkappen



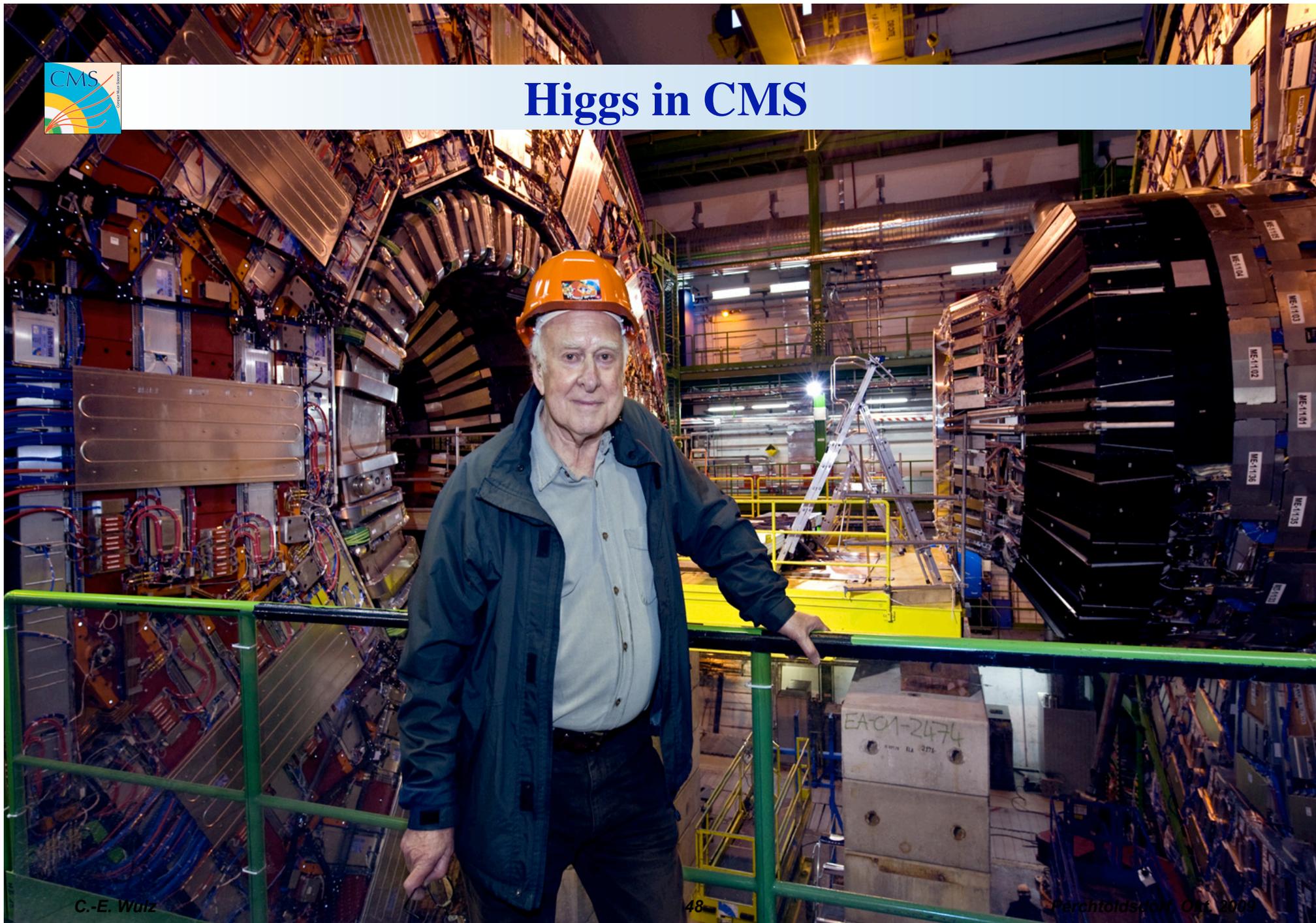


# Higgs bei CMS





# Higgs in CMS





**Quarks, Leptonen, Vermittlerteilchen, Higgs ... reichen für die Erklärung des Kosmos aber nicht aus ...!**

## Dunkle Materie

- Ein Vergleich der **Rotationsgeschwindigkeiten** von Sternen nahe dem Zentrum von Spiralgalaxien und weiter außen liegenden Sternen ergibt, daß die Geschwindigkeiten weiter außen nicht so abfallen, wie dies aus den Gesetzen der Mechanik folgen müßte.
- Auch müßten aufgrund der hohen **Temperatur** viele Sterne auseinanderfallen, wenn nicht zusätzlich zur sichtbaren Masse noch Masse aus dunkler Materie vorhanden wäre.
- Weitere Evidenz für Dunkle Materie kommt von **Gravitationslinseneffekten**.

# Vater und Mutter der dunklen Materie



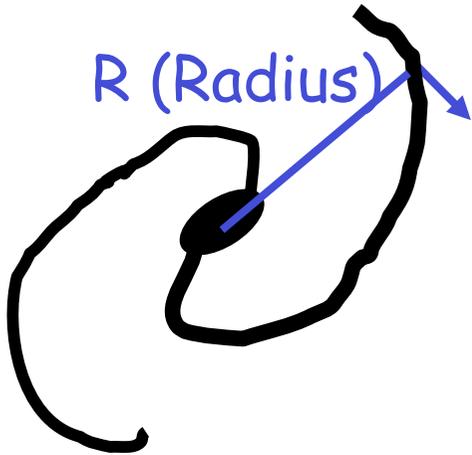
Fritz Zwicky untersuchte 1933 zwei benachbarte Galaxienhaufen, Coma und Virgo. Die Geschwindigkeiten der einzelnen Galaxien, die zu den jeweiligen Haufen gehören, waren 10 bis 100 mal höher als erwartet. Je mehr Masse im Galaxienhaufen ist, desto größer sind die Kräfte, die auf jede Einzelgalaxie wirken und desto größer ist ihre Geschwindigkeit.

Vera Rubin fand 1975, dass die Geschwindigkeiten von Wasserstoffgaswolken nicht mit abnehmender Entfernung vom galaktischen Zentrum abnehmen, sondern dass sie entweder gleich blieben oder leicht zunehmen. Sie zeigte, dass dunkle Materie kein auf die Coma- und Virgocluster beschränktes Phänomen ist.



# Galaxienrotation

$v$  (Geschwindigkeit)

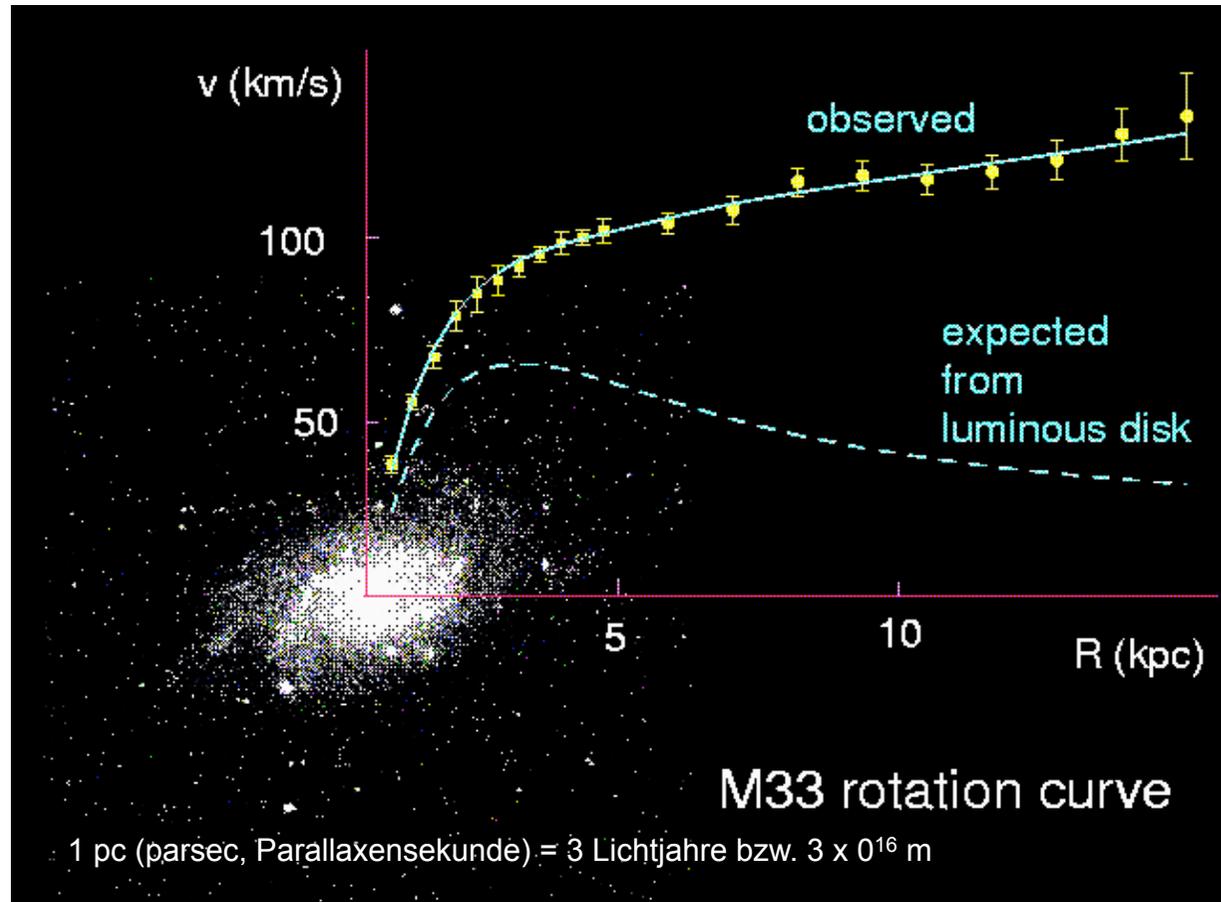


Gravitation:

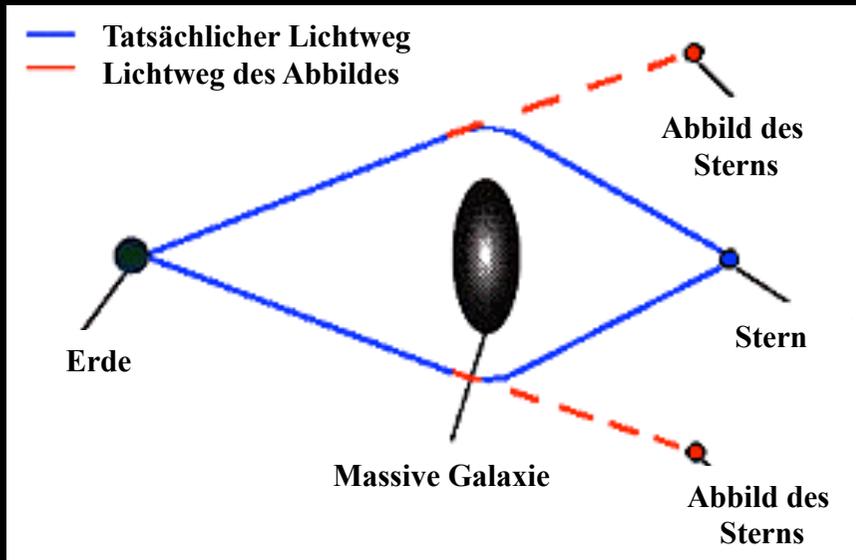
$$G M(r) / R^2 = v^2 / R$$

$$G = 6.7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

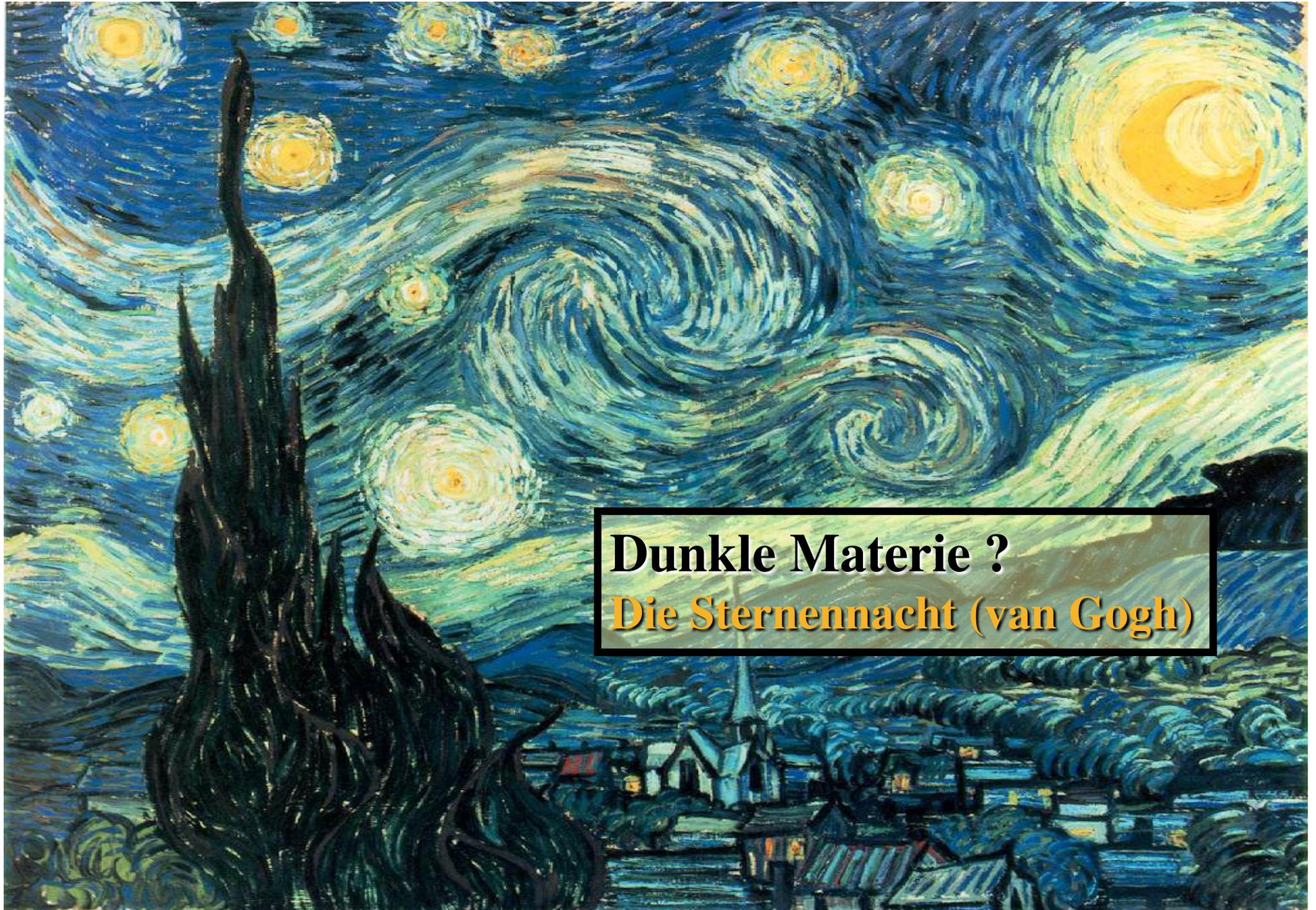
Eingeschlossene Masse:  $M(r) = v^2 R / G$



# Gravitationslinsen



Hubble Space Telescope

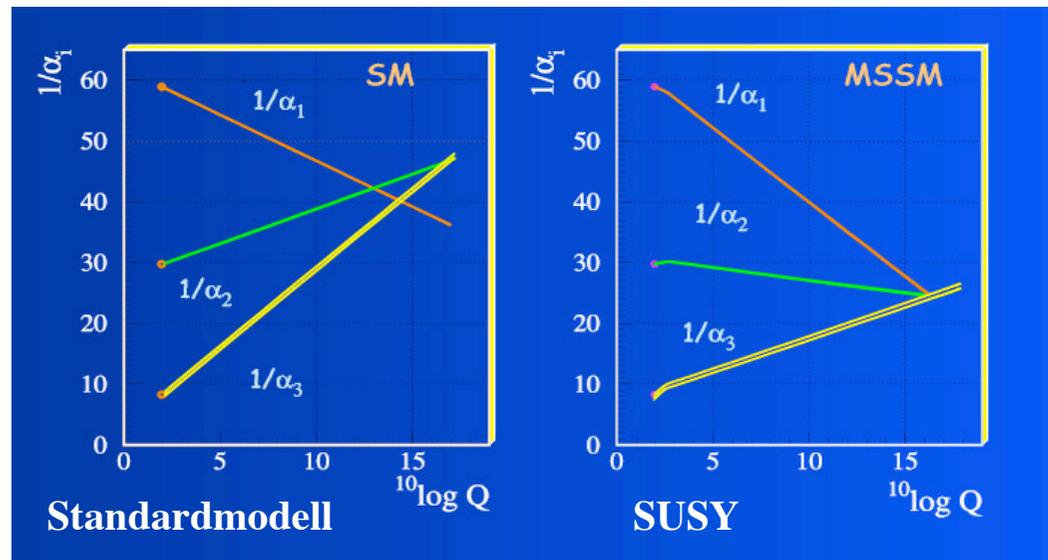
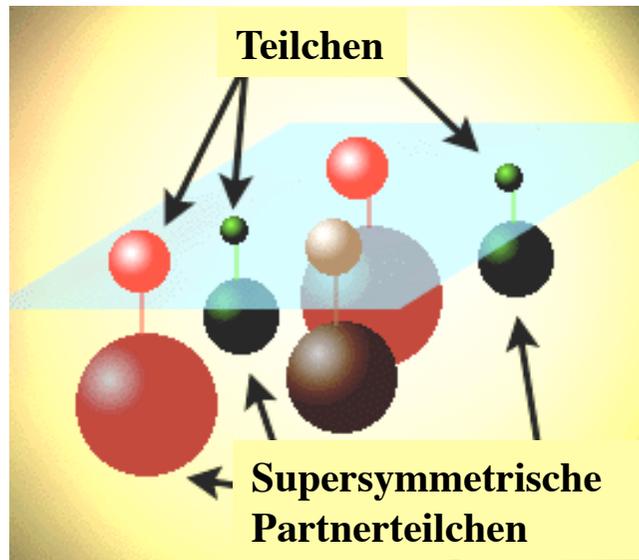


**Dunkle Materie ?**  
**Die Sternennacht (van Gogh)**



# Supersymmetrie

Zu jedem Standardmodell-Teilchen gibt es einen supersymmetrischen Partner.



SUSY hat zwei bestechende Eigenschaften:

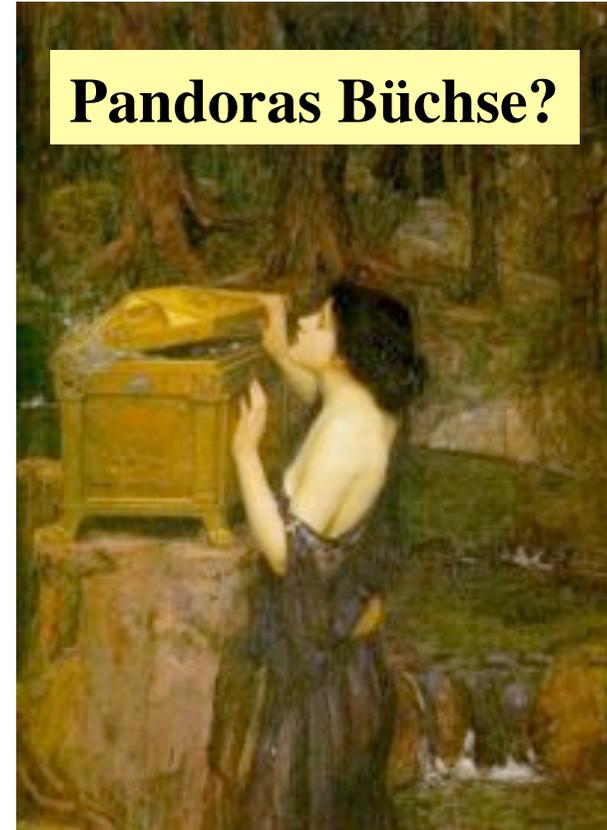
- Es gibt einen natürlichen Kandidaten für **dunkle Materie**, das **leichteste Neutralino** ( $\chi_1^0$ ).
- Die Wechselwirkungen können bei hohen Energien **vereint** werden, d.h. die Stärken ( $\alpha$ ) werden gleich.



# Das supersymmetrische Teilchenspektrum

Standard-Modell	Supersymmetrie
$\gamma, Z^0, h^0, H^0$	$\tilde{\chi}^0_1, \tilde{\chi}^0_2, \tilde{\chi}^0_3, \tilde{\chi}^0_4$
$W^+, H^+$	$\tilde{\chi}^+_1, \tilde{\chi}^+_2$
$e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \nu_\tau$	$\tilde{e}^-, \tilde{\nu}_e, \tilde{\mu}^-, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$
$\tau^-$	$\tilde{\tau}^-, \tilde{\nu}_\tau$
$u, d, s, c$	$\tilde{u}_R, \tilde{u}_L, \tilde{d}_R, \tilde{d}_L, \tilde{s}_R, \tilde{s}_L, \tilde{c}_R, \tilde{c}_L$
$b$	$\tilde{b}_1, \tilde{b}_2$
$t$	$\tilde{t}_1, \tilde{t}_2$

**Pandoras Büchse?**



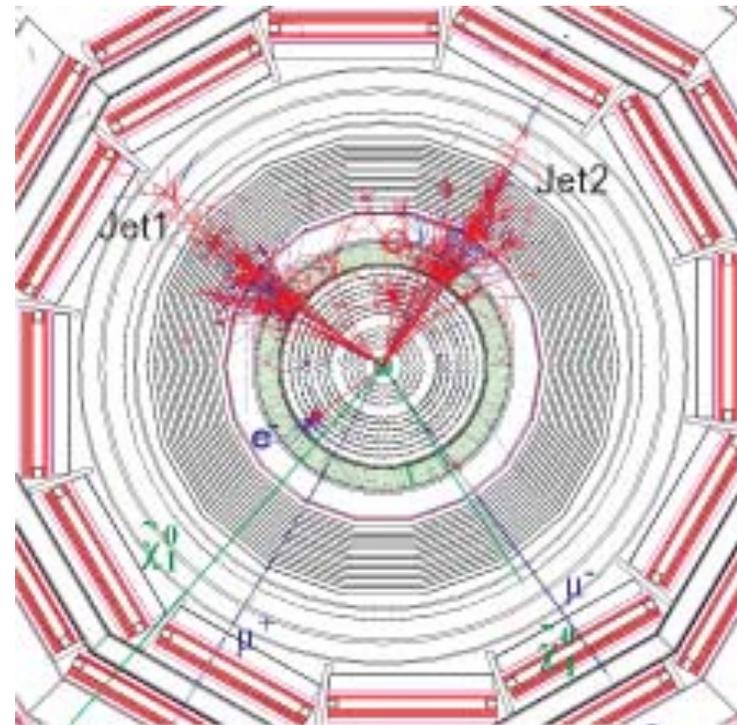
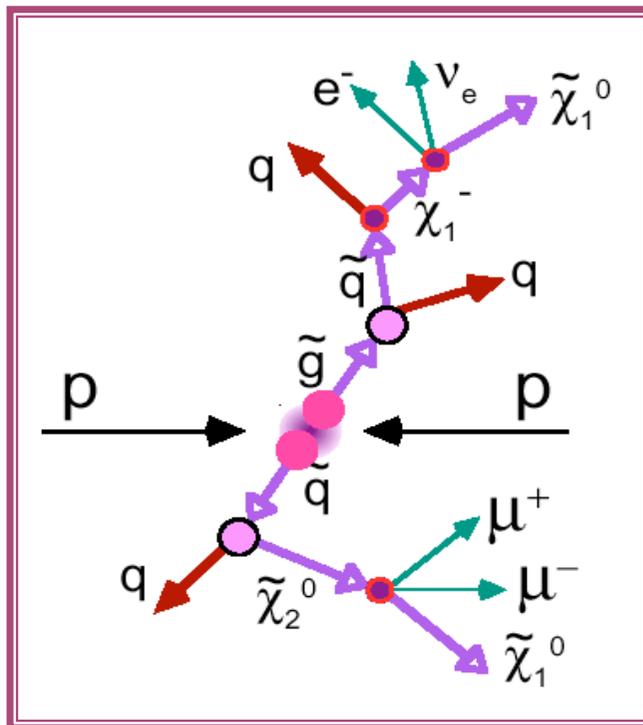
**Viele Teilchen, viele  
Zerfallskanäle:  
Arbeitsplatzgarantie  
für**

**Hochenergiephysiker!**



## Supersymmetrisches Ereignis am LHC

Supersymmetrische Teilchen können komplexe Signaturen durch Kaskadenzerfälle aufweisen, die zu Endzuständen mit Leptonen, Jets und fehlender Energie (zum Beispiel durch Neutralinos) führen.



## Zurück zum Urknall ...

### Wie ist das Universum entstanden? -> BIG BANG THEORIE



**Grundlage: Einsteins allgemeine Relativitätstheorie (1916). Georges Lemaître, ein belgischer Geistlicher, berechnete (wie auch Einstein, der aber sich selbst nicht glaubte ... -> kosmologische Konstante  $\Lambda$ , seine “größte Eselei”), dass das Universum sich ausdehnen muss (1927). Einstein glaubte an ein “steady state” Universum.**

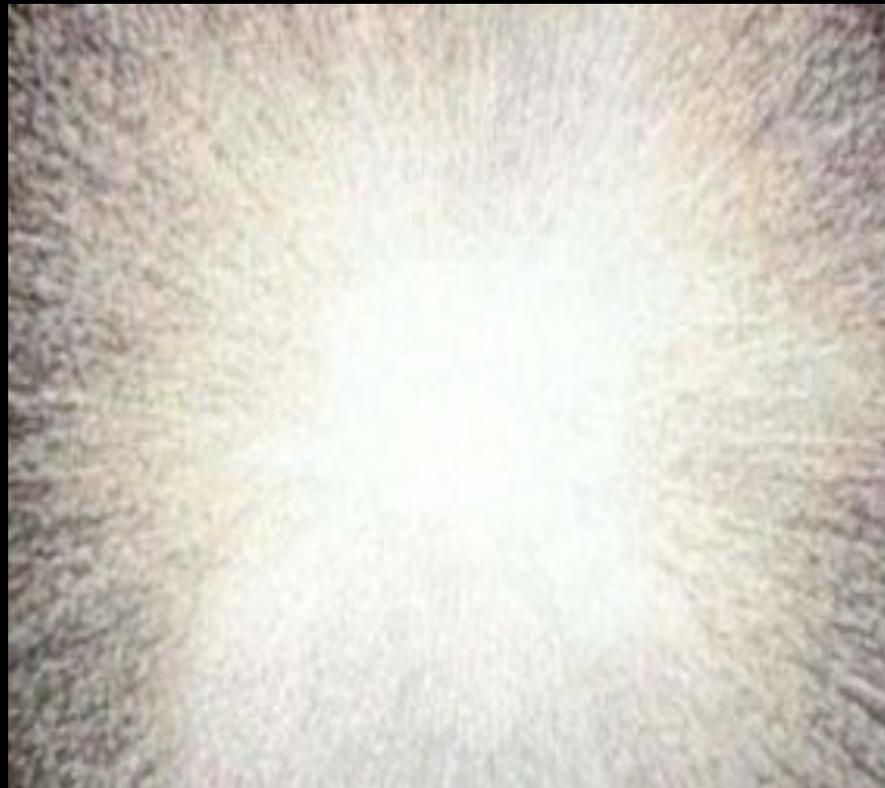
## Hinweise auf den Big Bang

**Expansion des Universums**

**Kosmische Hintergrundstrahlung - Temperatur**

**Verhältnis Wasserstoff/Helium**

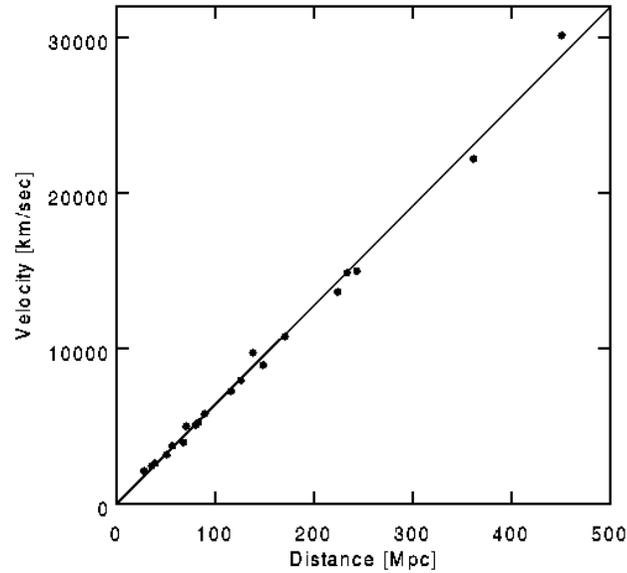
**Beim Big Bang: ~76% H, ~24% He, heute durch Kernfusion in  
Sternen ~73% H, ~26% He, schwerere Elemente ~1%**



# Expansion des Universums



Edwin Hubble  
(1929)

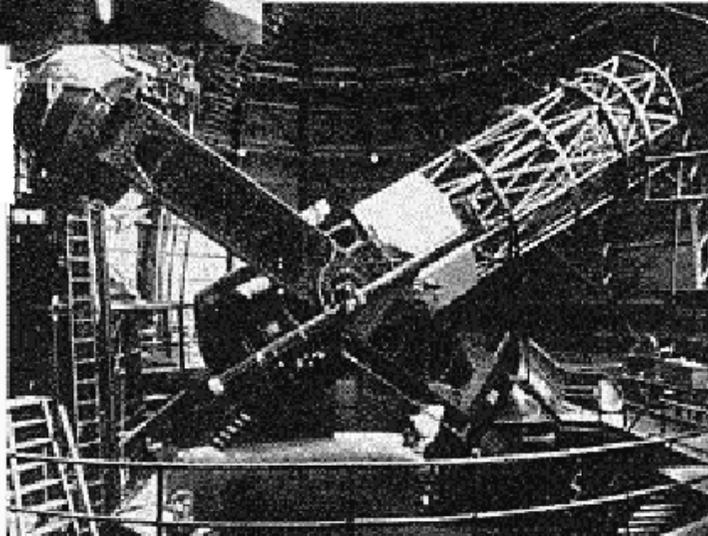


Geschwindigkeit einer Galaxie  
proportional zur Entfernung:

$$v = H D$$

$$H \sim 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

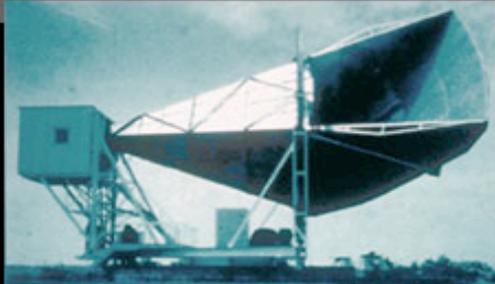
H ... Hubblekonstante



Mt. Wilson  
Teleskop

# Kosmische Hintergrundstrahlung

1965



Penzias and  
Wilson

1965: Penzias, Wilson (Nobelpreis 1978)

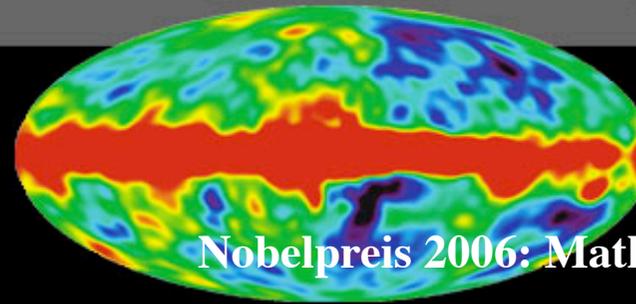


1992

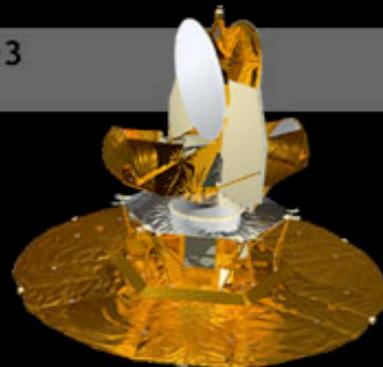


COBE

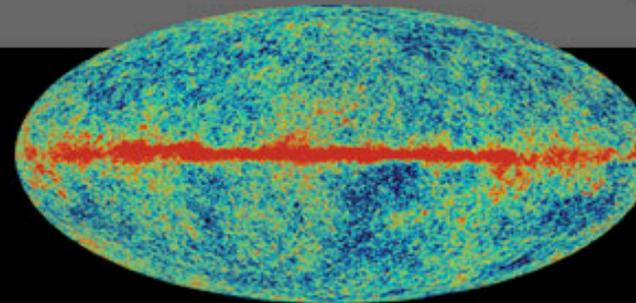
Nobelpreis 2006: Mather, Smoot



2003

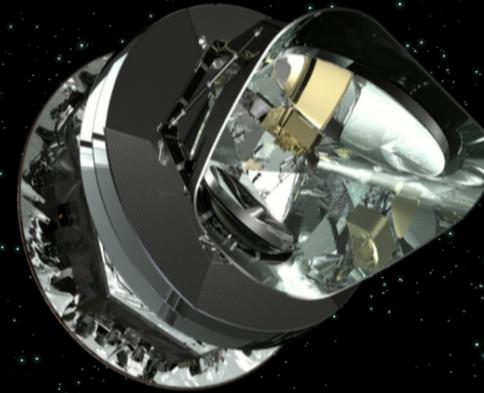


WMAP

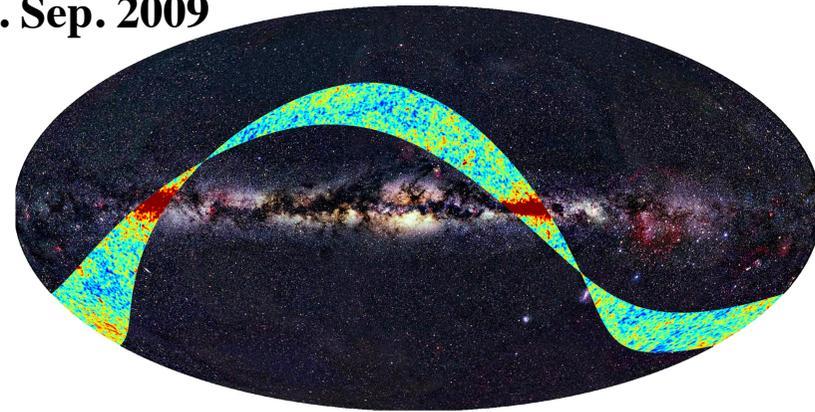


# Planck-Satellit

14. Mai 2009  
Planck, Herschel

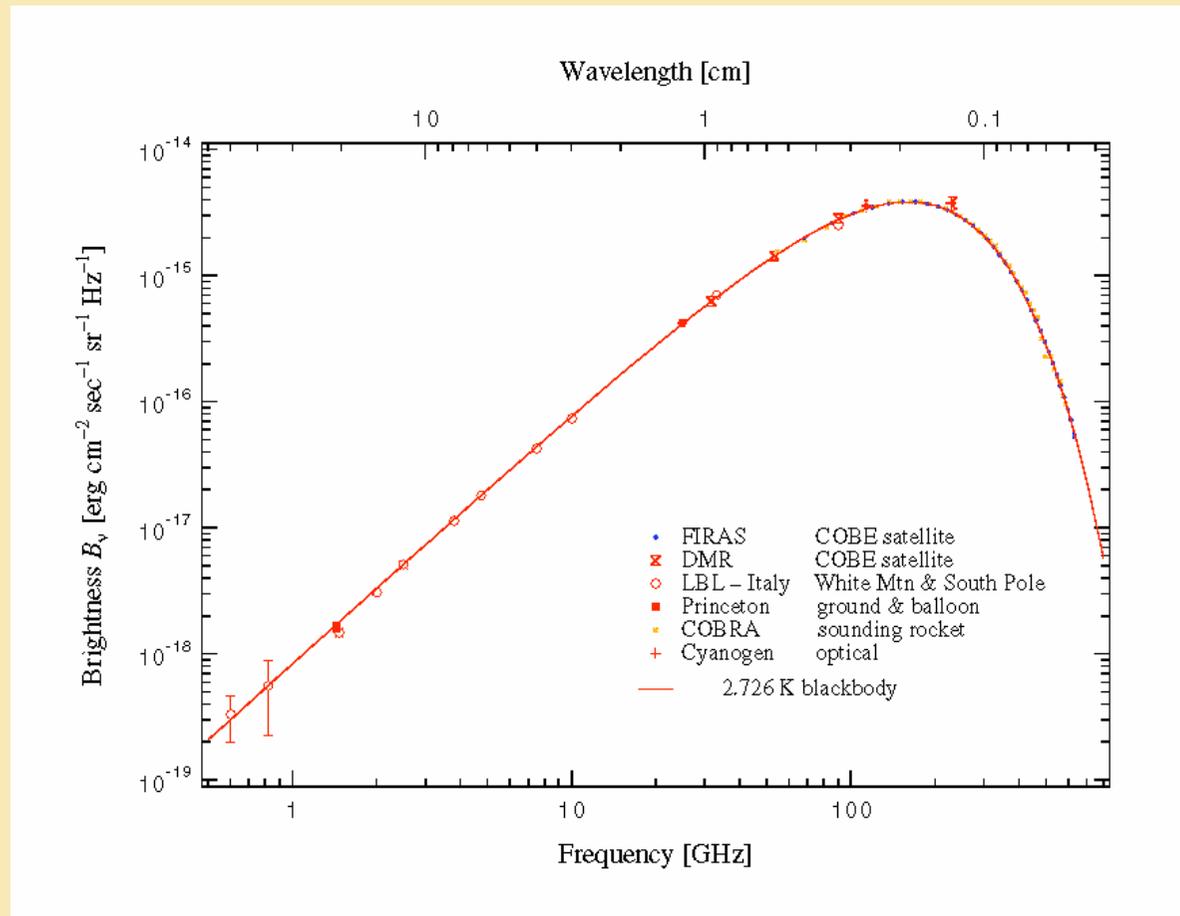


17. Sep. 2009



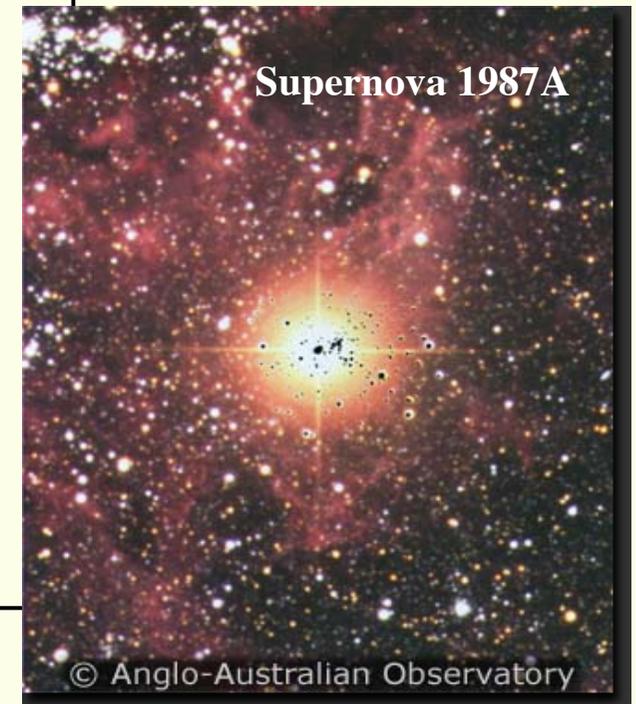
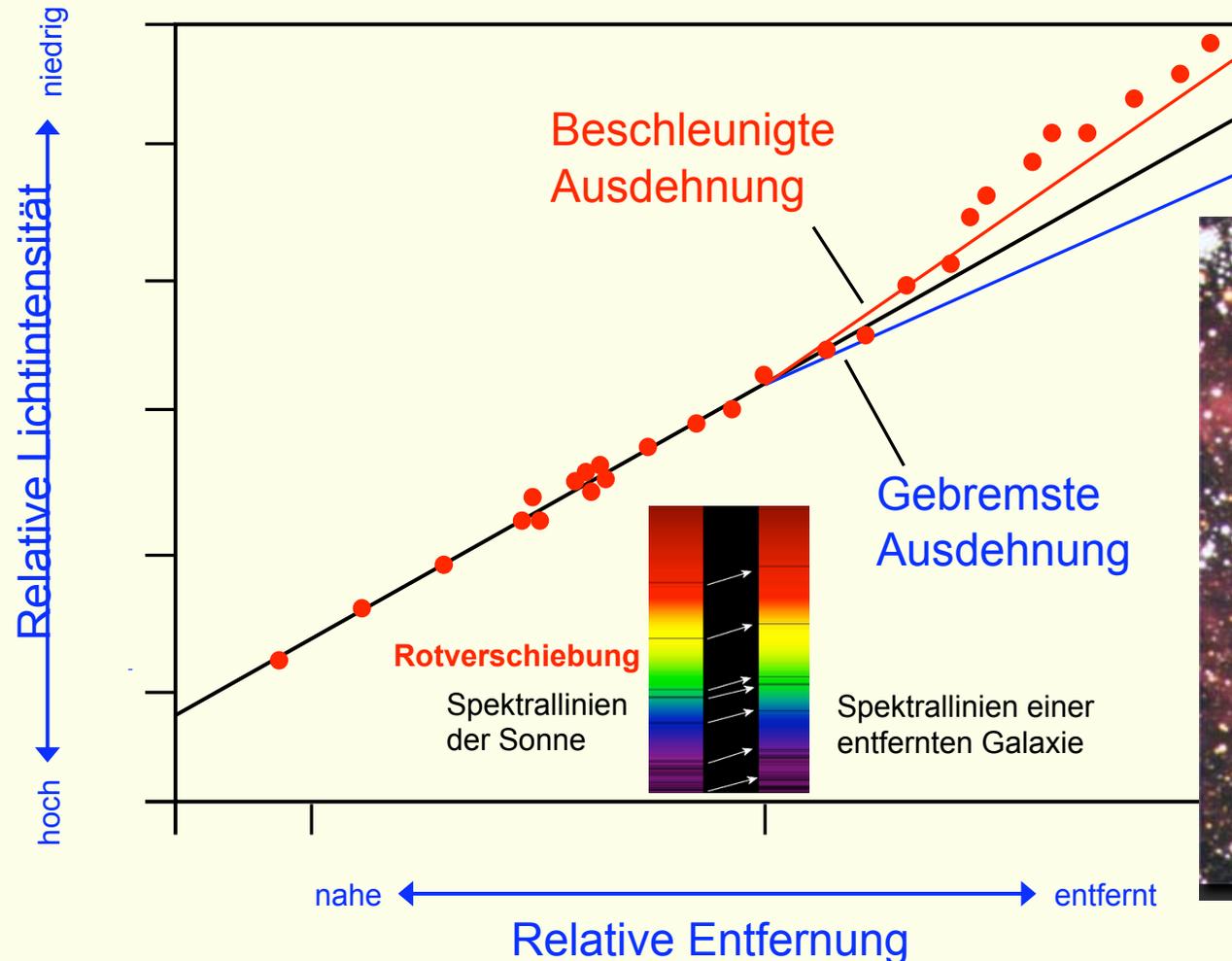
# Kosmische Hintergrundstrahlung

**Schwarzer Strahler: emittiert Photonen, wenn er genügend heiß ist.**



**Temperatur des Universums: 2.726 K**

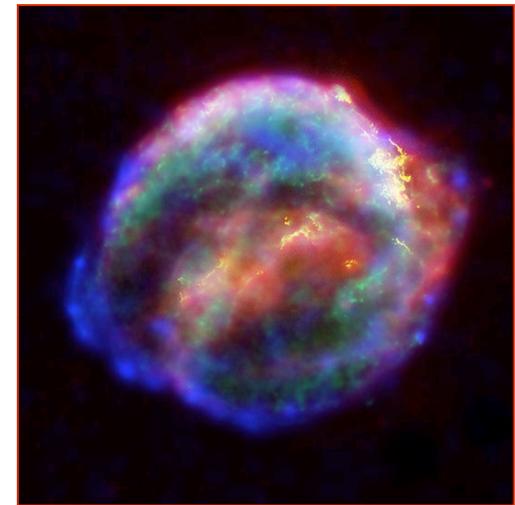
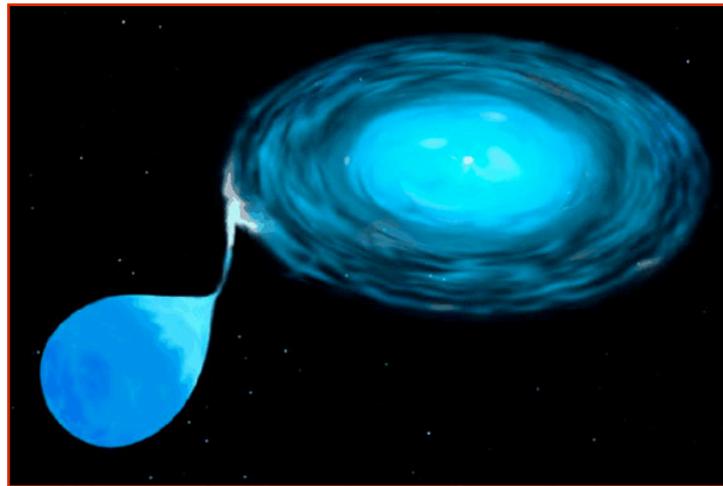
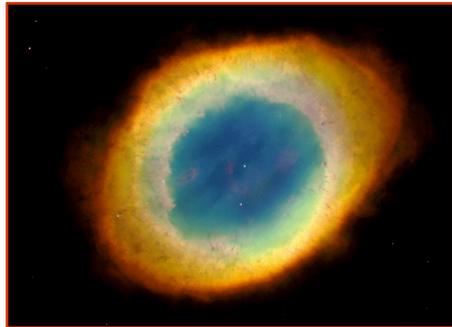
# 1998-Revolution



**Beobachtungen von Supernovae ergaben, daß eine mysteriöse Kraft - dunkle Energie - das Universum immer schneller auseinander treibt!**

## Supernovae - Standardkerzen

Supernovae Ia sind weiße Zwerge (nuklearer Brennstoff ist verbraucht, Zentrum verdichtet sich). Wenn ein weißer Zwerg sich in der Nähe eines benachbarten Sterns befindet, zieht er dessen Masse an. Wenn die Gesamtmasse die Chandrasekhar-Masse ( $\sim 1.4 M_{\odot}$ ) erreicht, kollabiert er via Supernova-Explosion in einen Neutronenstern.

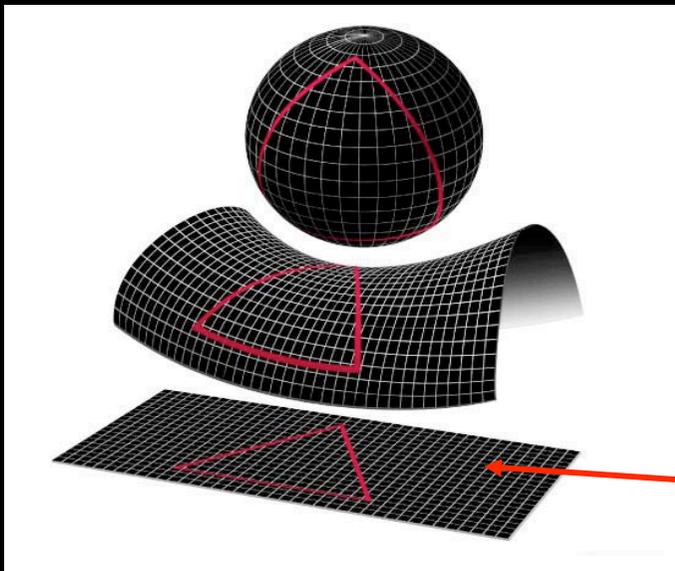


⇒ Die Masse ist definiert, somit auch die Helligkeit  
Supernovae Ia dienen als Standardkerzen zur Messung der  
Expansion des Universums

# Dunkle Energie

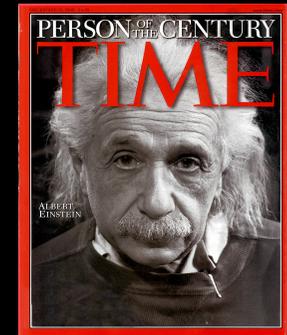
Aus den Supernovae-Messungen und neuerdings aus Satellitenexperimenten ( WMAP - NASA Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, Planck - ESA, ab 2009) und terrestrischen Experimenten (SDSS, Sloan Digital Sky Survey) geht hervor:

**Bekannte Materie: ~ 4%**  
**Dunkle Materie: ~ 23%**  
**Dunkle Energie: ~ 73%**



Das **Universum** ist **flach**!

d.h. Licht, das nicht durch Gravitation abgelenkt wird, breitet sich geradlinig aus. Einstein vermutete, daß es sich auf gekrümmten Bahnen bewegen müßte.

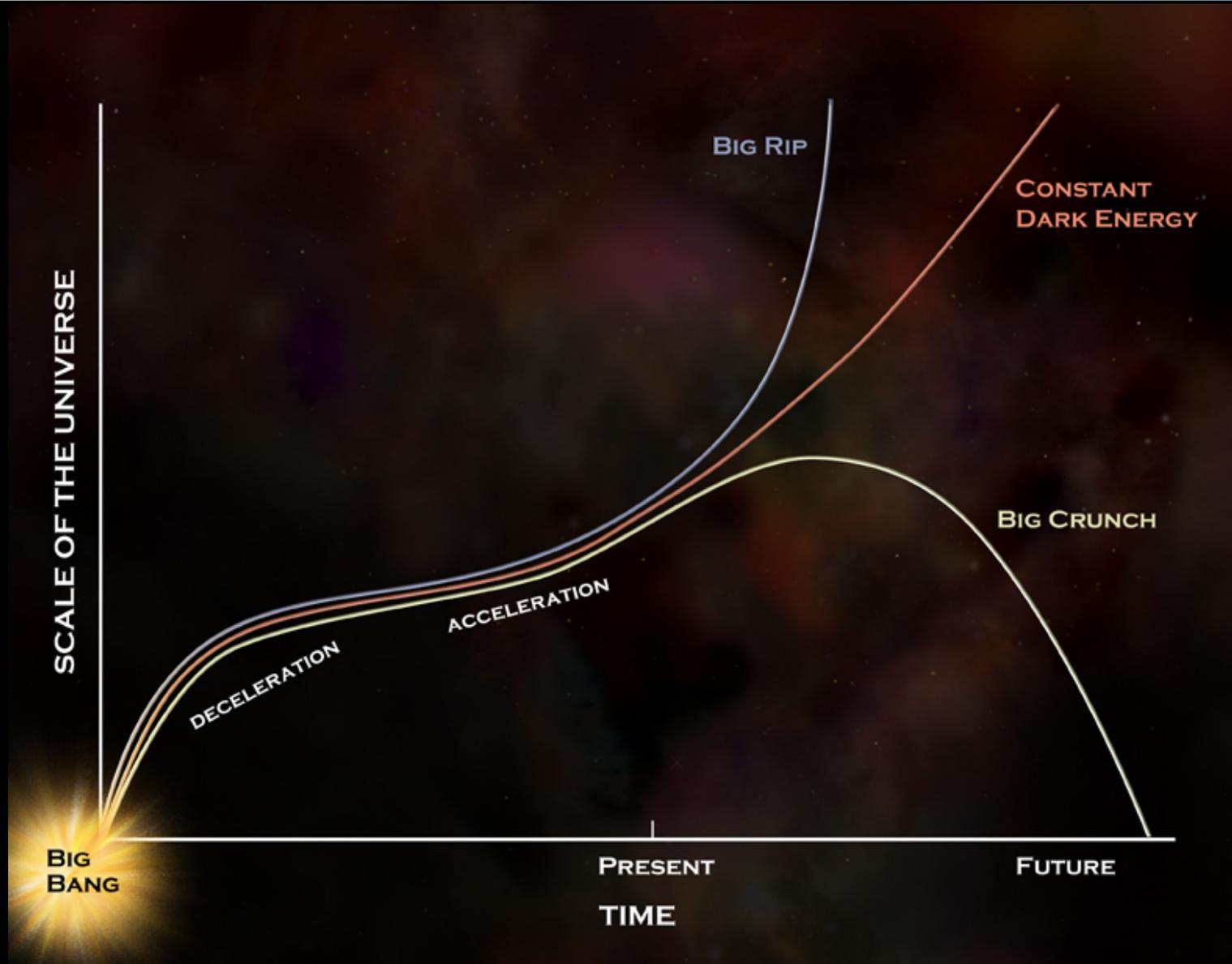


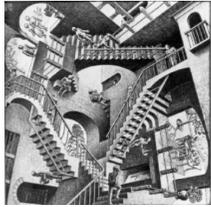
$$\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_k$$
$$\Omega_k = 0$$

$\Omega_M$  ... relative Dichte der bekannten und der dunklen Materie

$\Omega_\Lambda$  ... relative Dichte der dunklen Energie

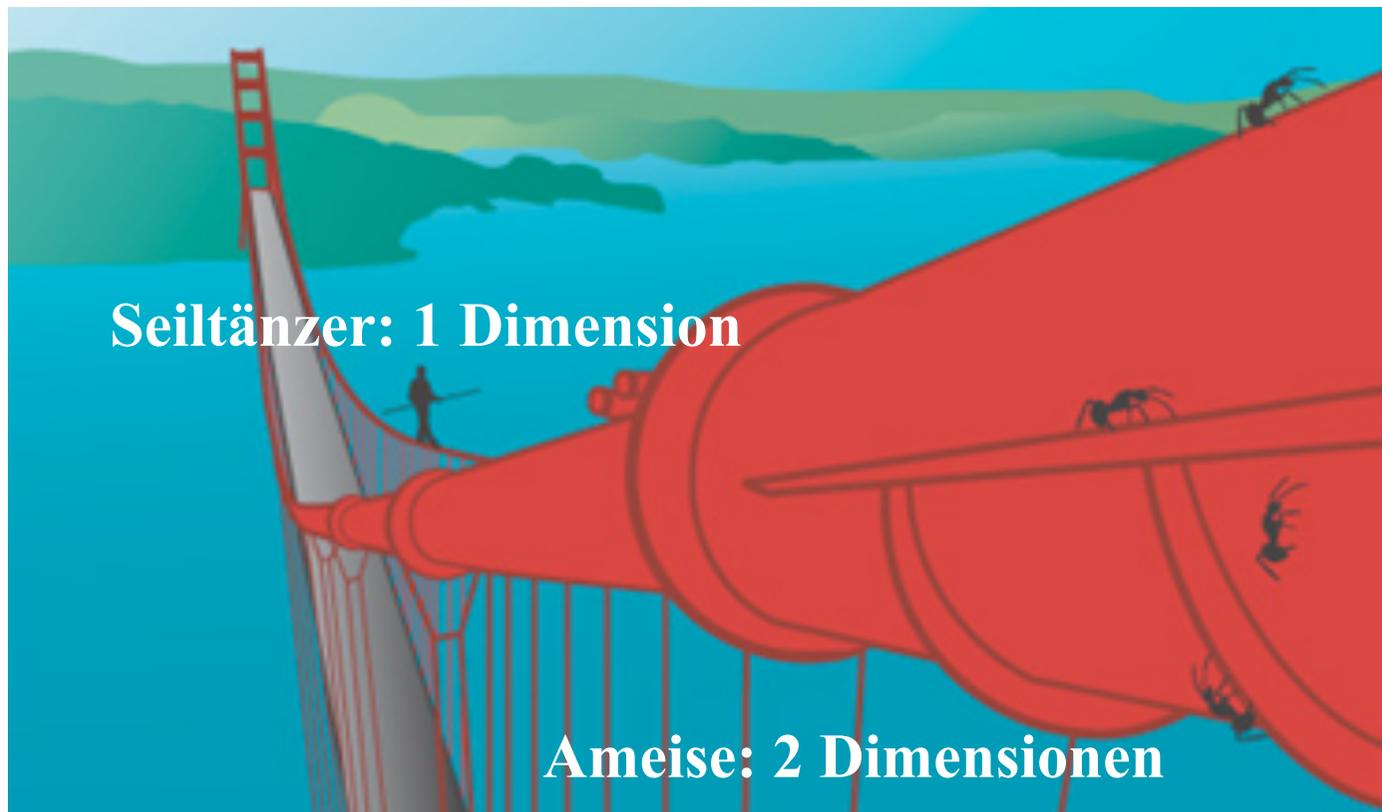
# Entwicklung des Universums





## Zusätzliche Dimensionen

**Unser bekanntes Universum: 3 Raumdimensionen + 1 Zeitdimension**  
**Stringtheorie: mindestens 9 + 1 Dimensionen**



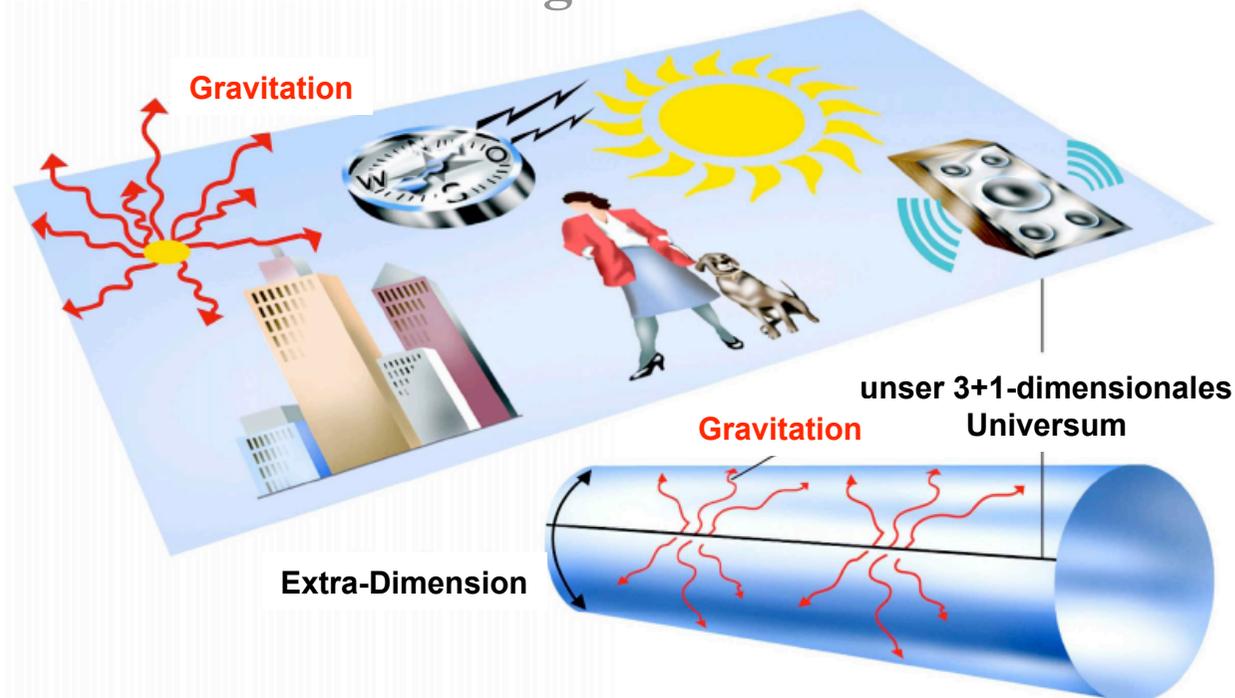
**2. Dimension: aufgerollt**

# Gravitation und Extra-Dimensionen

Gravitation scheint  $10^{-38}$  mal so schwach im Vergleich zur starken Wechselwirkung -> schwer vereinbar mit anderen Kräften!

Mögliches Modell:

- Bekannte Teilchen leben im 3+1-dimensionalen Universum (Brane)
- **Gravitation lebt in einem höherdimensionalen Universum (Bulk)**
- Extra-Dimensionen sind aufgerollt mit Radius R

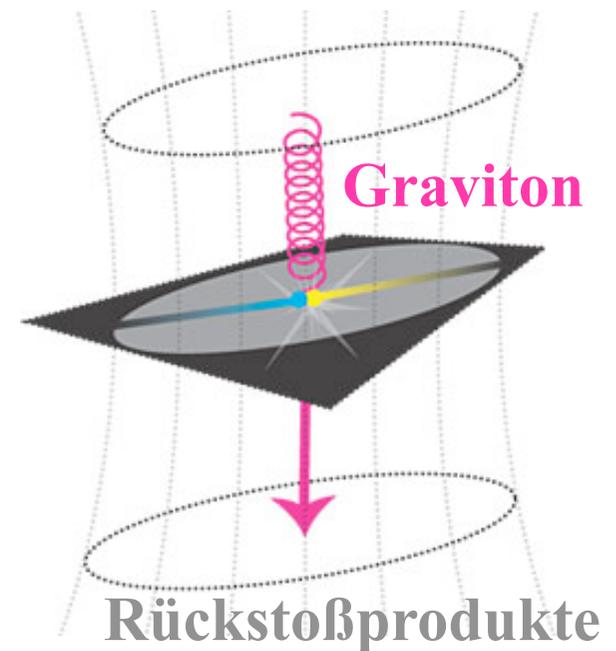


## Graviton-Suche am LHC

Gravitonen, die vermutlich die Gravitation zwischen Teilchen mit Masse vermitteln, können sich ungehindert auch in den Extra-Dimensionen ausbreiten.

Mit der Energie des LHC sollte es möglich sein, WW von Teilchen in unserer Brane bei Abständen von ca.  $10^{-15}$  m (Protondurchmesser) zu untersuchen. Diese Distanzen liegen vielleicht in der gleichen Größenordnung wie die Radien der aufgerollten Dimensionen.

Signal in den Detektoren: **fehlende Energie!**  
Diese kann aber auch von Neutrinos oder Neutralinos stammen, deshalb sind Modellberechnungen nötig.



## Schwarze Löcher

Wenn die Gravitation bei kleinen Distanzen groß wird, kann der LHC auch (Mini-) Schwarze Löcher ( $\text{\O} 10^{-18}\text{m}$ ) produzieren!

Sie sollten jedoch durch quantenmechanische Effekte sehr schnell ( $\sim 10^{-35}\text{s}$ ) verdampfen (Hawking-Strahlung), unter Erzeugung aller möglichen Standardmodellteilchen.

# Stephen Hawking in CMS



# CMS ist gerüstet!



# Fundamentale Fragen

- Woher kommen die **Massen** der bekannten Teilchen?
- (Wie) kann das **Standardmodell erweitert** werden?
- Gibt es mehr als **3 Generationen** von Quarks und Leptonen?
- Welche Rolle spielen massive **Neutrinos**?
- Wie kann man das **Confinement** verstehen?
- Was ist die **dunkle Materie** ?
- Was ist die **dunkle Energie** ?
- Können alle **Kräfte vereint** werden?
- Gibt es zu Raum und Zeit **zusätzliche Dimensionen**?
- Wie **entstand** das **Universum**?
- (Warum) ist das **Universum flach**?
- (Warum) ist die **Antimaterie** verschwunden?

## Letzte Frage

**Was tat Gott, bevor er das Universum erschuf?**

**Er bereitete die Hölle vor für Leute, die solche Fragen stellen!**

(Augustinus zugeschrieben)

## **Zusammenfassung**

In den letzten Jahrzehnten wurde das Verständnis der Physik entscheidend verbessert.

Jedoch .... viele Antworten auf fundamentale Fragen fehlen noch!

Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie müssen gemeinsam zu ihrer Beantwortung beitragen.

Der Large Hadron Collider wird ein wichtiges Werkzeug sein. Mit ihm sollen Bedingungen bis kurz nach dem Urknall reproduziert werden.

**WIR LEBEN IN INTERESSANTEN ZEITEN!**

## URL, Danksagung

### URL:

[www.hephy.oeaw.ac.at/p3w/cms/trigger/CWTalks/Teilchenkosmos\\_Oct2009.pdf](http://www.hephy.oeaw.ac.at/p3w/cms/trigger/CWTalks/Teilchenkosmos_Oct2009.pdf)

### Bildmaterial:

**Connections Group, Purdue University, CERN, Fermilab  
DESY, KEK, SLAC, BNL, NASA, ESA, Universität Wien,  
Institut für Hochenergiephysik Wien,  
u.a.**

**Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**