

# Elementarteilchenphysik

Thomas Hebbeker

**„verstehen, was die Welt im Innersten zusammenhält“**

**... und die Evolution des Universums**

- **Übersicht: Teilchen und Wechselwirkungen**
- **Methoden: Beschleuniger und Detektoren**
- **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**
- **Offene Fragen**
- **Teilchenphysik an der RWTH**

# Inhalt

## ▪ **Übersicht: Teilchen und Wechselwirkungen**

Struktur der Materie

Quantentheorie und Relativitätstheorie

Leptonen und Quarks

Die vier Wechselwirkungen

Feynman-Diagramme

Das Standardmodell

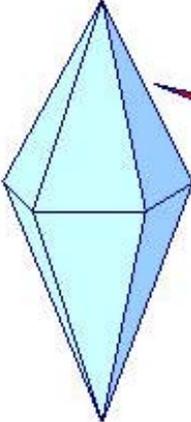
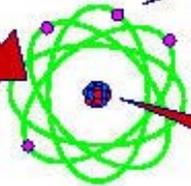
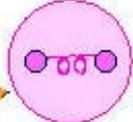
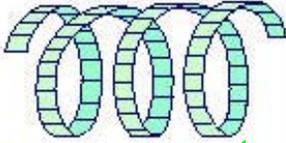
▪ **Methoden: Beschleuniger und Detektoren**

▪ **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**

▪ **Offene Fragen**

▪ **Teilchenphysik an der RWTH**

# Die Struktur der Materie

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

elektromagnetische Kraft  
(= elm. Wechselwirkung)

Kernkraft ~ starke Wechselwirkung

# Grundlagen der Teilchenphysik

## Quantentheorie

relevant wenn Größen der Dimension „Wirkung“

(= Energie \* Zeit = Impuls \* Ort) **nicht**  $\gg \hbar = 6.6 \cdot 10^{-16} \text{ eV s}$

Beispiel: Eigendrehimpuls (= Spin) des Elektrons:  $\hbar / 2$

Konsequenzen: Unschärferelation:  $\Delta x \cdot \Delta p > \hbar$  , „Zufall“, ...

## Relativitätstheorie

relevant wenn Geschwindigkeiten  $v \rightarrow c = 3.0 \cdot 10^8 \text{ m / s}$

Beispiel: Quark im Proton:  $v \approx 0.999 c$

Konsequenzen:  $v \leq c$  , Zeitdilatation,  $E = m \cdot c^2$  , ...

# Die 4 Grundbausteine des Sonnensystems

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Neutrino} \\ \text{Elektron} \end{array} \quad \begin{array}{l} 0 < 3 \text{ eV} \\ -1 \quad 0.5 \text{ MeV} \end{array} \quad (\text{Sonne} \rightarrow \text{Erde: } 6 \cdot 10^{14} / m^2 / s)$$

$$\begin{pmatrix} u & u & u \\ d & d & d \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{up-Quark} \\ \text{down-Quark} \end{array} \quad \begin{array}{l} 2/3 \quad 5 \text{ MeV} \\ -1/3 \quad 10 \text{ MeV} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{pmatrix} u & u & u \\ d & d & d \end{pmatrix}} \right\} \text{(3 „Farb“-Varianten)}$$

*(nicht „direkt“ beobachtbar)*

**Kerne:** Proton (938 MeV) =  $u u d$ , (Neutron), He, Li, ....., **Mesonen**

## Elementarteilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ (Fermionen)

elementar: punktförmig/keine innere Struktur (heutige Messgenauigkeit  $\sim 10^{-18} m$ )

Zu jedem Teilchen existiert ein Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung:

$$\nu \leftrightarrow \bar{\nu} \quad e^- \leftrightarrow e^+ \quad u \leftrightarrow \bar{u} \dots$$

# Die 4 Kräfte/Wechselwirkungen

**erfahrbar:** a) Bindungsphänomene      b) Dynamik: Streuprozesse, Zerfälle

Gravitation: vernachlässigbar im Mikrokosmos

Elektromagnetische WW:

a) Atom

b)  $e + p \rightarrow e + p$  (elast. Streuung)

Schwache WW:

a) -

b)  $d \rightarrow u e \bar{\nu}$  ( $n \rightarrow p e \bar{\nu}$ )

(Beta-Zerfall)

Starke WW:

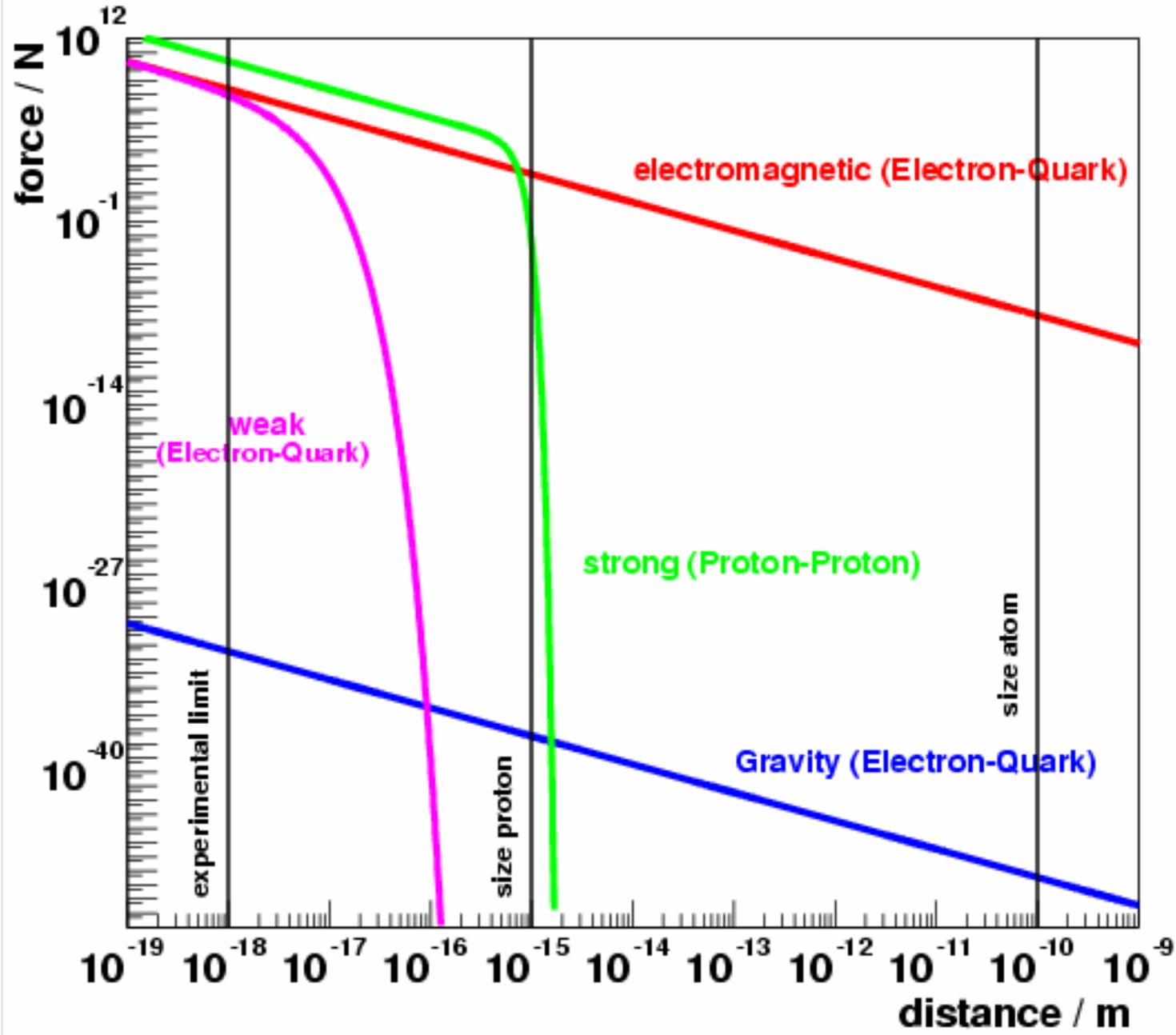
a) Nukleonen im Kern

b)  $p + n \rightarrow d$

Quarks im Nukleon

(Fusion zu Deuteron)

# Stärke und Reichweite der Kräfte

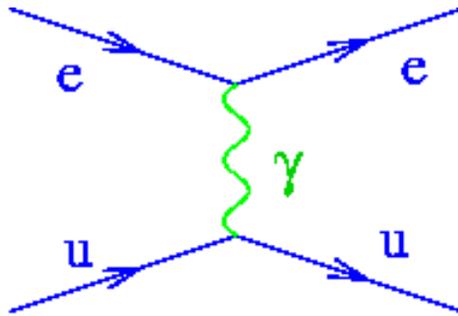


# Beschreibung der Wechselwirkungen

Feynman-Diagramme: Visualisierung und  
Berechnung von Wahrscheinlichkeiten

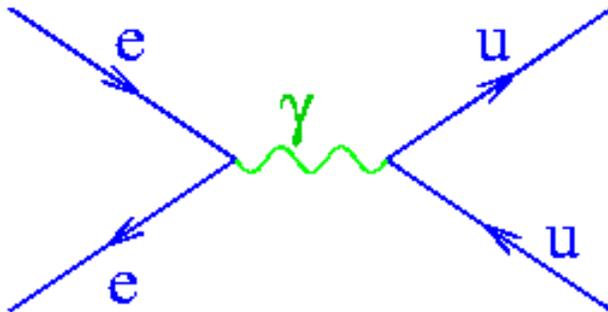
Beispiele:

Elastische Elektron-Quark-Streuung (elm. WW):



Kräfte: Austauscheteilchen  
mit Spin 1 (Bosonen)

Erzeugung eines Quark-Antiquark-Paares in der  $e^+e^-$ -Annihilation (elm. WW)



Photon = 'virtuell' !

Unschärferelation:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq 200 \text{ MeV } f$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq 7 \cdot 10^{-16} \text{ eV } s$$

# Das Standardmodell der Teilchenphysik

Materie: Spin  $\frac{1}{2}$  - Fermionen:

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

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

viele Teilchen

instabil!

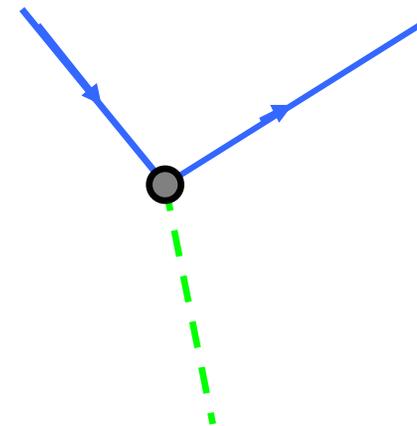
Wechselwirkungen: Spin 1 – Eichbosonen:

elektroschwach:

Photon	$\gamma$	masselos
Z-Boson	Z	91 GeV
W-Boson	$W^+$ $W^-$	80 GeV

stark:

Gluon	g	masselos
-------	---	----------



(Fast) alle experimentellen Daten werden akkurat beschrieben!

# Inhalt

- Übersicht: Teilchen und Wechselwirkungen

- **Methoden: Beschleuniger und Detektoren**

  - Strukturuntersuchungen

  - Teilchenphysik und Kosmologie

  - Teilchenbeschleuniger:

    - Prinzipien, Beispiele

  - Teilchendetektoren:

    - Prinzipien, Beispiele

- **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**

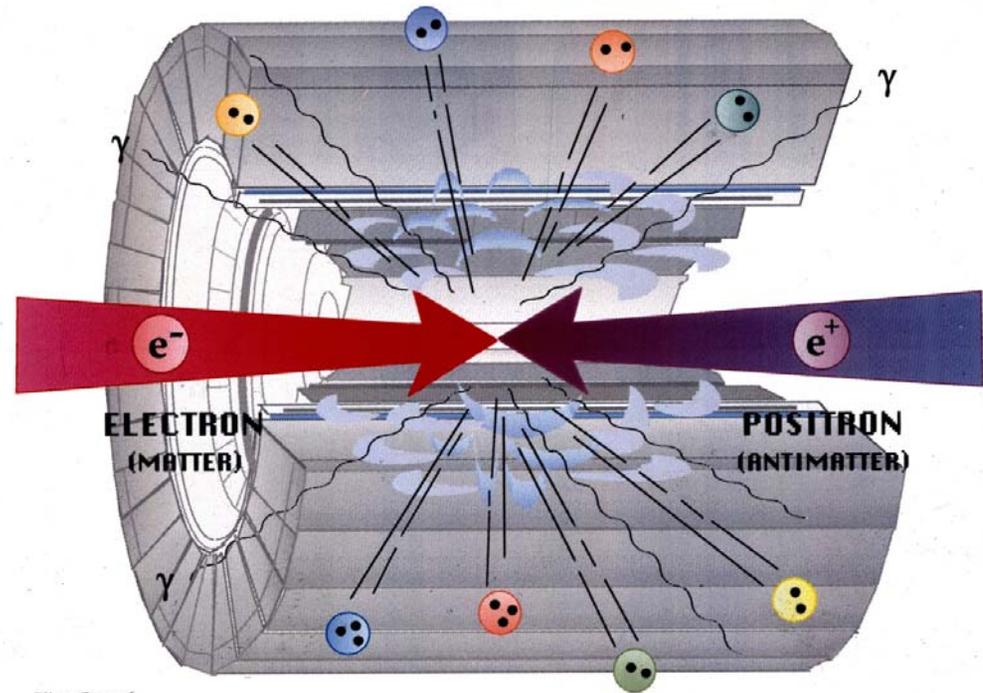
- **Offene Fragen**

- **Teilchenphysik an der RWTH**

# Methoden der experimentellen Teilchenphysik

## Werkzeuge:

- Teilchenbeschleuniger
- Teilchendetektoren



*Eliane Onursal*

Unschärferelation:  $\Delta x \approx 1 / E$

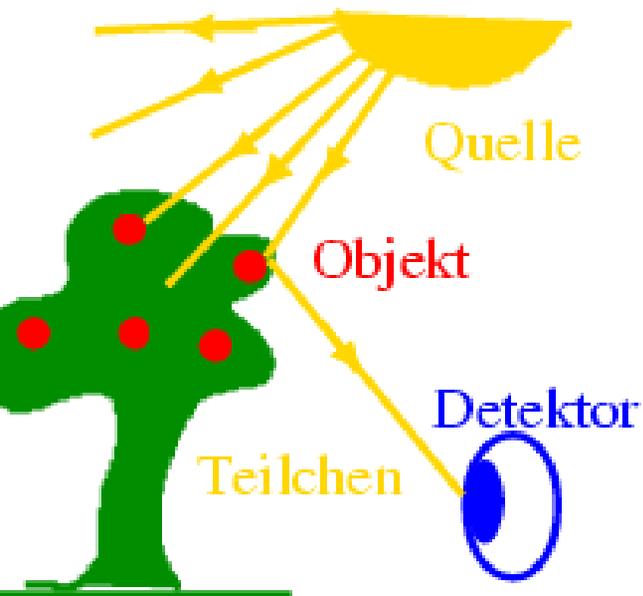
Studium der Kräfte bei hohen Energien:  
(Big Bang!)

Neue schwere Teilchen (Masse  $m$ ):

**HOHE**

**ENERGIE !**

# Strukturuntersuchung

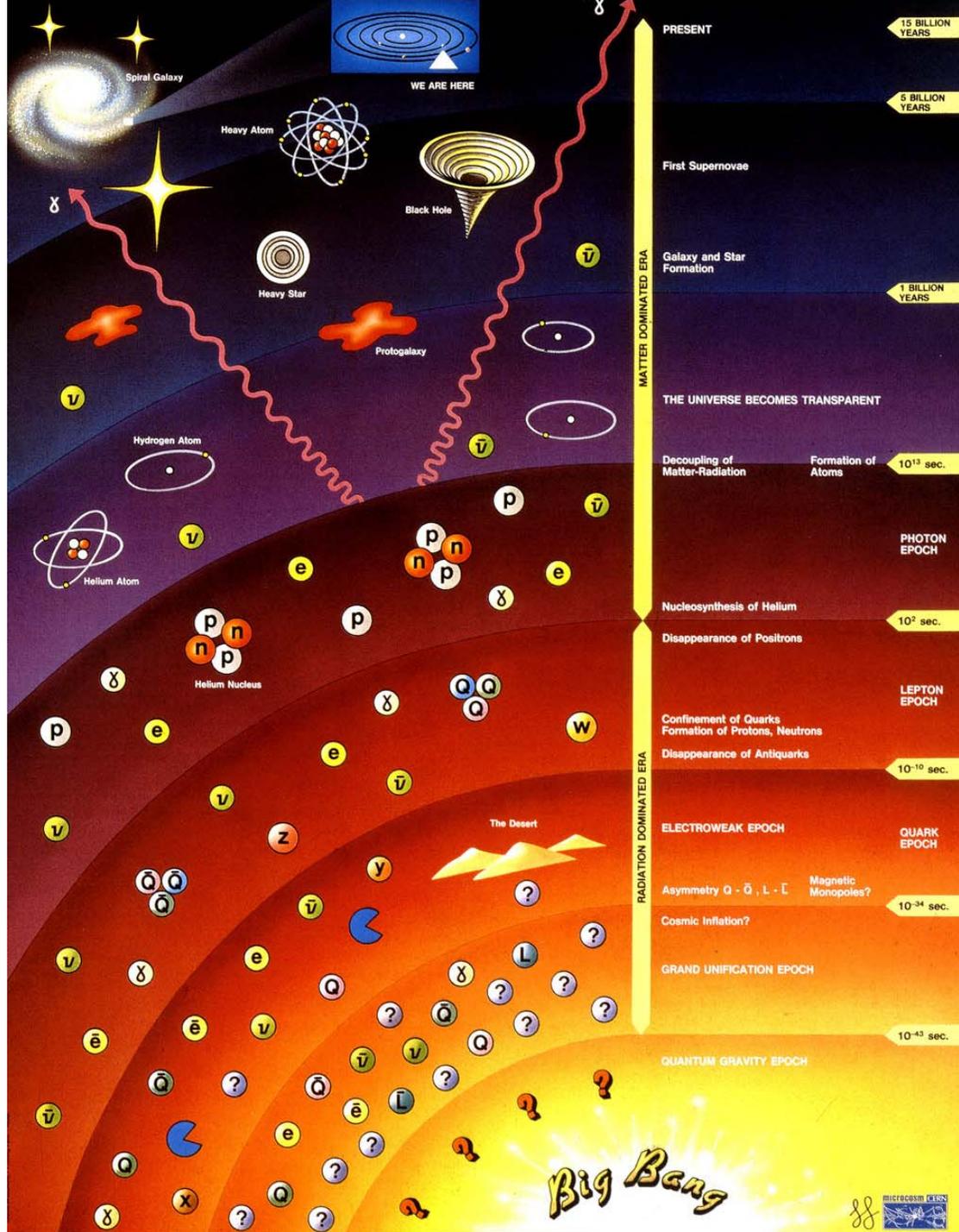


Prinzip: Streuung liefert Information über Objekt

## Beispiele

'Teilchen'	Quelle	Detektor	Wellenlänge	Energie
Schallwellen	Fledermaus-Kehlkopf	Fledermaus-Ohr	1 cm	
Photonen (Licht)	Sonne	Auge	$1 \mu\text{m}$	1 eV
Elektronen	Elektronen-	mikroskop	$10^{-12} \text{m}$	100000 eV
Elektronen	Teilchen- beschleuniger	Teilchen- detektor	$10^{-18} \text{m}$	100 GeV

# Teilchenphysik und Kosmologie



Dunkle Materie =  
Neutralino ?  
(Supersymmetrie)

Teilchenbeschleuniger  
untersuchen Prozesse  
 $10^{-10}$  s nach dem Urknall  
(100 GeV)

Materie- Antimaterie-  
Asymmetrie ?

# Energie, Masse, Temperatur ...

Beschleuniger:  $v \rightarrow c$ :  $E = E_{kin} = p = m$        $\Delta x \sim 1 \text{ fm} \cdot \frac{200 \text{ MeV}}{p}$

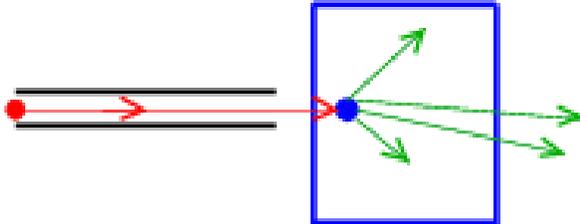
Universum:  $T / K \approx 10^4 E_{kin} / eV$        $E_{kin} \approx \frac{1 \text{ MeV}}{\sqrt{t / s}}$

$E_{kin}$	$\Delta x$	$T$	$t$	
eV		3000 K	300000 a	e + Kern $\rightarrow$ Atom
MeV	1 fm	$10^{10} K$	1s	n, p $\rightarrow$ He 1910: Kerne
10 GeV	0.01 fm		$10^{-8} s$	1970: Nukleonen, Quarks, tau, charm, bottom...
TeV	$10^{-19} m$		$10^{-12} s$	1983: W, Z 1995: top

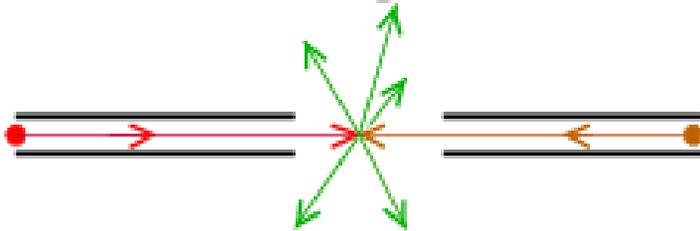
# Teilchenkollisionen

## Drei Möglichkeiten:

- Teilchen werden auf ruhende Materie geschossen



- Zwei Beschleuniger schießen Teilchen aufeinander



Hohe Kollisionsenergie!

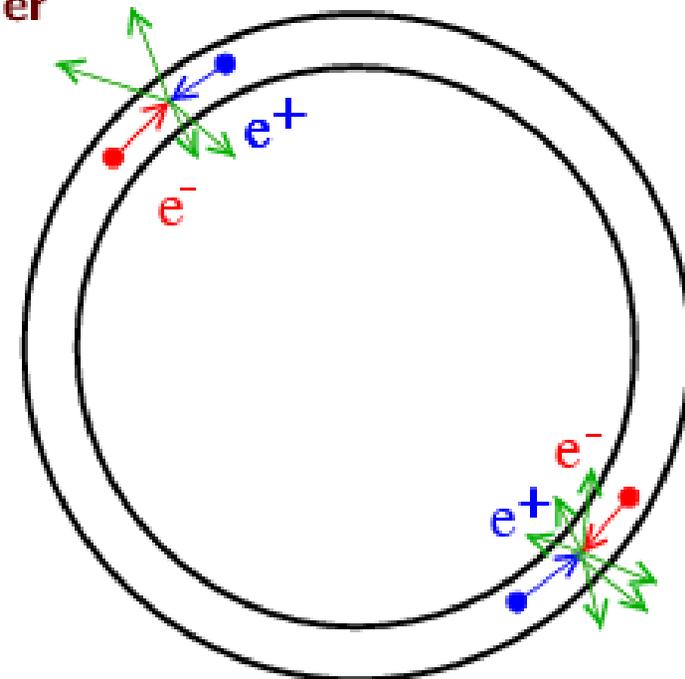
- EIN Ring mit entgegenlaufenden Teilchen und Antiteilchen

Hohe Kollisionsenergie! Elegant!

## Teilchensorten:

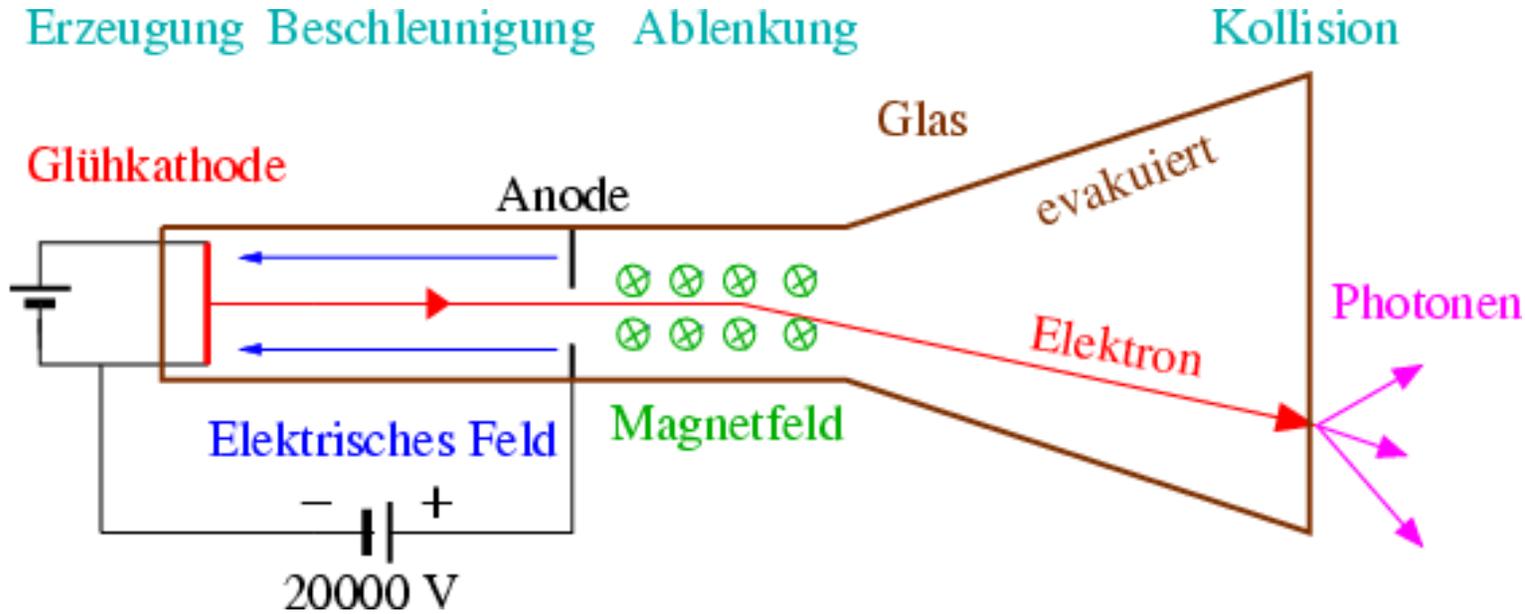
p, e und Antiteilchen

Kerne

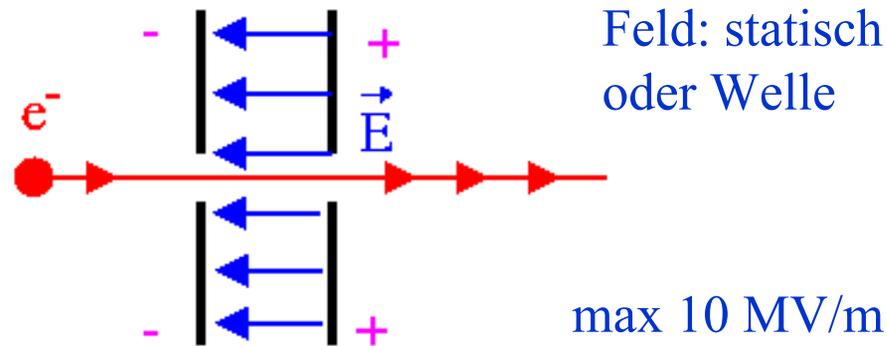


# Teilchenbeschleuniger

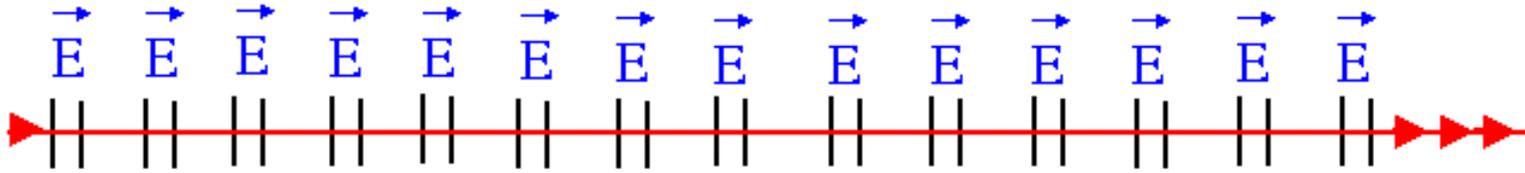
## Prototyp: Braunsche Röhre



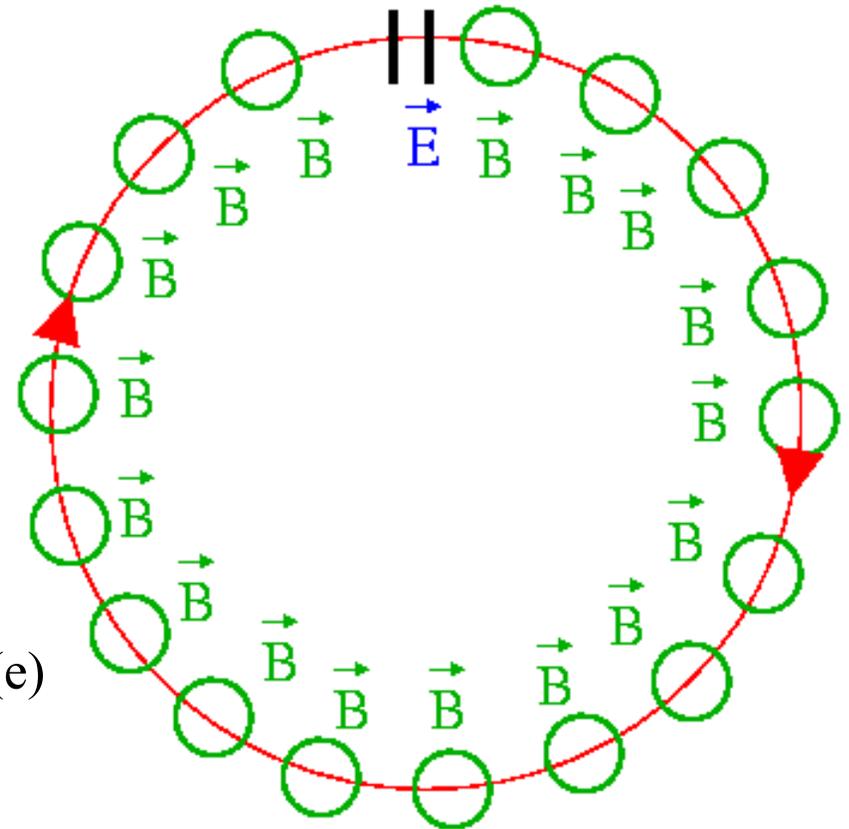
Energiezufuhr nur im elektrischen Feld:



# Linear oder zirkular ?



- + Teilchen-Antiteilchen-Kollisionen
- + „Recycling“
- Hohe Synchrotronstrahlungsverluste (e)

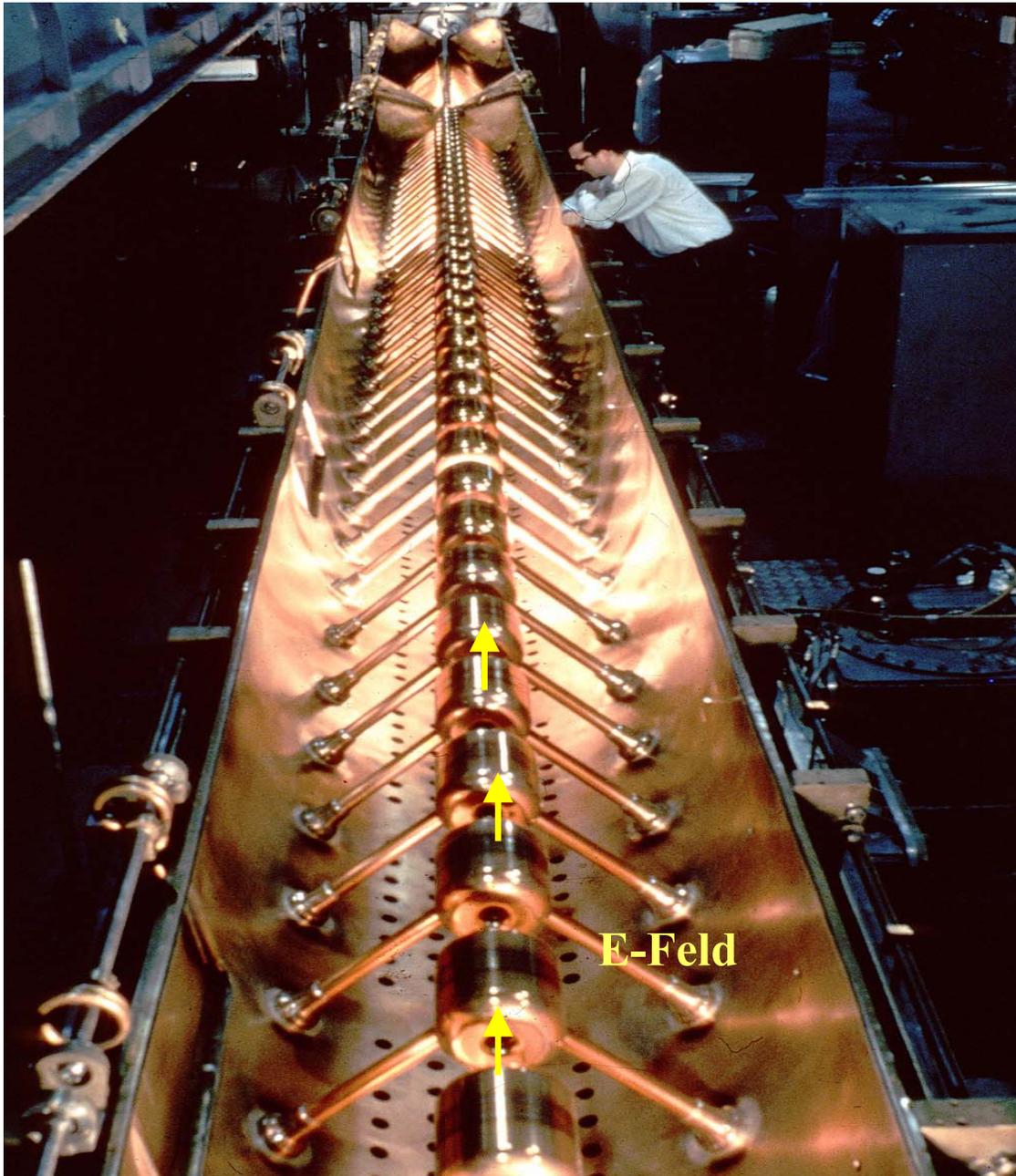


Hohe Energien (100 GeV) erfordern große Beschleuniger (mehrere km) !

# Linearbeschleuniger

CERN 1968

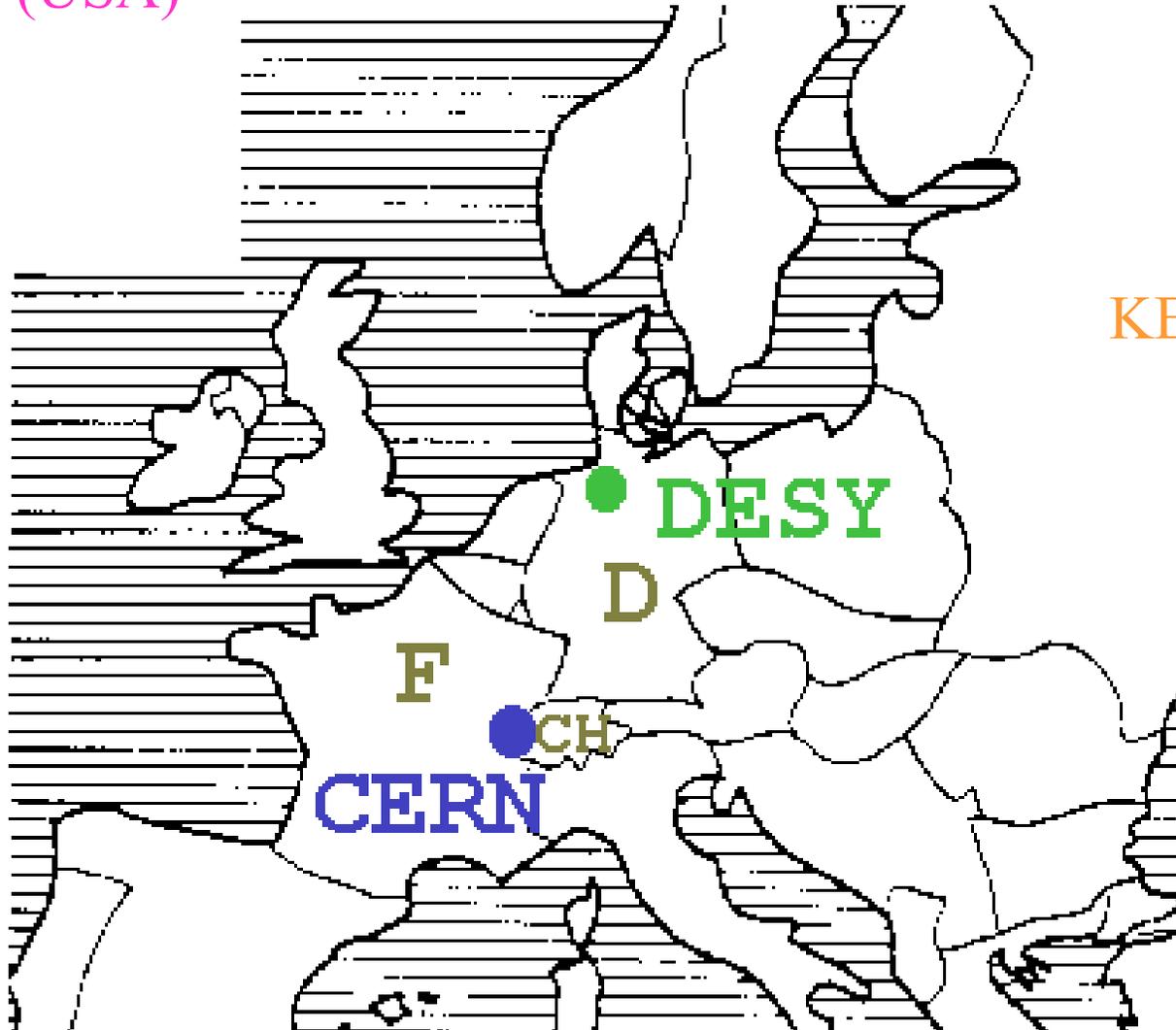
Protonen, 50 MeV



# Forschungszentren

FERMILAB (USA)

SLAC (USA)



KEK (Japan)

DESY

D

F

CH

CERN

# LEP (CERN)

LEP = Large Electron Positron collider

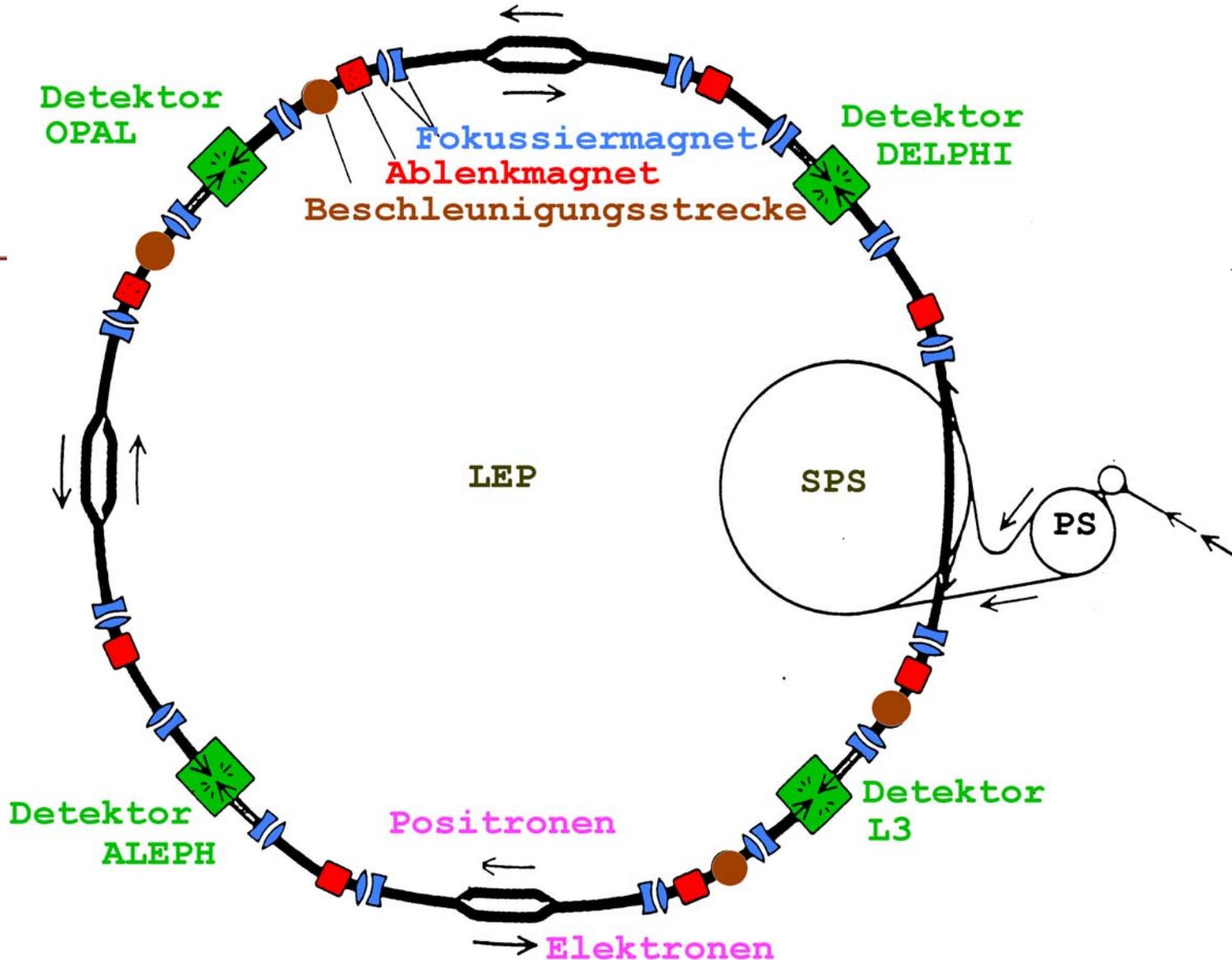
27 km Umfang

300  
supraleitende  
Beschleunigungs-  
strecken

3000  
Dipolmagnete  
von je 6 m  
Länge

800  
Quadrupol-  
magnete

4 große  
Detektoren



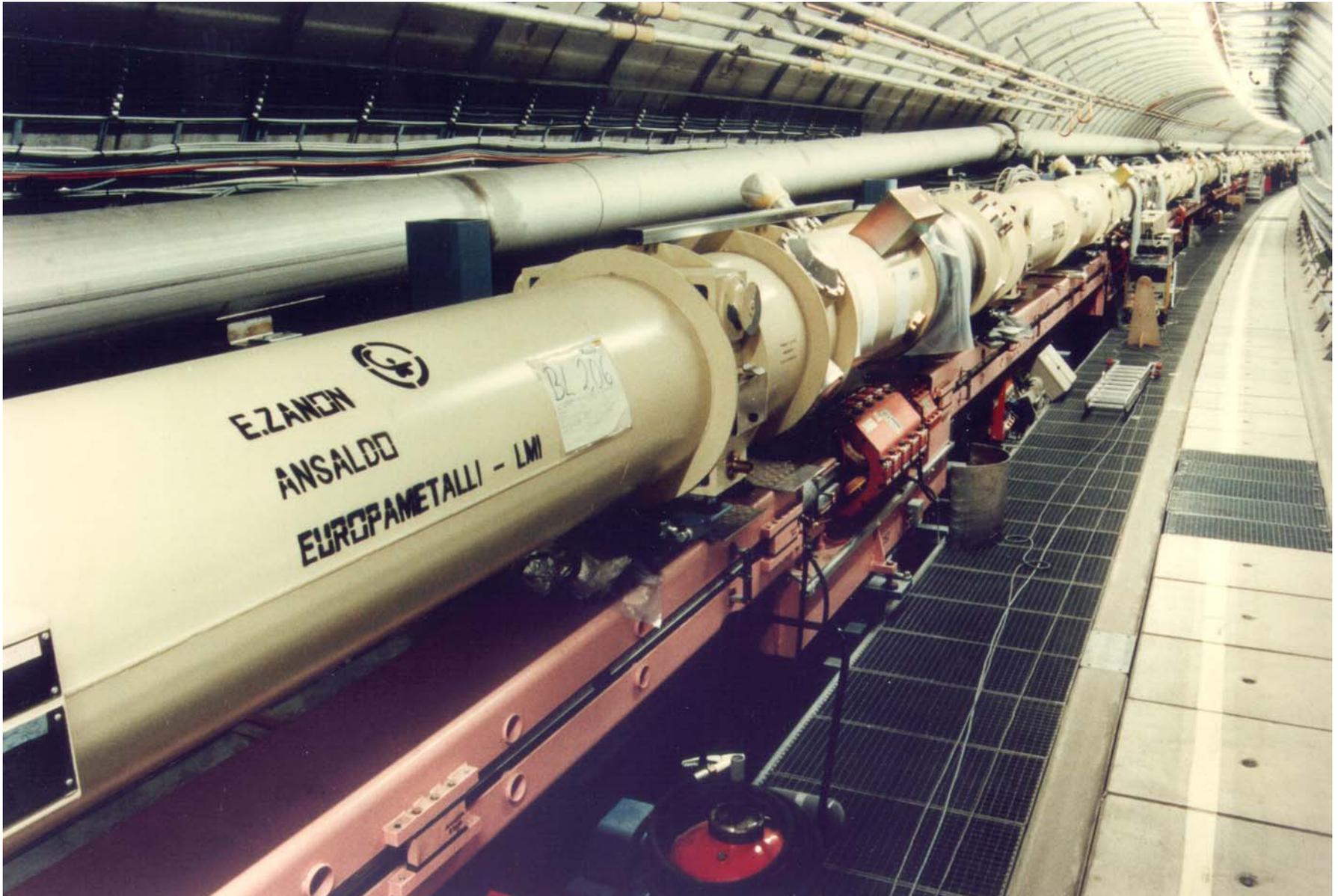
# LEP, LHC = Large Hadron Collider



# CERN (PS-Kontrollraum)

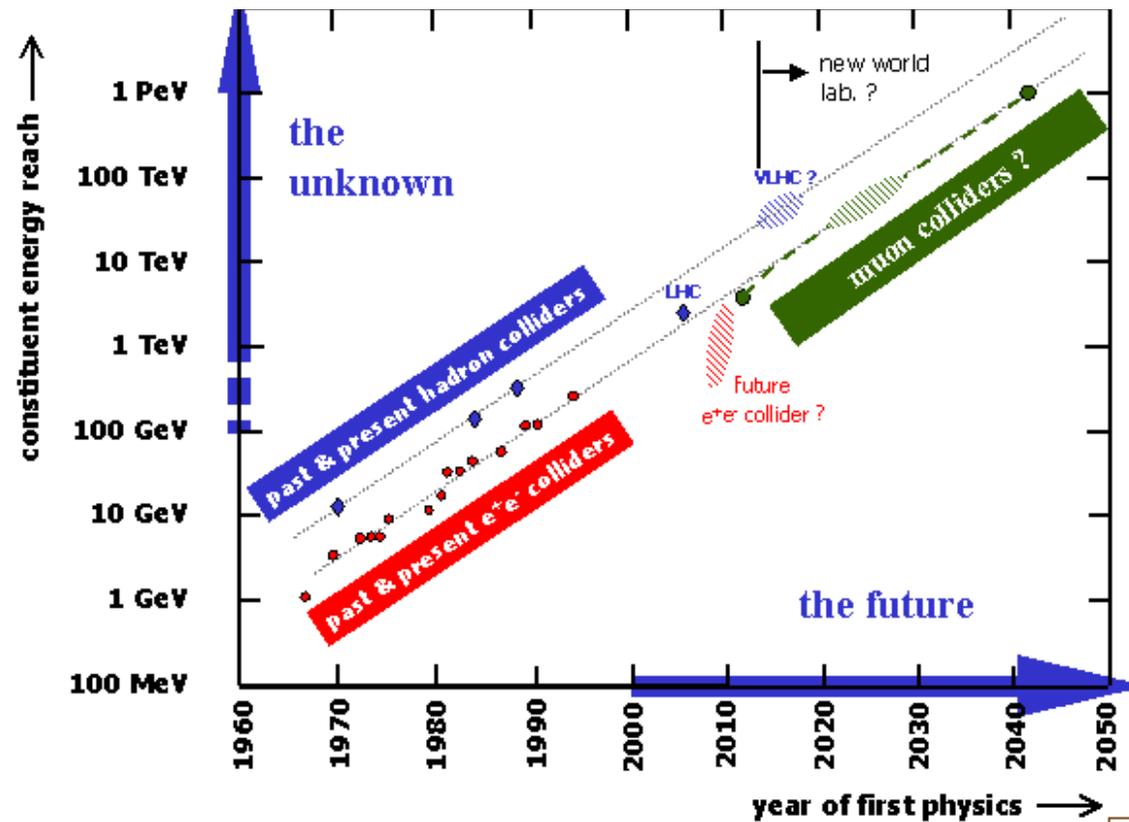


# HERA (DESY): $p$ (900 GeV) + $e$ (30 GeV)

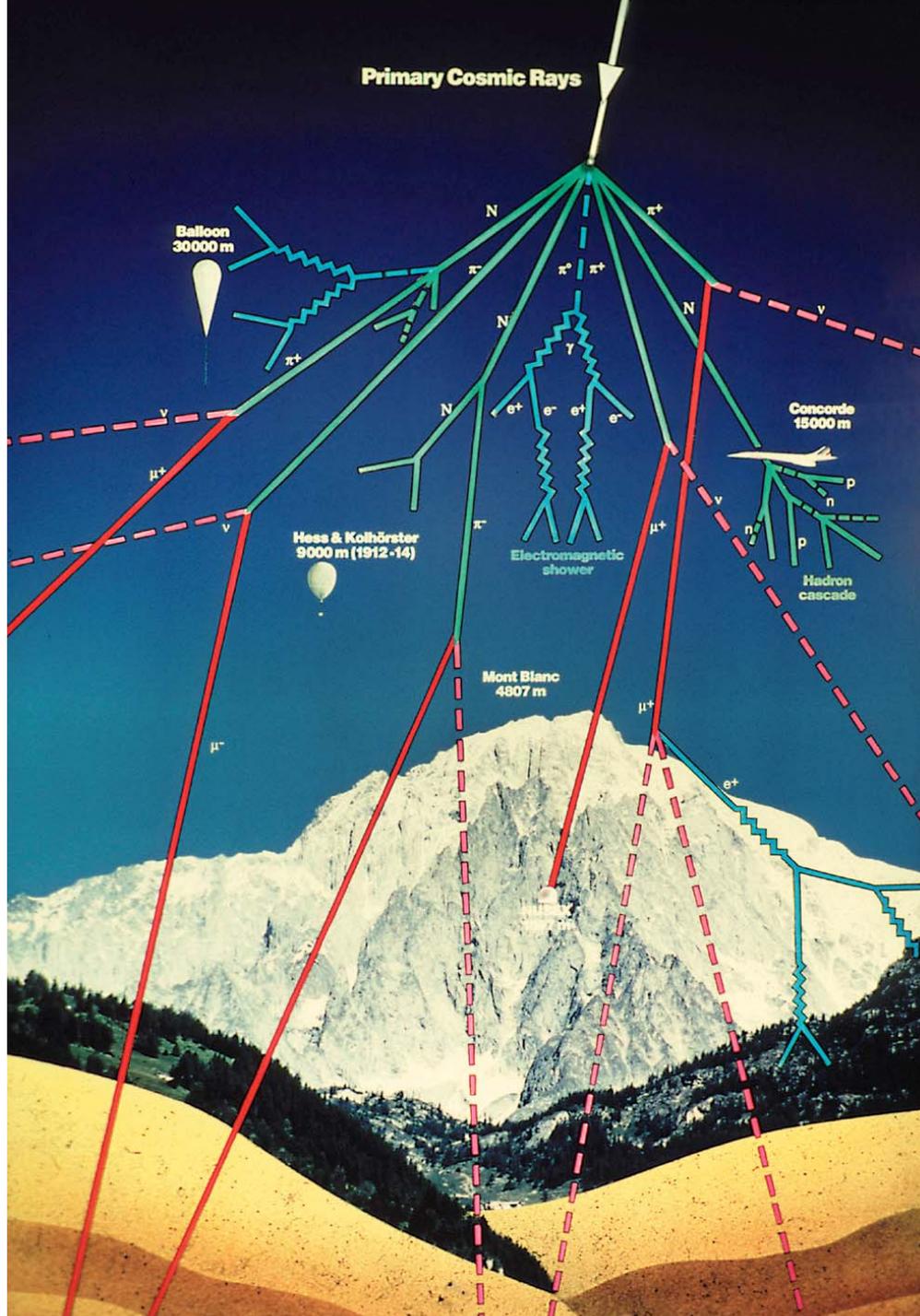


# Grosse Teilchenbeschleuniger

Name	Zeit	Teilchen	$\rho$ / km	$E$ / GeV
HERA, DESY	1992 - 2006	$e^- p, e^+ p$	1	30 + 900
SPS, CERN	1981 - 1990	$p\bar{p}$	1	300 + 300
TEVATRON, USA	1987 - 2006	$p\bar{p}$	1	1000 + 1000
LHC, CERN	2007 - 2020	$pp$	4	7000 + 7000
SLC, USA	1989 - 1999	$e^- e^+$	$\infty$	50 + 50
LEP, CERN	1989 - 2000	$e^- e^+$	4	104 + 104



# Teilchen aus dem Universum



Entdeckungen neuer  
Teilchen 1930-1960:

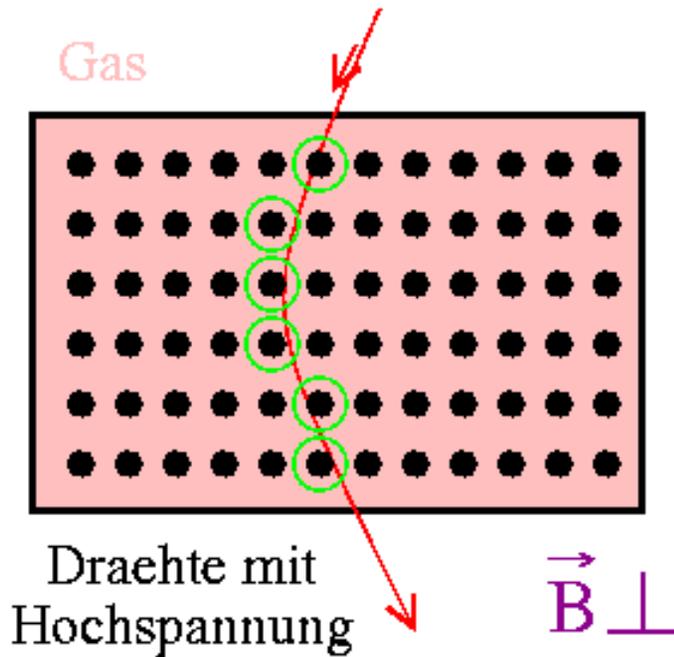
**kosmische Strahlung!**

Energien bis  
 $10^9 \text{ GeV}$

# Teilchendetektoren

Nobelpreis 1992

Charpak



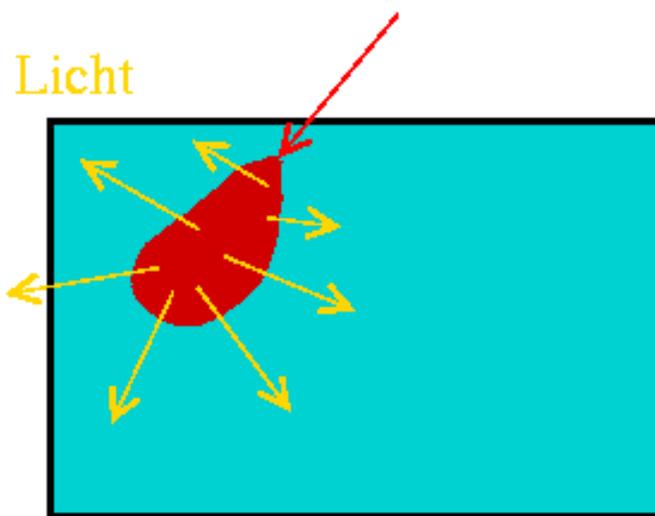
## Spurdetektoren:

**Geladene** Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt.

Ionisation des Gases. Elektronen bewegen sich im elektrischen Feld zum Draht.

**Ortsauflösung**  $\sim 0.1$  mm

Aus Krümmung folgt **Impuls**



## Kalorimeter:

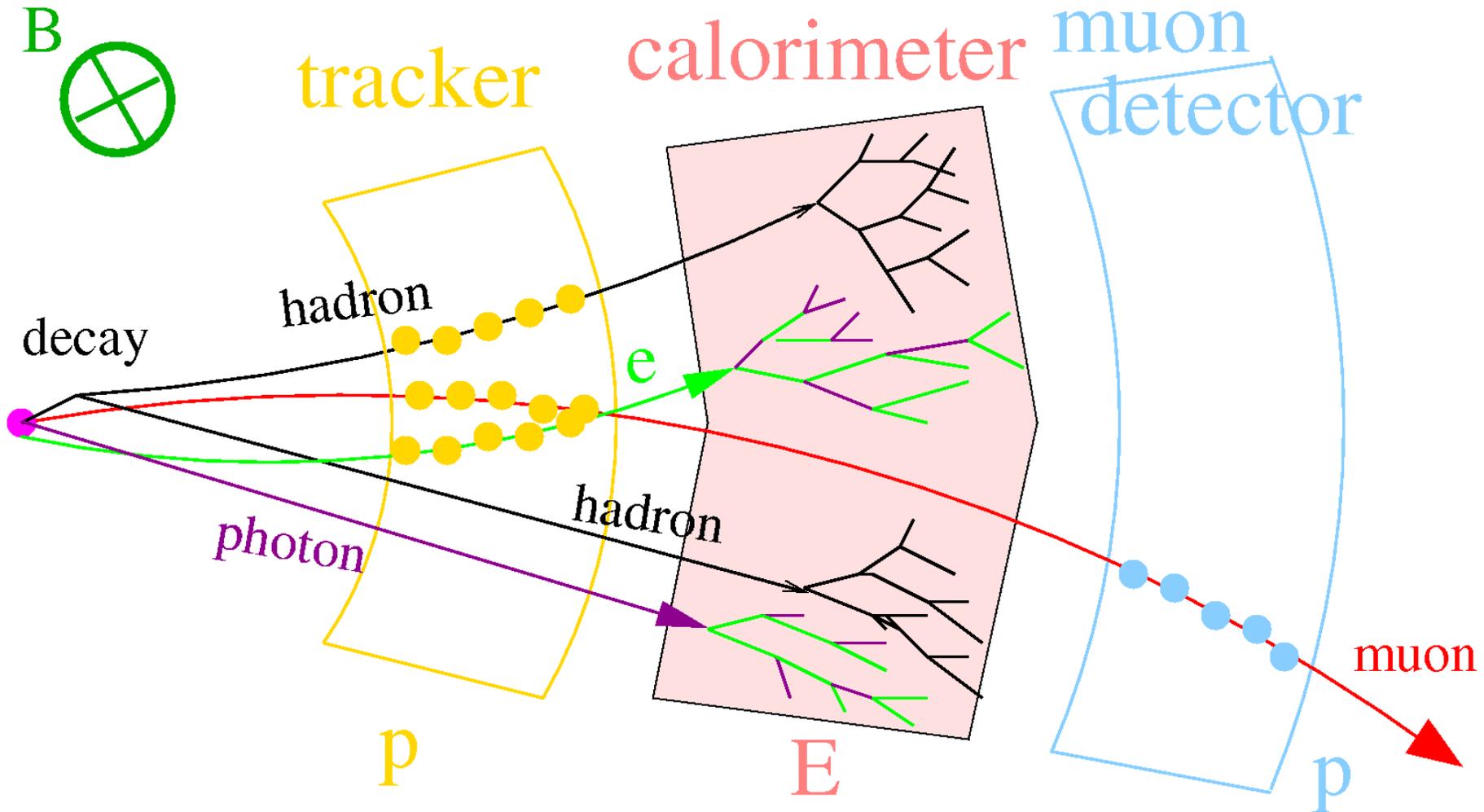
In Materie entstehen Sekundärteilchen, die das Material anregen.

Das entstehende Licht wird nachgewiesen und ist ein Maß für die Energie.

**Energieauflösung**  $\sim$  Prozent

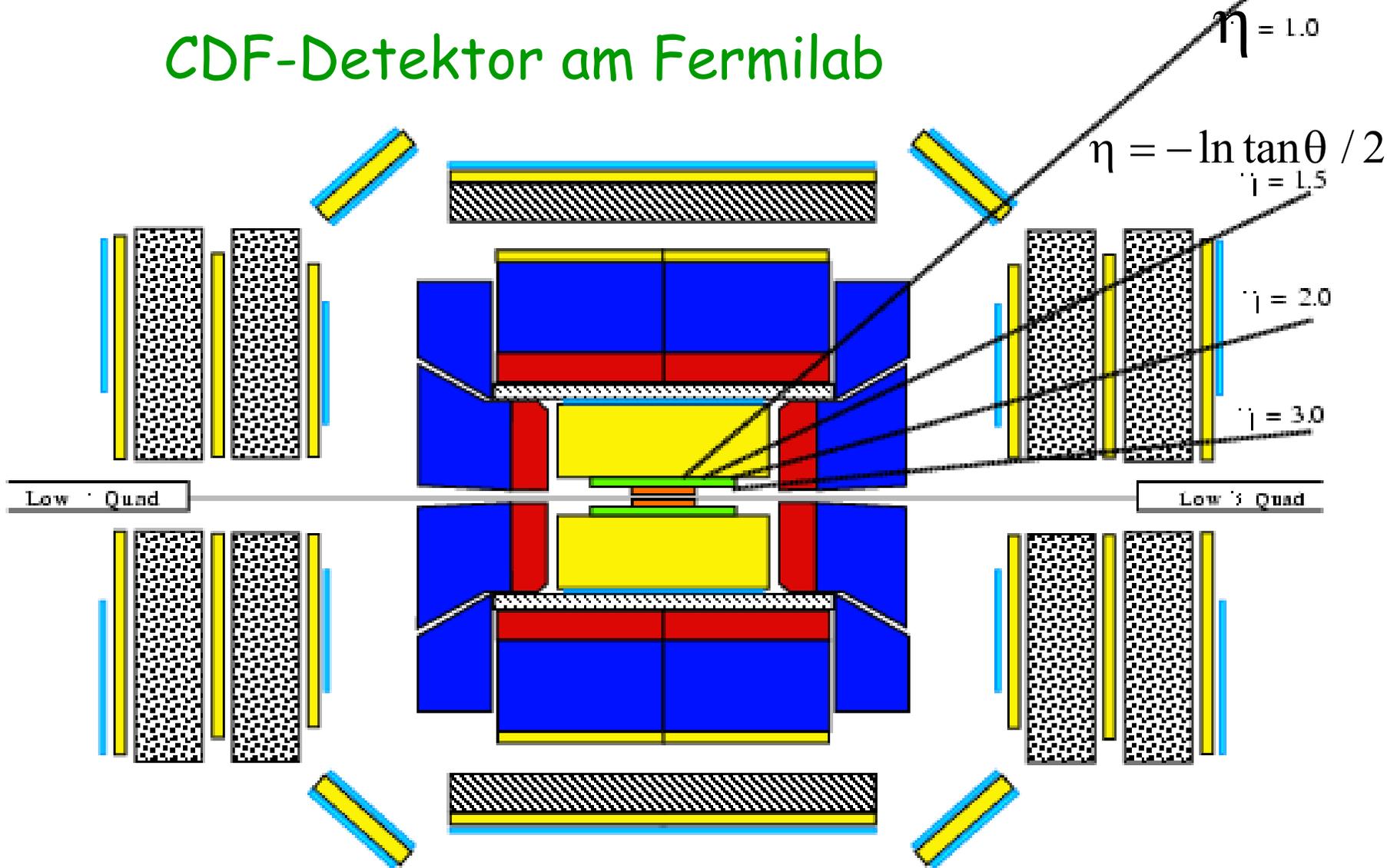
# Universaldetektoren

Nachweisbar: langlebige Teilchen mit elm. und/oder starker Wechselwirkung



Viele Teilchen sind kurzlebig → Nachweis nur über ihre Zerfallsprodukte

# CDF-Detektor am Fermilab



**Key:**

Orange: Silicon Tracker

Green: Fiber Tracker

Yellow: Drift Chamber

Cyan: Scintillator Counter

Red: Electromagnetic Calorimeter

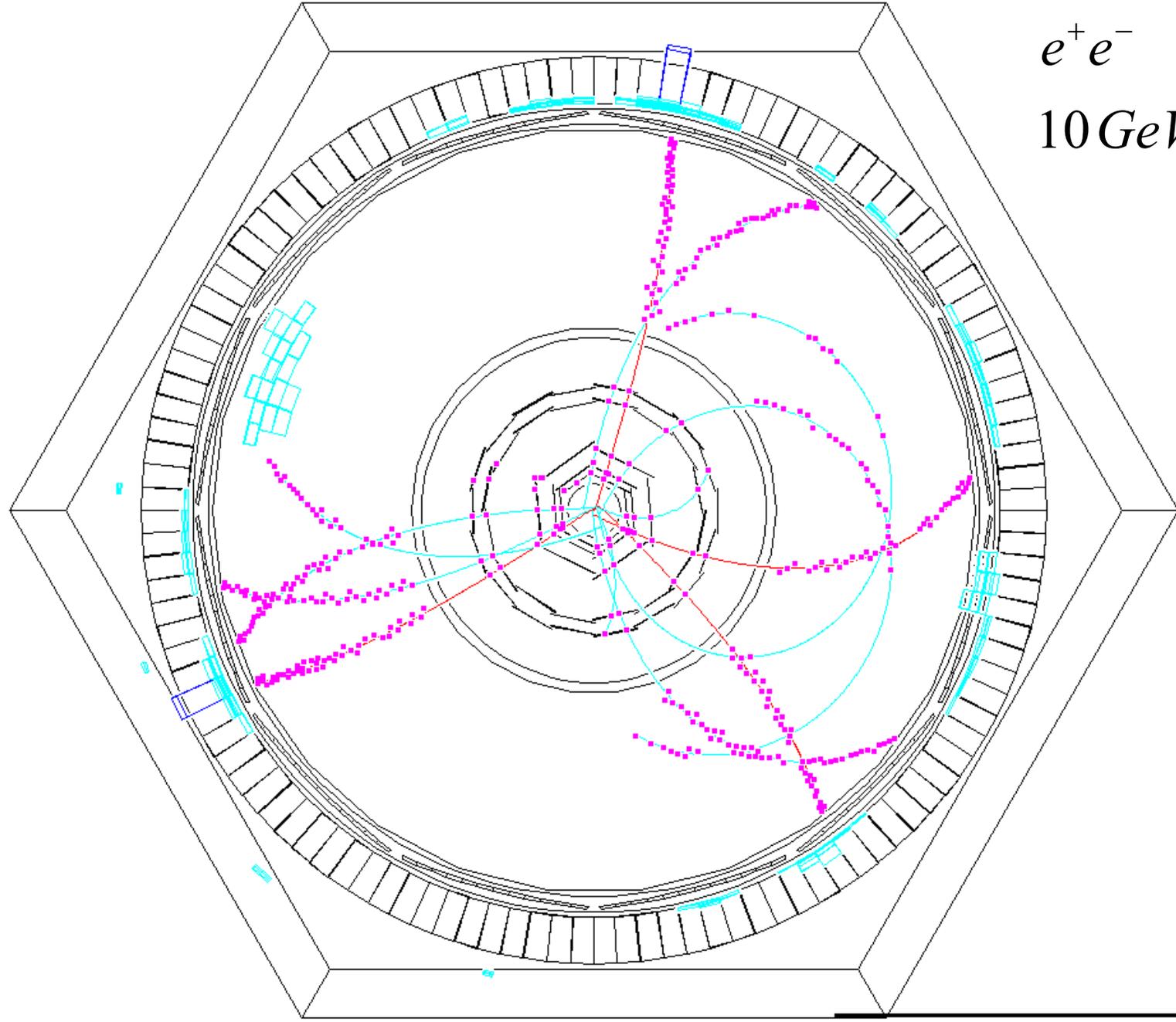
Blue: Hadronic Calorimeter

Hatched: Solenoid Coil

Dotted: Toroid

Diagonal: Steel Shielding

# Kollisionereignis im BABAR-Detektor (SLAC)





# Inhalt

- Übersicht: Teilchen und Wechselwirkungen
- Methoden: Beschleuniger und Detektoren
- **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**

Teilchen

Wechselwirkungen

Symmetrie-Verletzungen

Bedeutende Resultate der letzten 20 Jahre

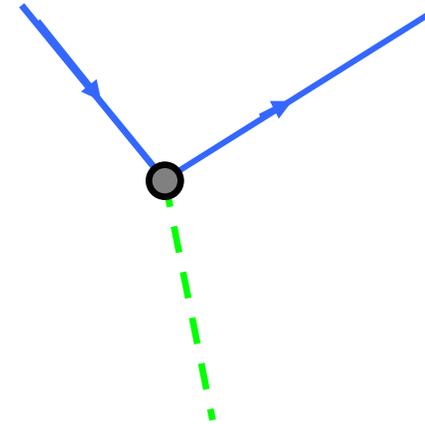
- **Offene Fragen**
- **Teilchenphysik an der RWTH**

# Das Standardmodell der Teilchenphysik

Materie: Spin  $\frac{1}{2}$  - Fermionen:

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

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



Wechselwirkungen: Spin 1 – Eichbosonen:

elektroschwach:

Photon	$\gamma$	masselos
Z-Boson	Z	91 GeV
W-Boson	$W^+$ $W^-$	80 GeV

stark:

Gluon	g	masselos
-------	---	----------

**+ Higgs ?**

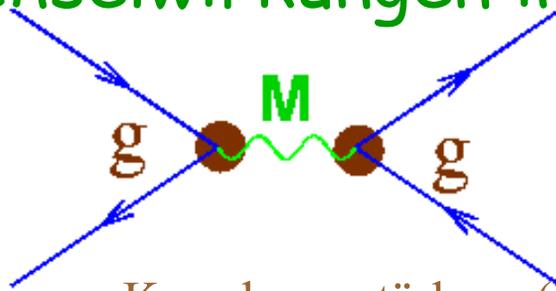
(Fast) alle experimentellen Daten werden akkurat beschrieben!

# Die fundamentalen Fermionen

Nobelpreise:

	Name	$m$	$\tau/s$	Zerfall
1995 Reines	e	511 keV	-	-
	$\nu_e$	$< 3$ eV	-	-
1988 Steinberger et al	$\mu$	0.106 GeV	$2.20 \cdot 10^{-6}$	$e \bar{\nu}_e \nu_\mu$
	$\nu_\mu$	$< 0.19$ MeV	-	-
1995 Perl	$\tau$	1.78 GeV	$2.96 \cdot 10^{-13}$	viele
	$\nu_\tau$	$< 18$ MeV	-	-
1990 Friedmann et al	{ u	5 MeV		-
	{ d	10 MeV	$10^3$	$u e^- \bar{\nu}_e$
1976 Richter, Ting	c	1.3 GeV	$10^{-12}$	$s e^+ \nu_e$
	s	0.2 GeV	$10^{-9}$	$u e^- \bar{\nu}_e$
	t	174 GeV	$10^{-23}$	$b e^+ \nu_e$
	b	4.3 GeV	$10^{-12}$	$c e^- \bar{\nu}_e$

# Die Wechselwirkungen im Mikrokosmos



Elektroschwache WW:

Nobelpreis 1999

t'Hooft, Veltman

'Vertex':

Kopplungsstärke  $g$  (z.B. el. Ladung)

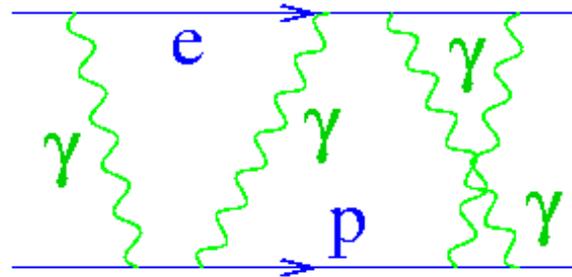
Bosonmasse  $M$ : Reichweite

→ Wahrscheinlichkeit

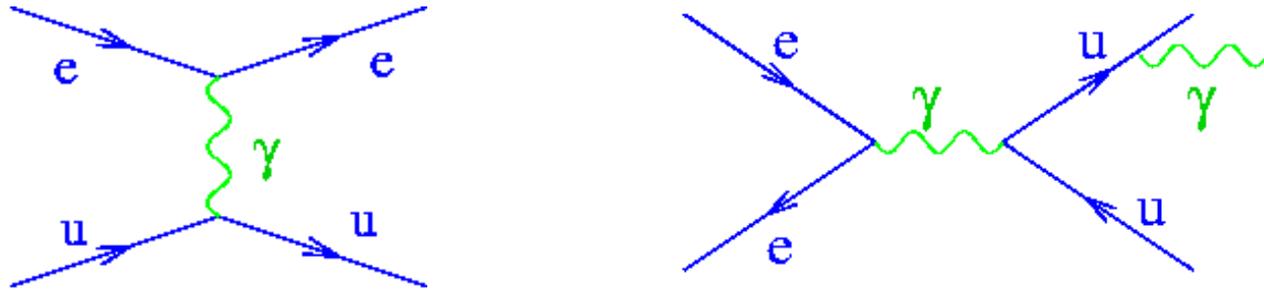
Boson	Photon $g$	W-Boson	Z-Boson	Gluon $g$
WW	elm.	schwach	schwach	stark
$M$	0	80.4	91.2	0
Arten		+ -		8 Farbkomb.
$\tau$	-	$10^{-25} s$	$10^{-25} s$	-
$g$	$\sim 0.1$	$\sim 0.1$	$\sim 0.1$	$\sim 0.3$
$R$	$\infty$	$\sim 0.001 \text{ fm}$	$\sim 0.001 \text{ fm}$	$\sim 1 \text{ fm} !$
Partner	Gel. Teilchen	alle	alle	Quarks

# Elektromagnetische Wechselwirkung

Bindungszustand: H-Atom:

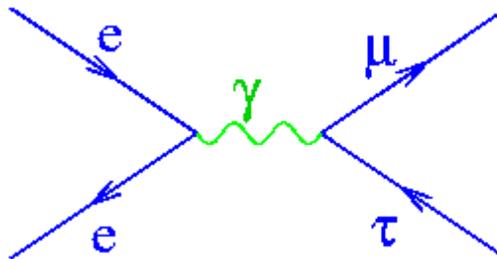


erlaubt:

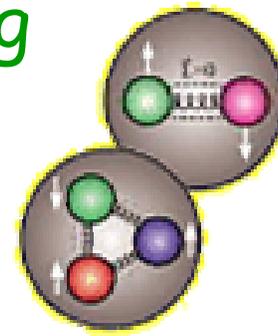


**Erhaltungssätze:** Ladung (immer), Teilchensorte (elm. WW)

verboten:



# Starke Wechselwirkung



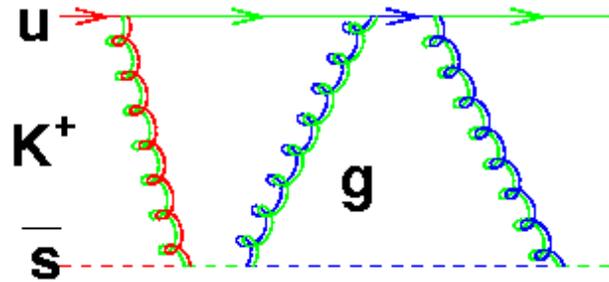
$$\text{Meson} = q \bar{q}$$

$$\text{Baryon} = q q q$$

Isolierte Quarks gibt es nicht!

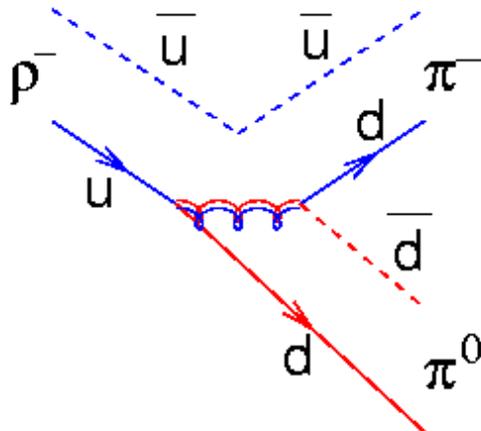
Beobachtbar sind nur „farbneutrale“  
Kombinationen

Bindungszustand:



Gluon =  
Farbe+Antifarbe

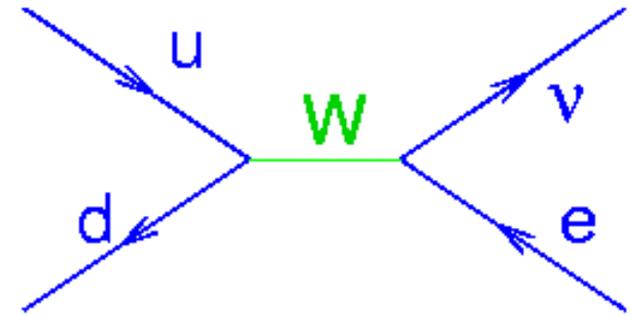
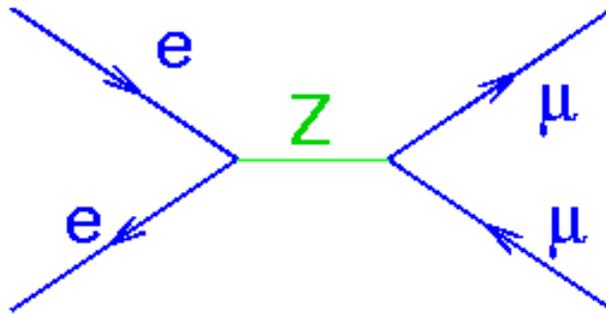
Zerfall:



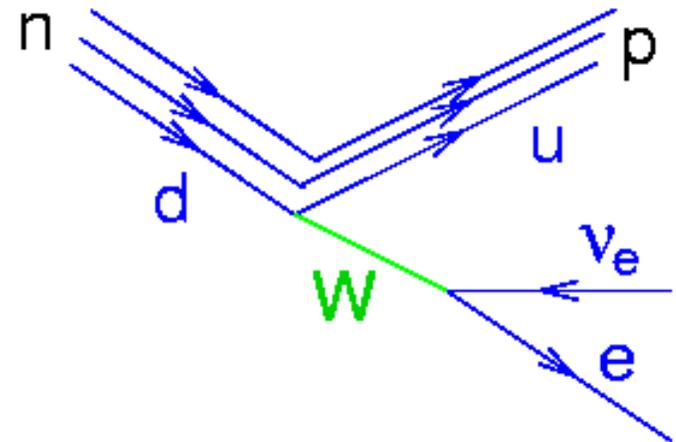
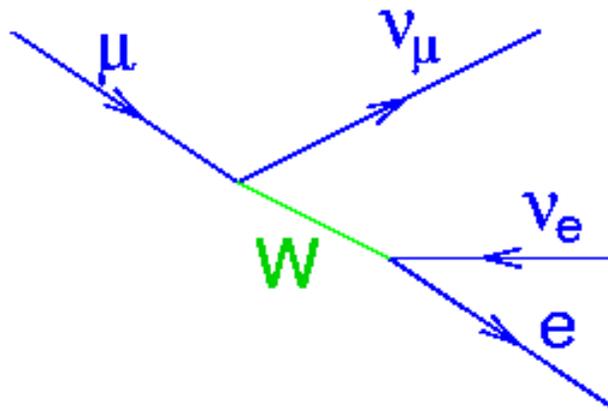
**Erhaltungssätze:** Quarksorte, Farbe

# Schwache Wechselwirkung

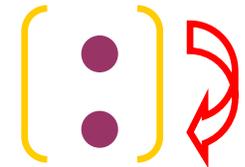
Kollisionsereignis



Zerfälle:



**W-Austausch: Teilchenart ist NICHT erhalten !**



# Hadronen = Quarkbindungszustände

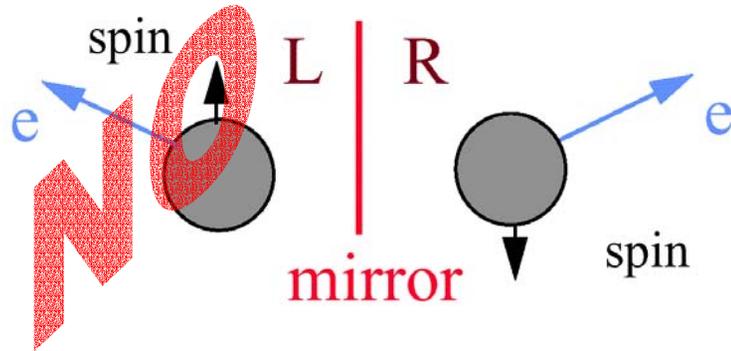
Mesonen

Baryonen

Name	Spin	Quarks	$m/\text{MeV}$	$\tau/\text{s}$	Zerfall
$\pi^+$	0	$u\bar{d}$	140	$3 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ \nu$
$\pi^0$	0	$u\bar{u}, d\bar{d}$	135	$8 \cdot 10^{-17}$	$\gamma\gamma$
$K^+$	0	$u\bar{s}$	494	$10^{-8}$	$\mu^+ \nu (64\%)$
$K_1^0$	0	$d\bar{s}$	498	$5 \cdot 10^{-8}$	$\pi e \nu_e (39\%)$
$\rho^+$	1	$u\bar{d}$	768	$10^{-24}$	$\pi^+ \pi^0$
$\rho^0$	1	$u\bar{u}, d\bar{d}$	768	$10^{-24}$	$\pi^+ \pi^-$
$D^+$	0	$c\bar{d}$	1869	$10^{-12}$	viele
$B^-$	0	$b\bar{u}$	5279	$10^{-12}$	viele
p	1/2	uud	938	$> 10^{39}$	-
n	1/2	udd	940	900	$p e^- \bar{\nu}$
$\Lambda$	1/2	uds	1116	$3 \cdot 10^{-10}$	$p \pi^- (64\%)$

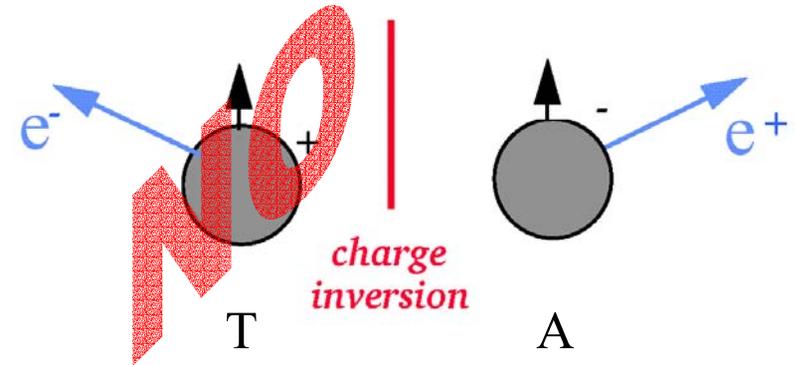
# Symmetrieverletzungen (schwache WW)

## Spiegelsymmetrie **P**



verletzt! (1957)

## Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie **C**



verletzt!

aber: Kombination **CP** : ok!

(linkshändiges T  $\leftrightarrow$  rechtshändiges A)

1964: Experimente:

Auch CP ist (schwach) verletzt!

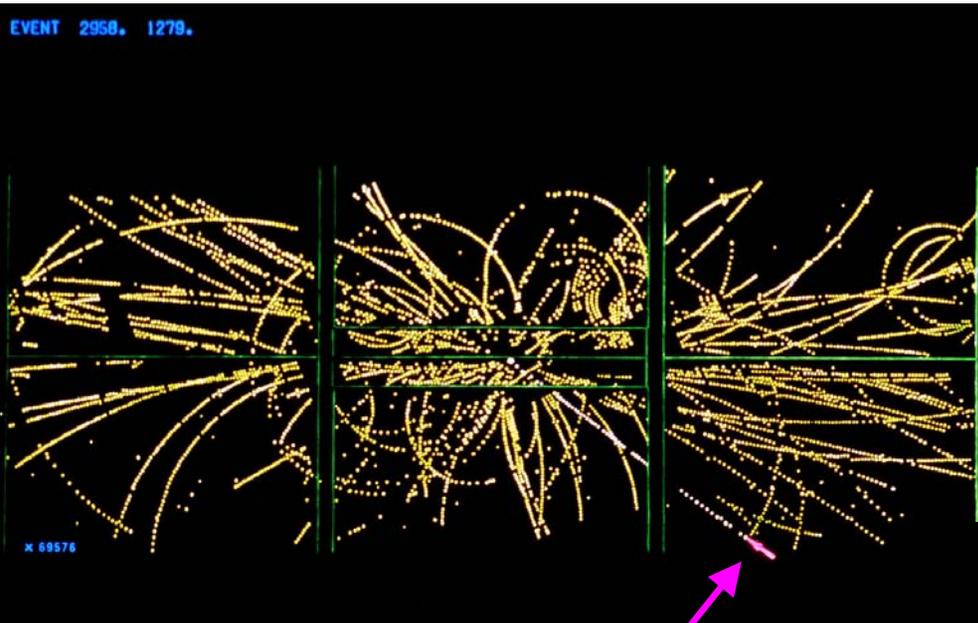
$$B^0 \rightarrow J/\psi K_s$$

$$\neq$$

$$\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_s$$

# Entdeckung von W und Z

CERN 1983



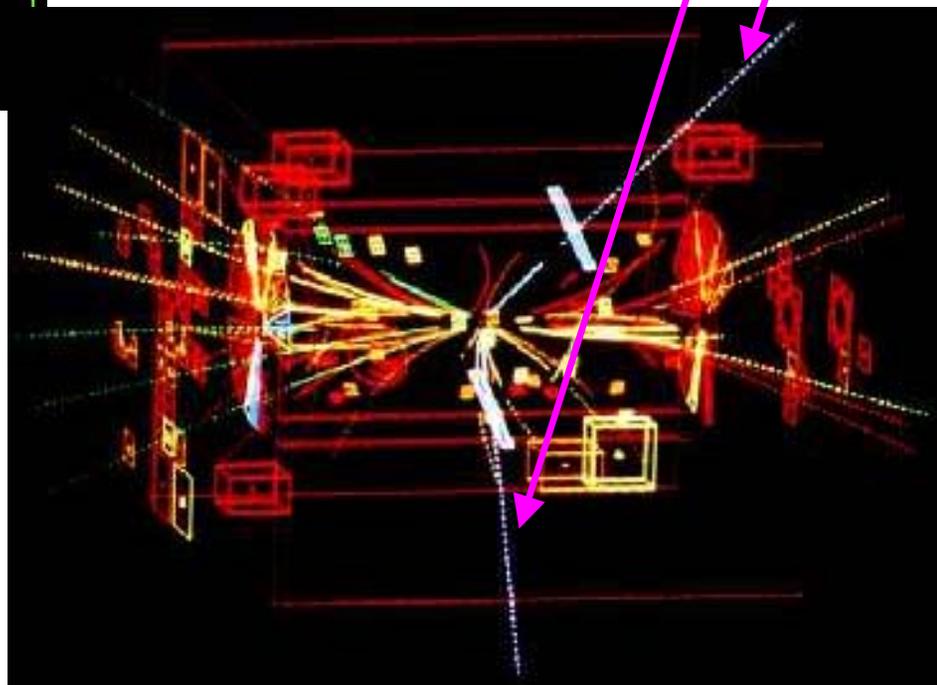
UA1, UA2

$p \bar{p}$  600 GeV

$q \bar{q} \rightarrow Z \rightarrow e e$

$q \bar{q} \rightarrow W \rightarrow e \nu$

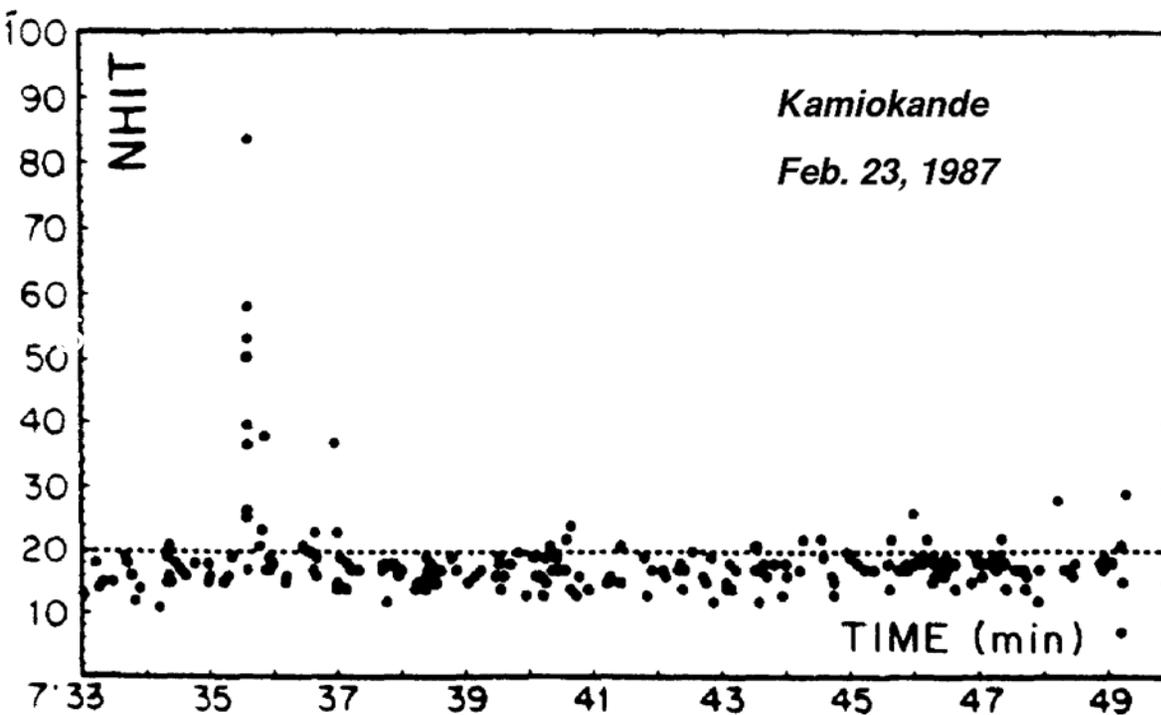
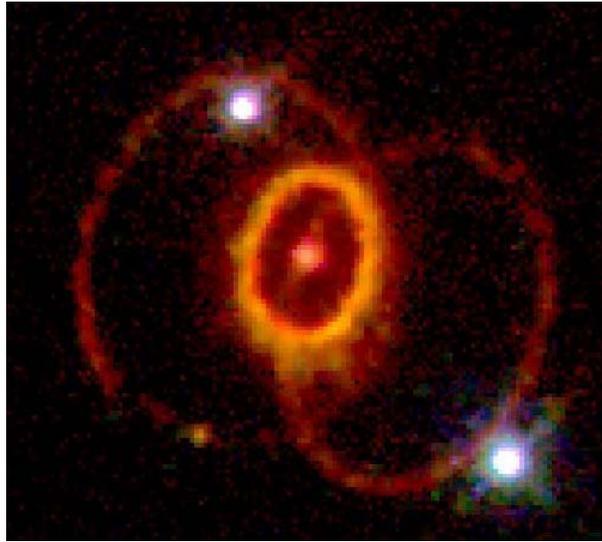
Nobelpreis 1984  
Rubbia, Van der Meer



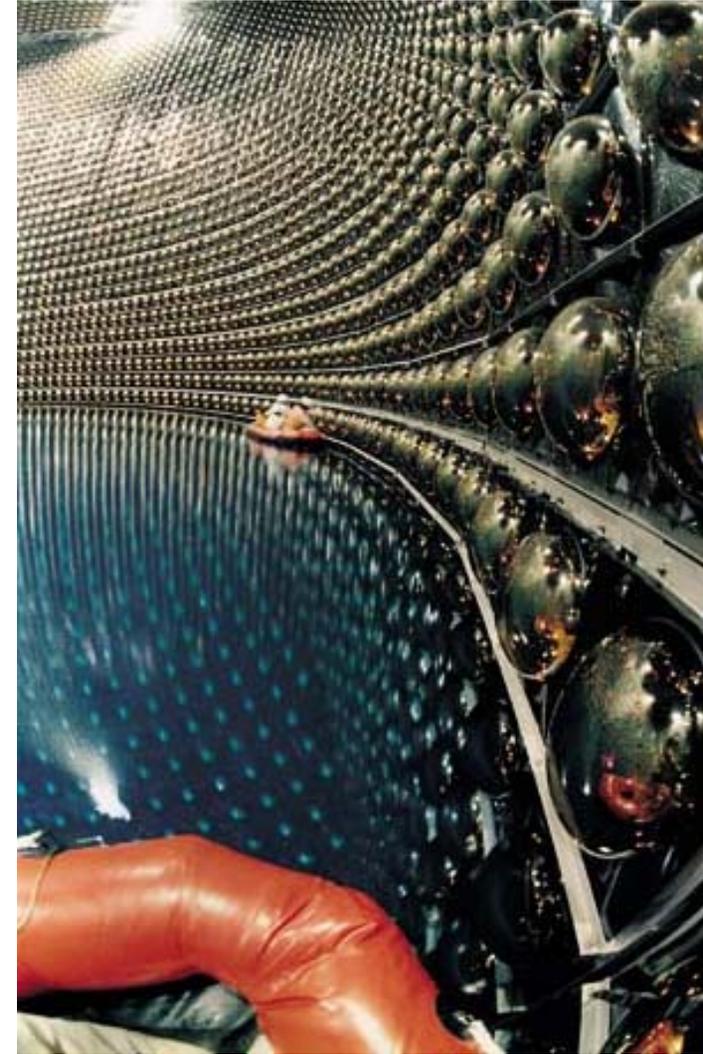
# Neutrinos aus Supernova

## SN 1987A

(Magellansche  
Wolke)



$$e + \nu \rightarrow e + \nu + \gamma$$



Superkamiokande

# Präzisionsmessungen bei LEP

## Z-Masse:

1986:  $92 \pm 1 \text{ GeV}$

2000:  $91.1882 \pm 0.0022 \text{ GeV}$

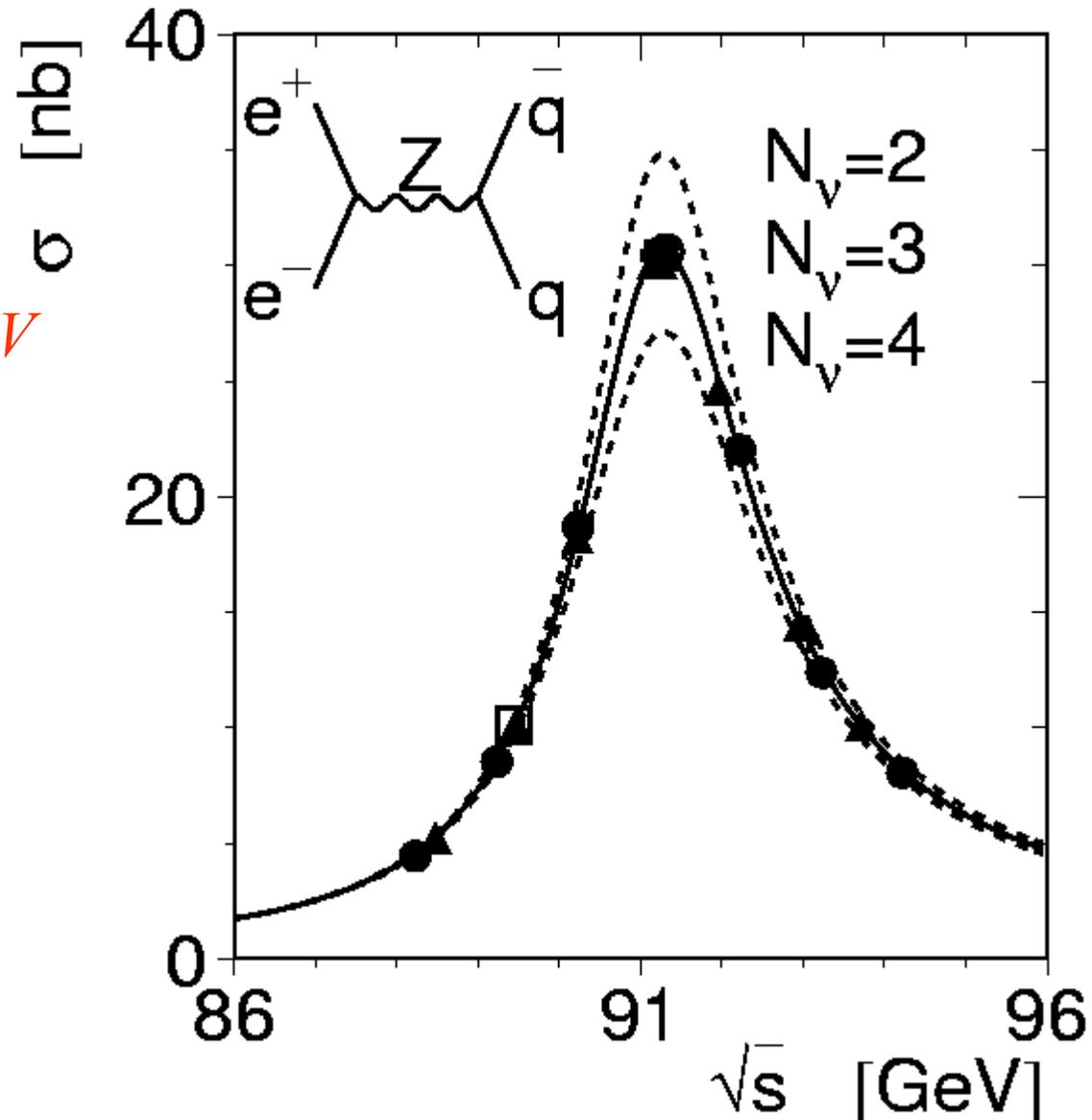
## Zahl der Neutrinofamilien:

2000:  $N_\nu = 2.983 \pm 0.007$

## Top-Quark-Masse:

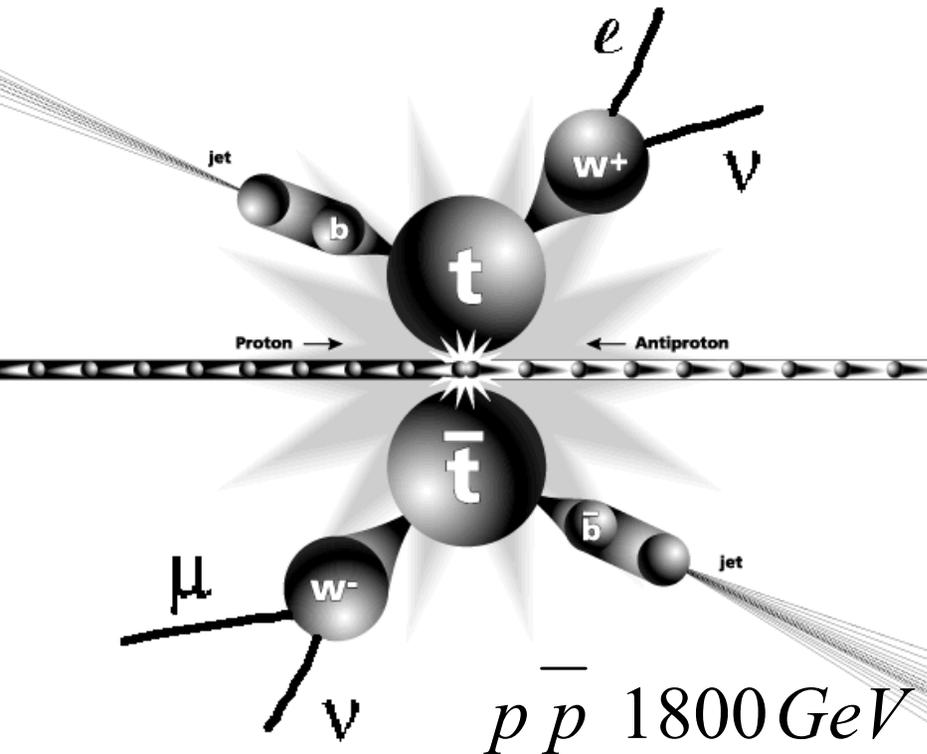
1993:  $m_t = 160 \pm 30 \text{ GeV}$

(Vorhersage !)



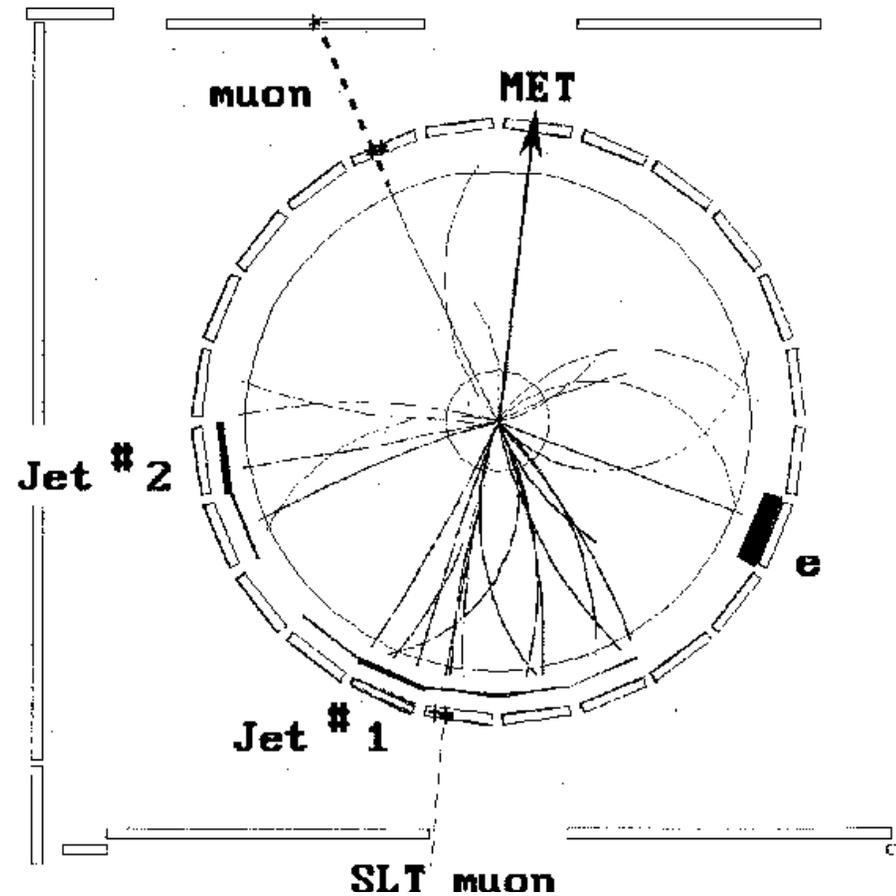
# Entdeckung des top-Quarks

Fermilab, 1995



$m \sim 175 \text{ GeV}$

CDF, D0



# Inhalt

- Übersicht: Teilchen und Wechselwirkungen
- Methoden: Beschleuniger und Detektoren
- Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

- **Offene Fragen**

Das Higgs-Boson

Ist die Natur „supersymmetrisch“ ?

Welche Rolle spielt Antimaterie im Universum ?

- **Teilchenphysik an der RWTH**

# Das Higgs-Boson

Standardmodell-Theorie  
funktioniert hervorragend:

$$\frac{M_W}{M_Z} = \frac{80.451 \pm 0.033}{91.188 \pm 0.002} = 0.8823 \pm 0.0004$$

Messung

$$= 0.8812 \pm 0.0014$$

Rechnung

ABER:

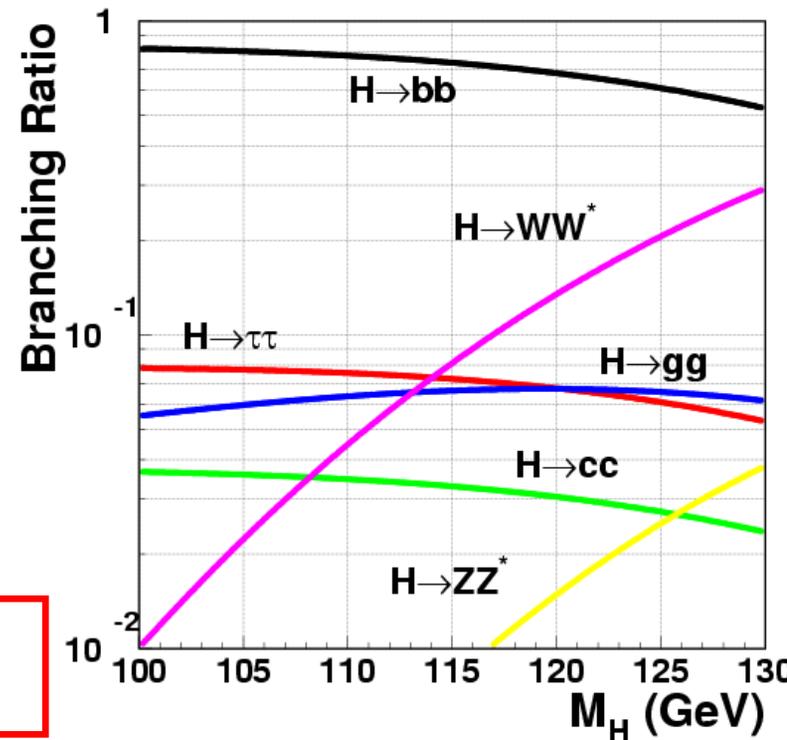
Standardmodell verlangt:  
Alle Teilchen sind **masselos** !

Ausweg:

zusätzliches Teilchen:

**Higgs**: neutral, Spin-0, instabil,  
(nur) Masse unbekannt

bisher experimentell nicht gefunden:  $M > 115 \text{ GeV}$



# Supersymmetrie

Materieteilchen: Spin  $\frac{1}{2}$   $\longleftrightarrow$  Austauscheteilchen: Spin 1



Postulat: Es gibt eine „Supersymmetrie“ zwischen Fermionen und Bosonen:

Zu jedem Teilchen existiert Partner mit Spindifferenz  $\frac{1}{2}$

Beispiele:

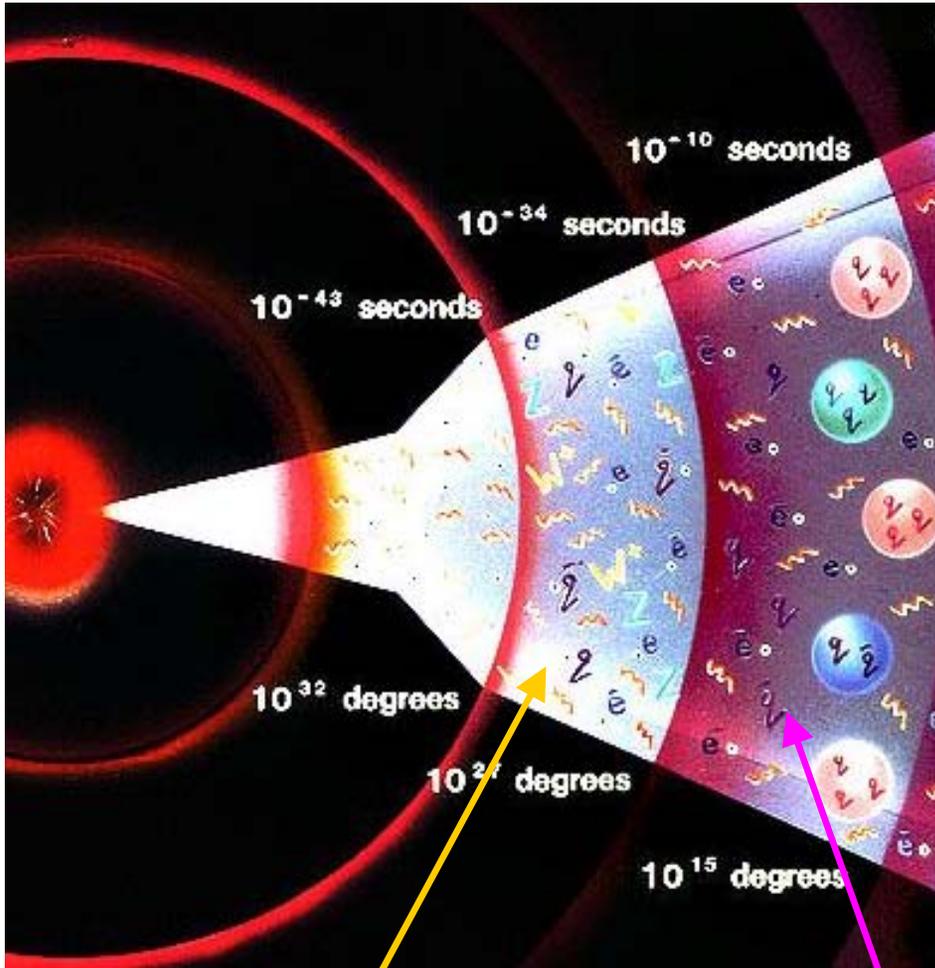
Teilchen	Spin	Partner	Spin
Elektron $e$	$1/2$	Selektron $\tilde{e}$	0
Top-Quark $t$	$1/2$	Stop $\tilde{t}$	0
Photon $\gamma$	1	Photino $\tilde{\gamma}$	$1/2$
W-Boson $W$	1	Wino $\tilde{W}$	$1/2$

Experimentelle

Massengrenzen:  $> 50$  GeV

Verbindung zur Astrophysik: Photino-Variante („Neutralino“) = Dunkle Materie ?

# Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Kosmos



Kann die im Labor gefundene kleine T-A-Asymmetrie dies erklären ???

.... wahrscheinlich nicht....

- 1) gleich viele T und A
- 2) Symmetrie wird „gebrochen“:  
pro 1000000000 A gibt es 1000000001 T
- 3) 1000000000 Paare zerstrahlen in Photonen, 1 T bleibt übrig

gleich viele Teilchen und Antiteilchen

fast nur noch Teilchen + Photonen

???

# Inhalt

- Übersicht: Teilchen und Wechselwirkungen
- Methoden: Beschleuniger und Detektoren
- Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik
- Offene Fragen
- **Teilchenphysik an der RWTH**

Institute und Projekte

CMS = Compact Muon Solenoid

AMS = Alpha Magnetic Spectrometer

LEP, Hera, Tevatron, Tesla

# Experimentelle Teilchenphysik in Aachen

Institute:

I B, III A, III B

**Theorie:**

Lehrstuhl E, III A

- CMS [LHC, CERN]
- AMS [ISS]
- [LEP], [Hera], [Tevatron], [Tesla]

# Teilchenphysik-Projekte Aachen

- CMS-Detektor am Proton-Kollider LHC/CERN
- AMS-Detektor auf der ISS (*International Space Station*)
- Elektron-Positron-Speicherring LEP/CERN  
Experimente ALEPH, L3
- H1-Experiment am Elektron-Proton-Ring HERA/DESY
- D0-Experiment am Proton-Antiproton-Kollider  
Tevatron am Fermilab
- Elektron-Linearbeschleuniger TESLA

# Zukunftsprojekt LHC am CERN

LHC = Large Hadron Collider  
7 TeV p + 7 TeV p

**CMS** ← Aachen

## Physik:

Higgs-Boson !

Supersymmetrische Teilchen ?

CP-Verletzung

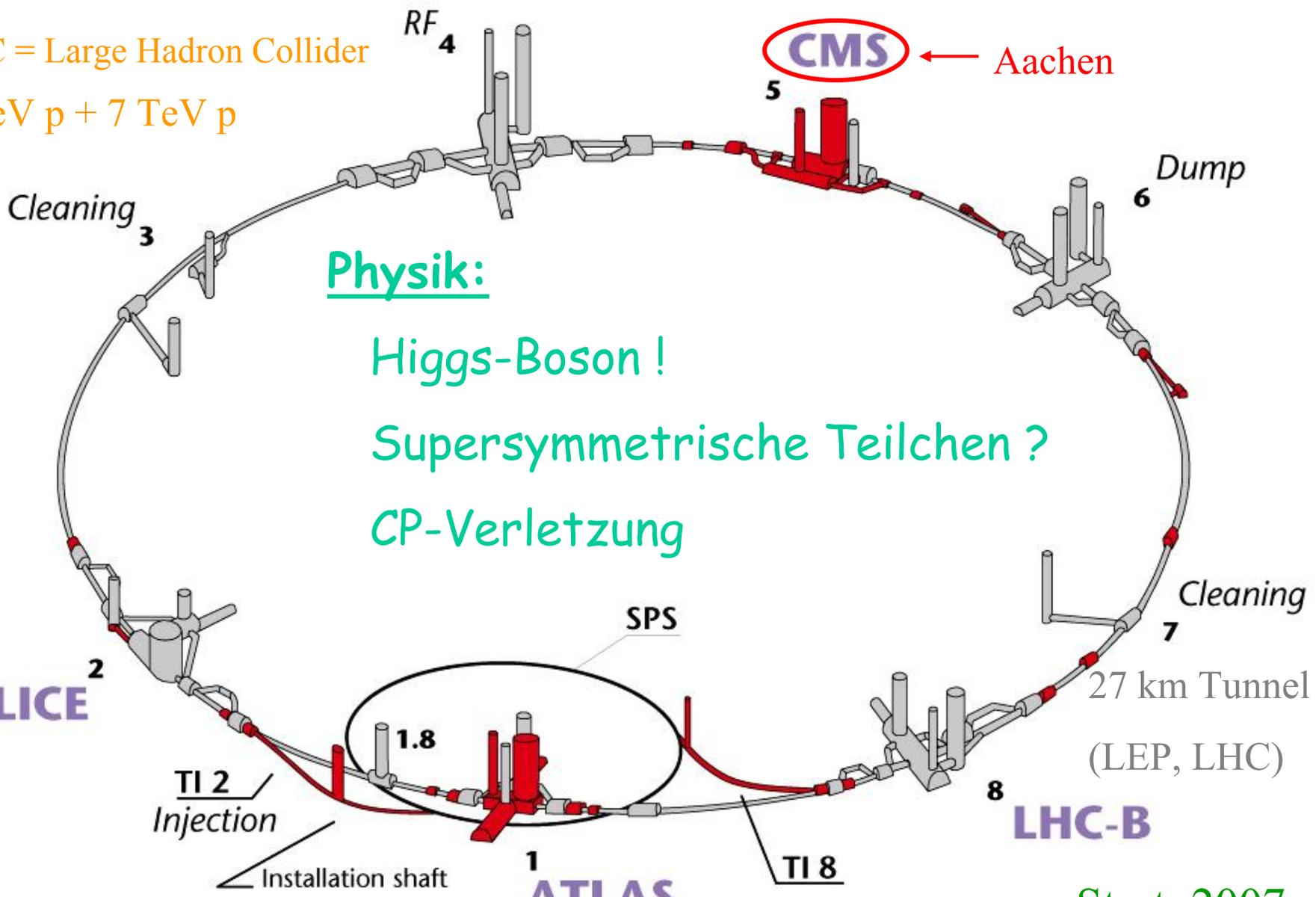
**ALICE**

**LHC-B**

**ATLAS**

Start: 2007

■ Future constructions  
■ Existing underground buildings



# Higgs-Ereignis im CMS-Spurdetektor

Simulation!

# CMS

$H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$

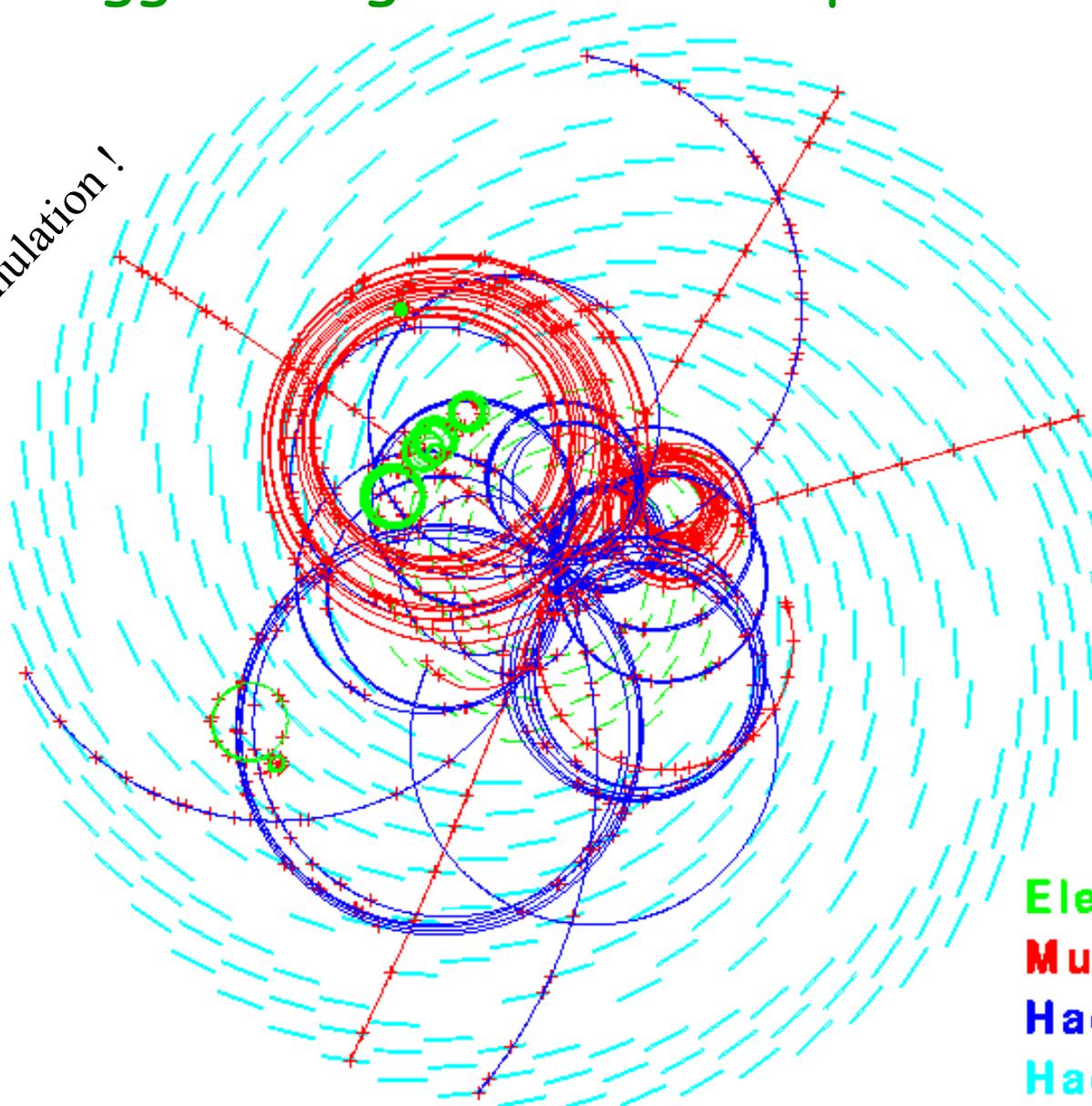
$m(H) = 150 \text{ GeV}$

Electrons

Muons

Hadrons  $p_t < 2 \text{ GeV}$

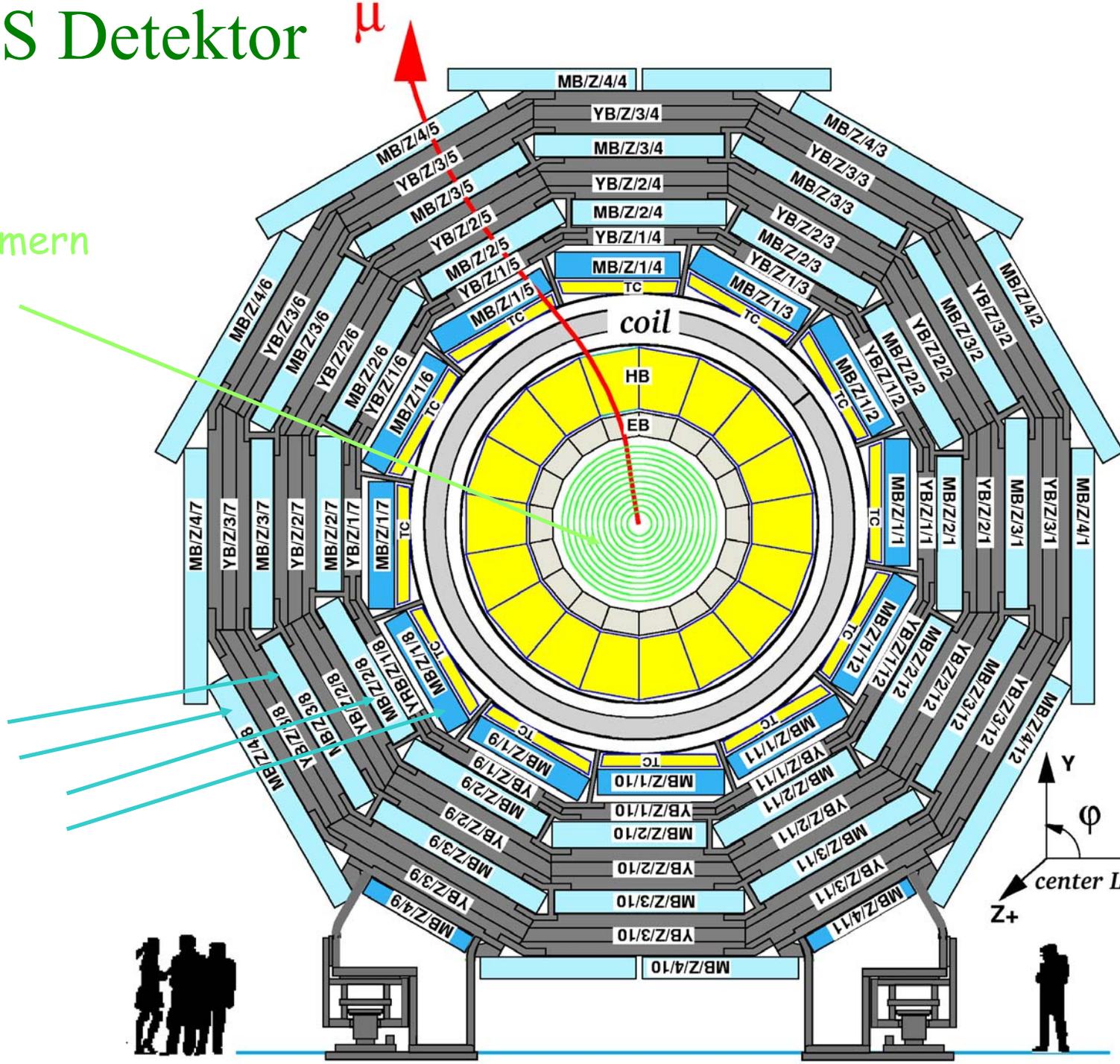
Hadrons  $p_t > 2 \text{ GeV}$



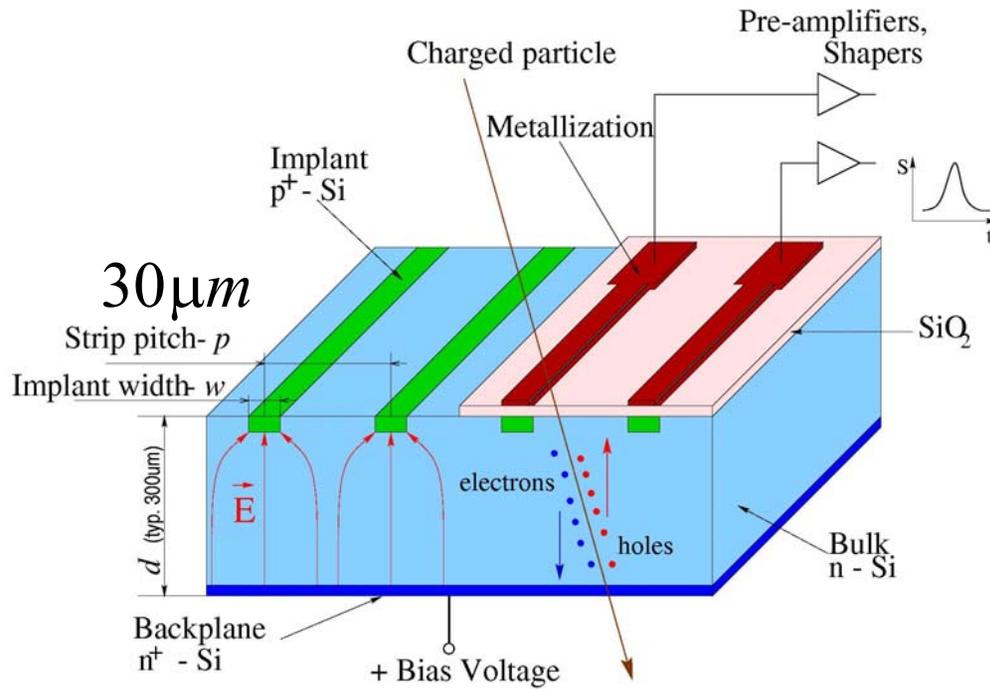
# Der CMS Detektor

- Innere Spur-kammern (Silizium)

- Myon-Detektor

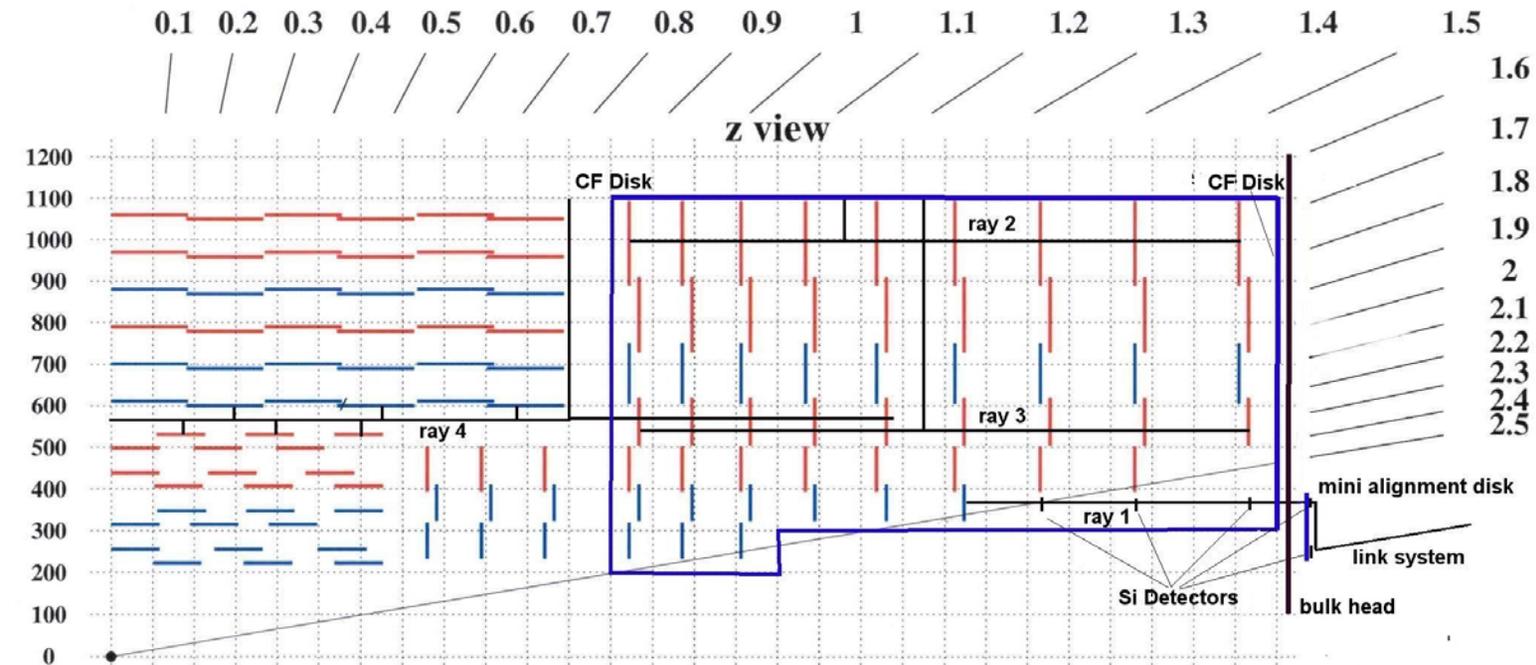
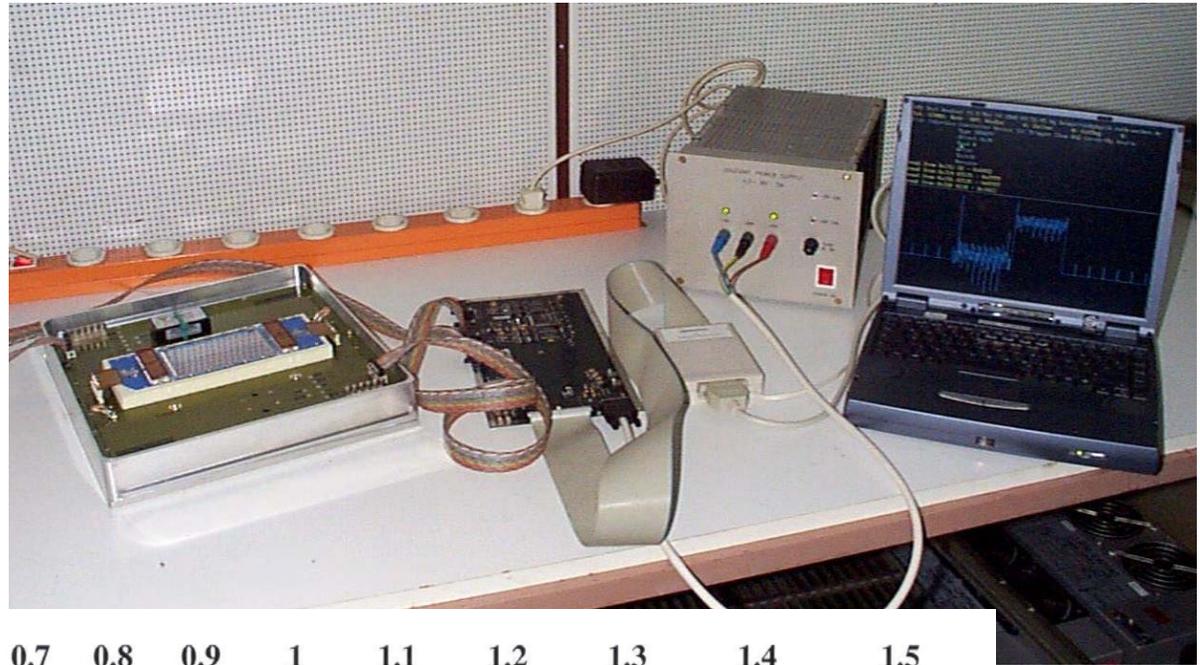


# Der CMS Silizium-Detektor



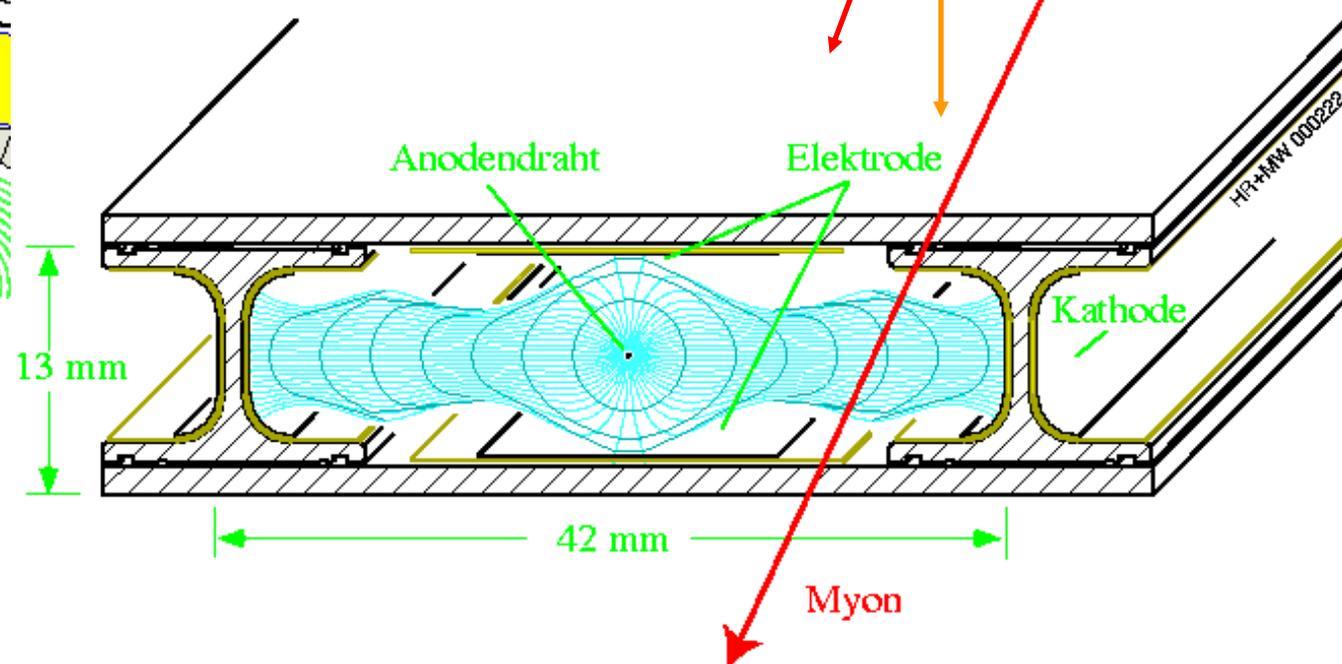
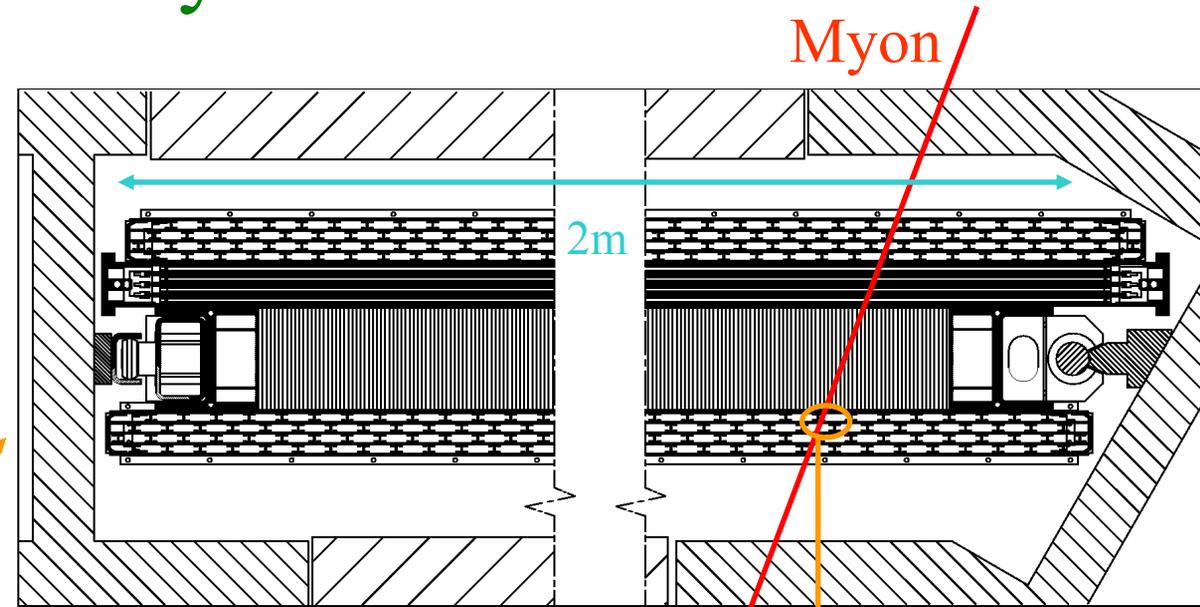
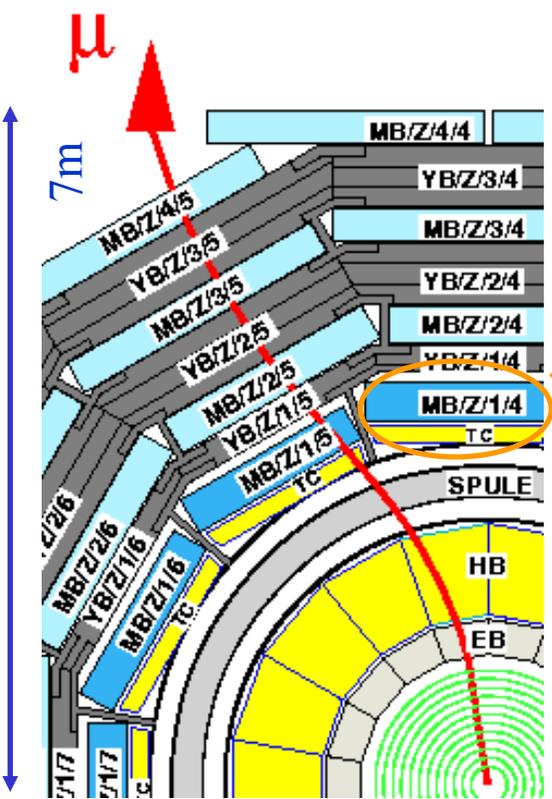
# Silizium-Spurdetektor Aachen

Auslese-Elektronik:



Laser-  
Alignment

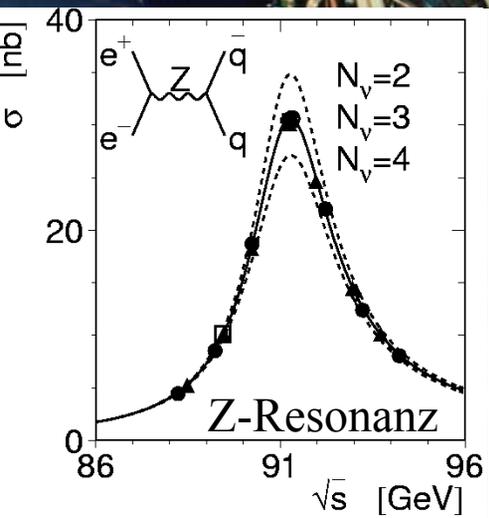
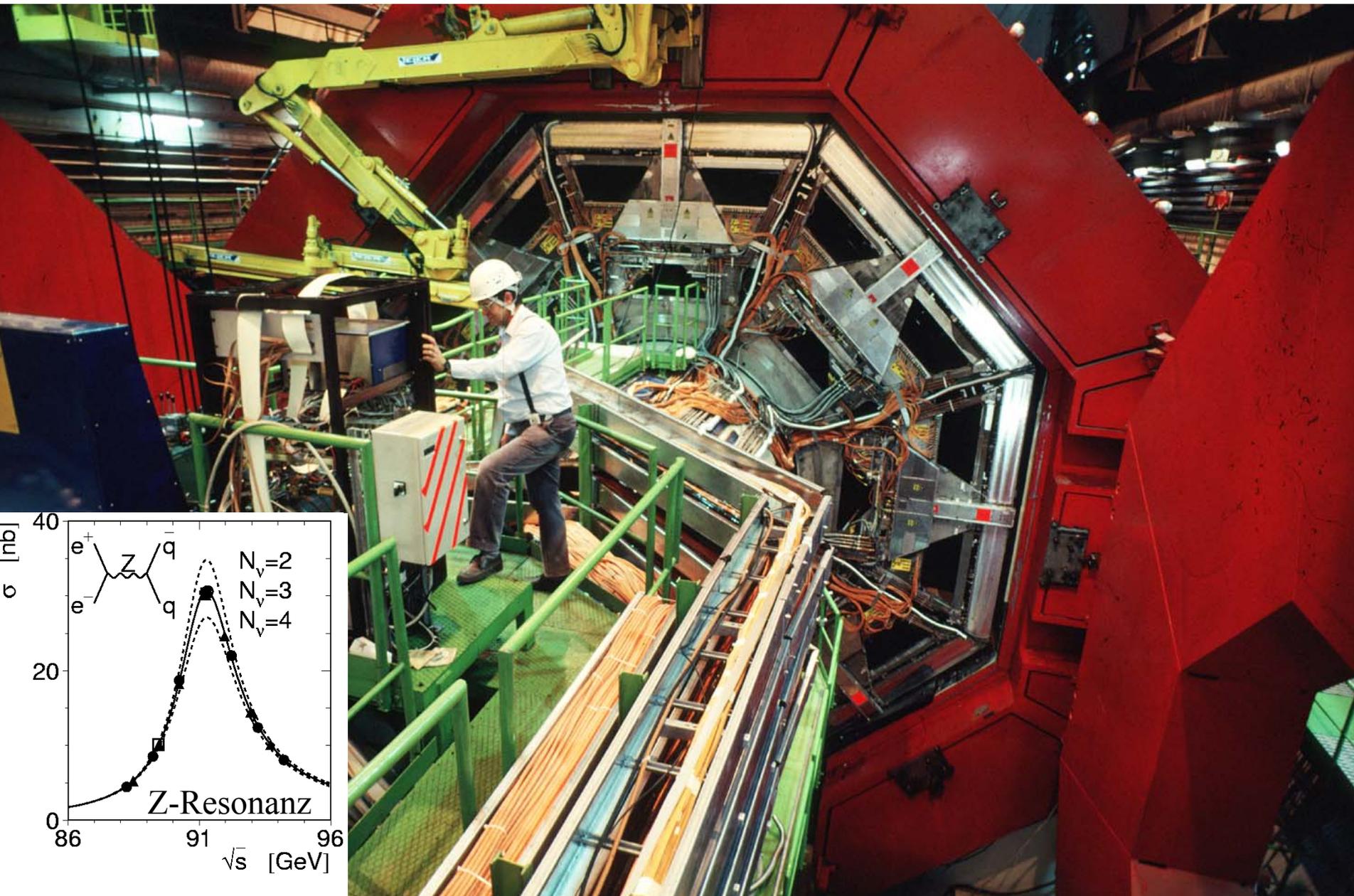
# Die CMS-Myonkammern



# Kammerproduktion Aachen



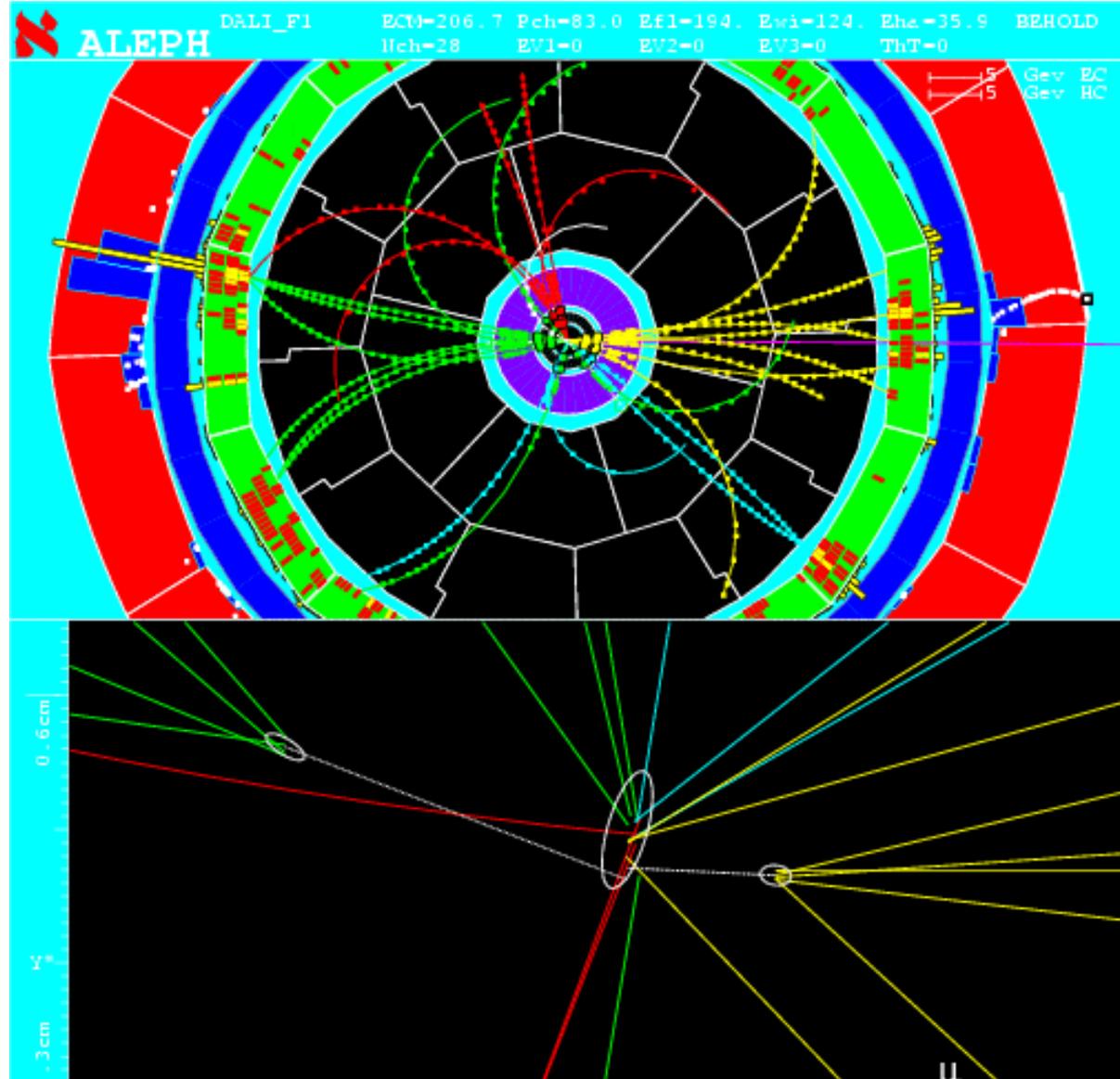
# LEP-Detektor L3



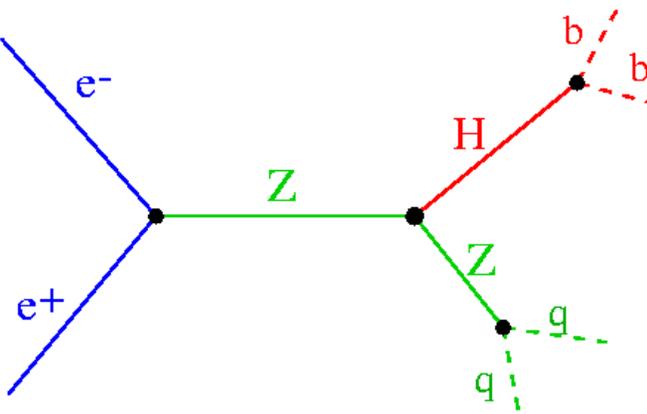
# LEP-Datenauswertung (ALEPH, L3)

BEISPIEL

## Higgs- Suche



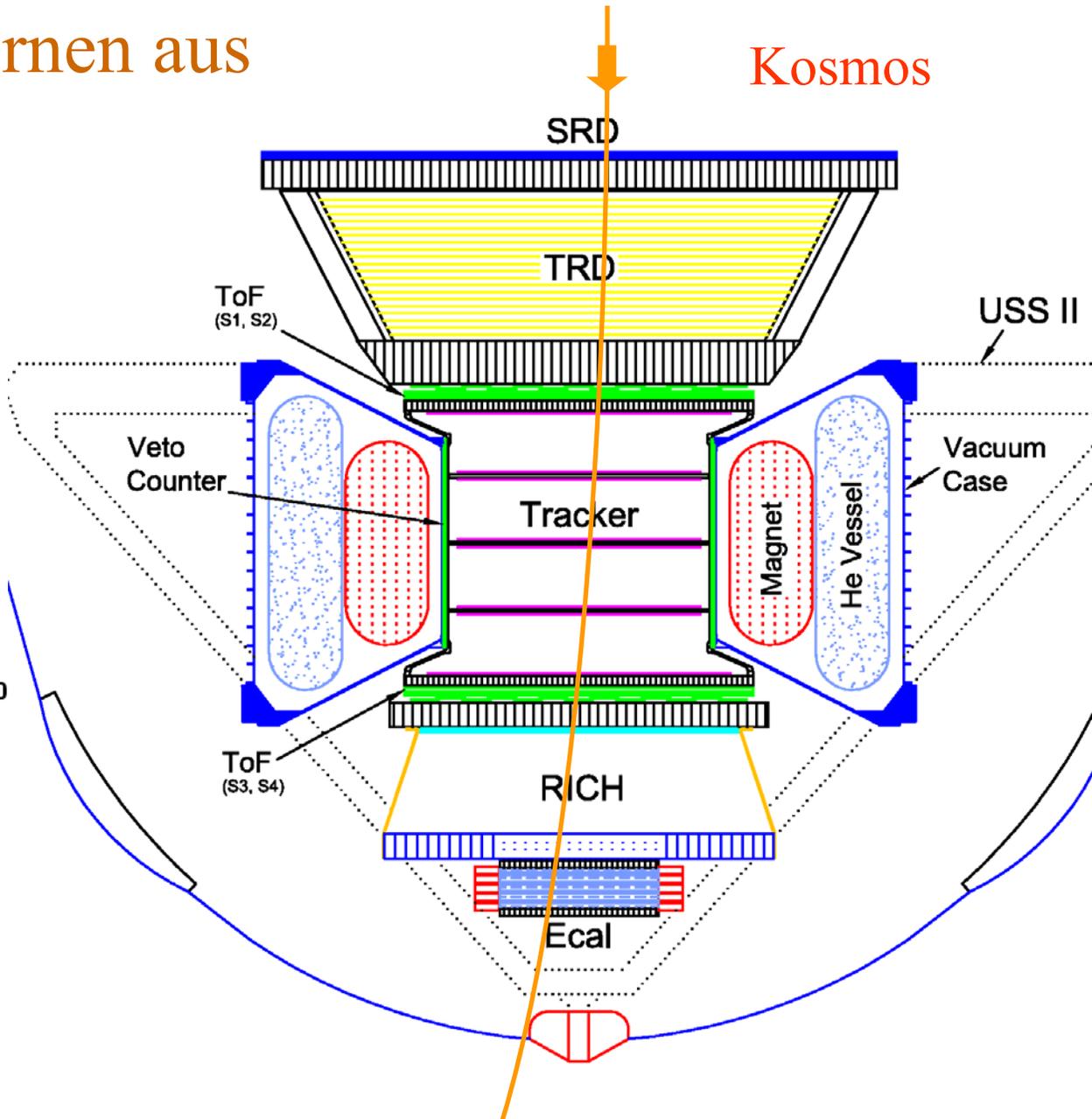
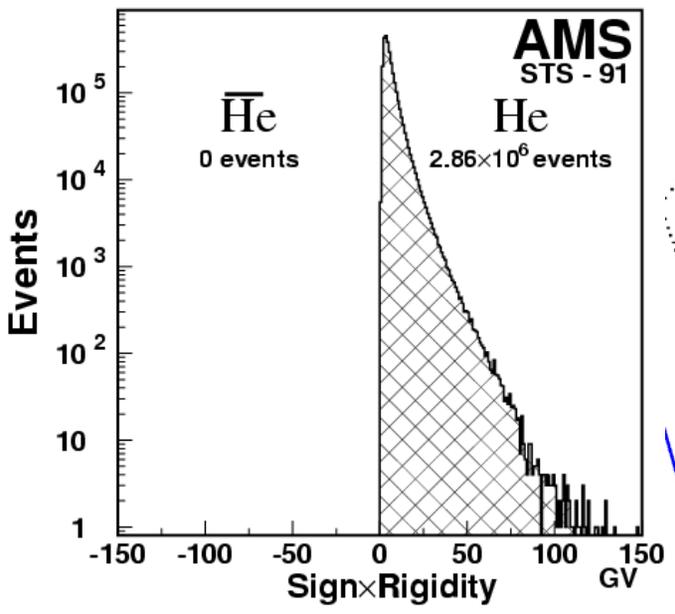
Erzeugung und Zerfall  
bei LEP:



# AMS=Alpha Magnetic Spectrometer

aus dem  
Kosmos

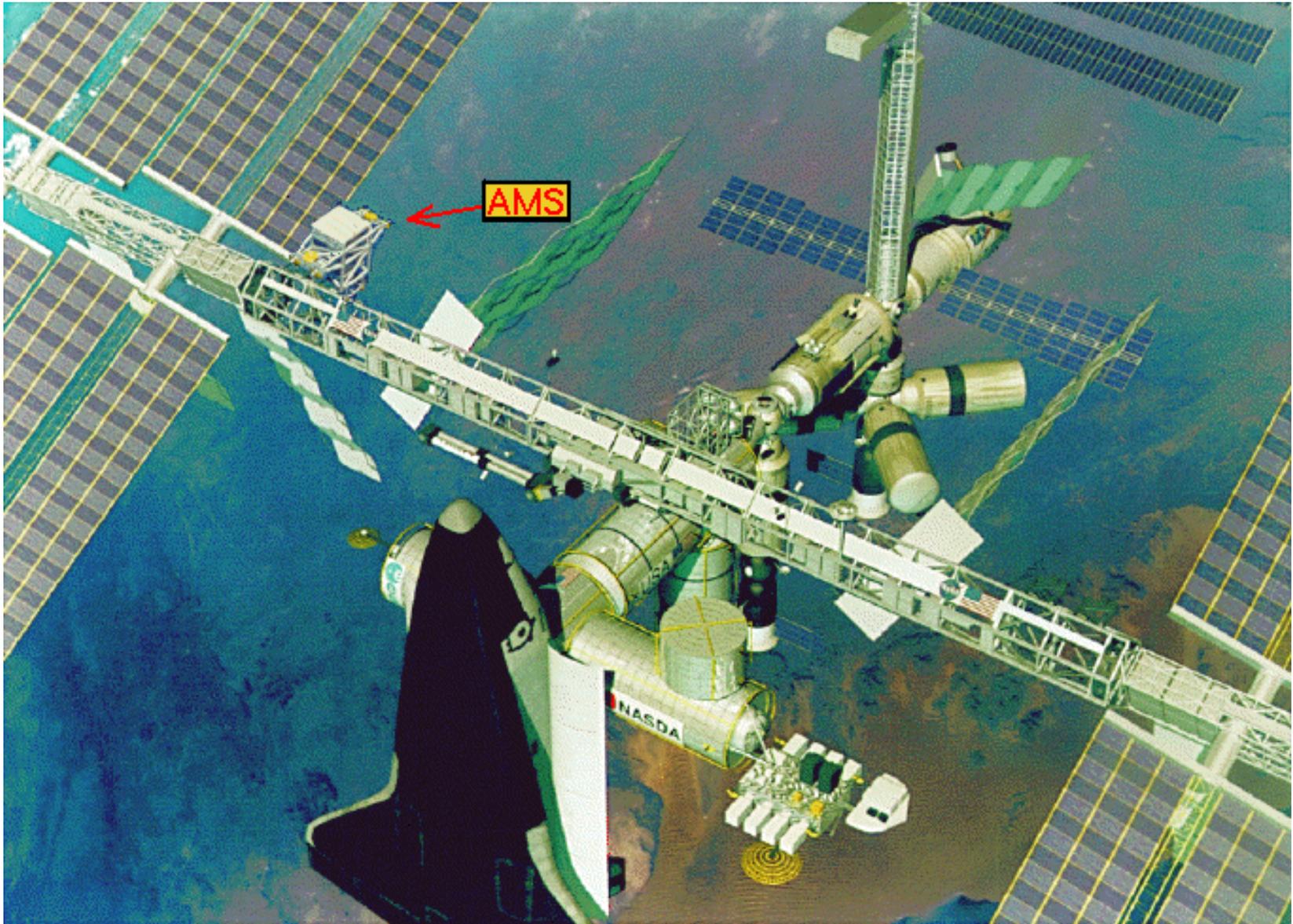
## Suche nach Antikernen aus Antigalaxien (u.a.)



Aachen:

- Übergangsstrahlung
- Alignment
- Antizähler

AMS = AlphaMagneticSpectrometer = AntiMatterSearch



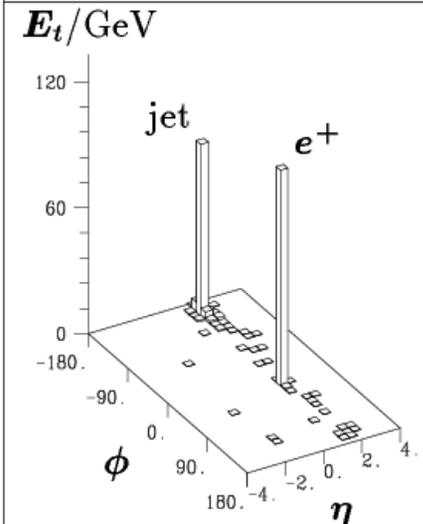
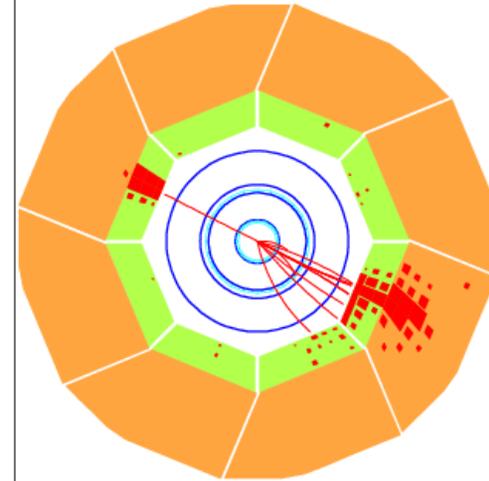
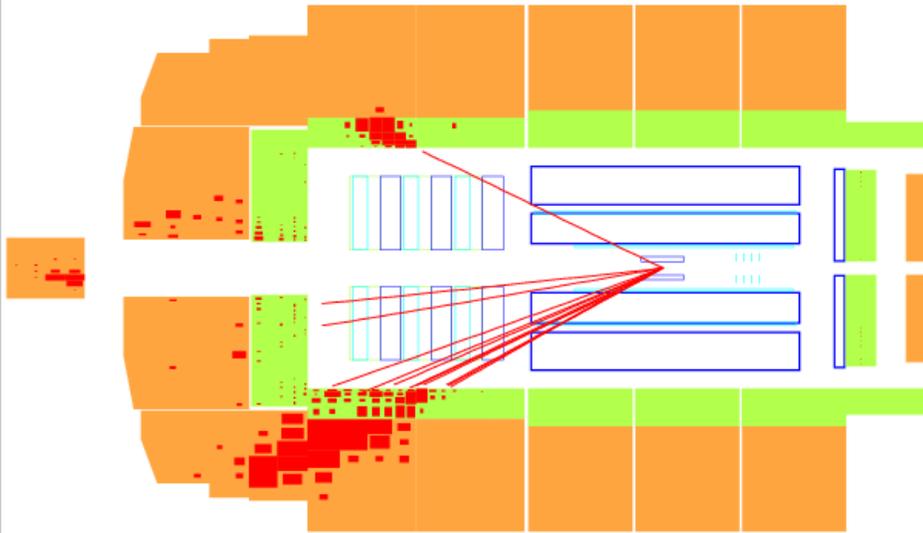
Ergebnis: Bisher kein Antihelium ... gefunden

# H1-Experiment bei HERA/DESY

H1 Run 122145 Event 69506

Date 19/09/1995

$$Q^2 = 25030 \text{ GeV}^2, \quad y = 0.56, \quad M = 211 \text{ GeV}$$



$$e^+ p \rightarrow e^+ jet$$



Physik:

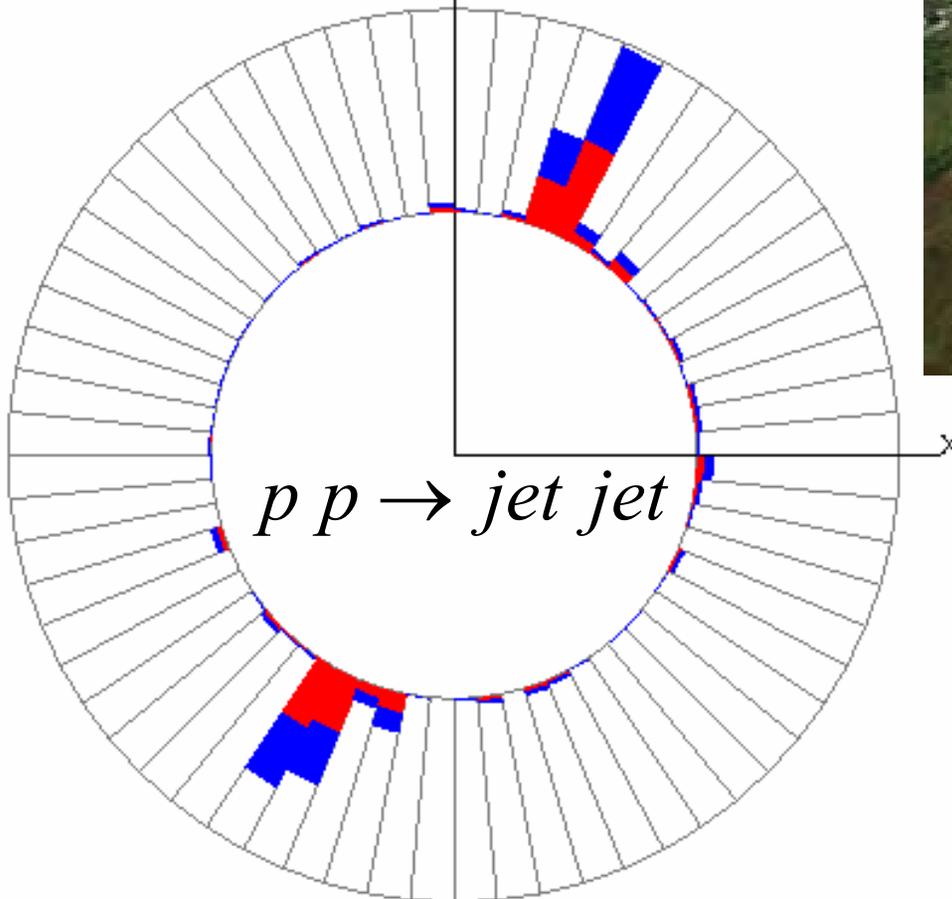
- Struktur Proton
- starke WW
- neue Teilchen
- ...

# D0-Experiment am Tevatron

$p (1 \text{ TeV}) + \bar{p} (1 \text{ TeV})$

Bisher:

Top-Physik, QCD, ...



Seit 2001 (erhöhte Luminosität):

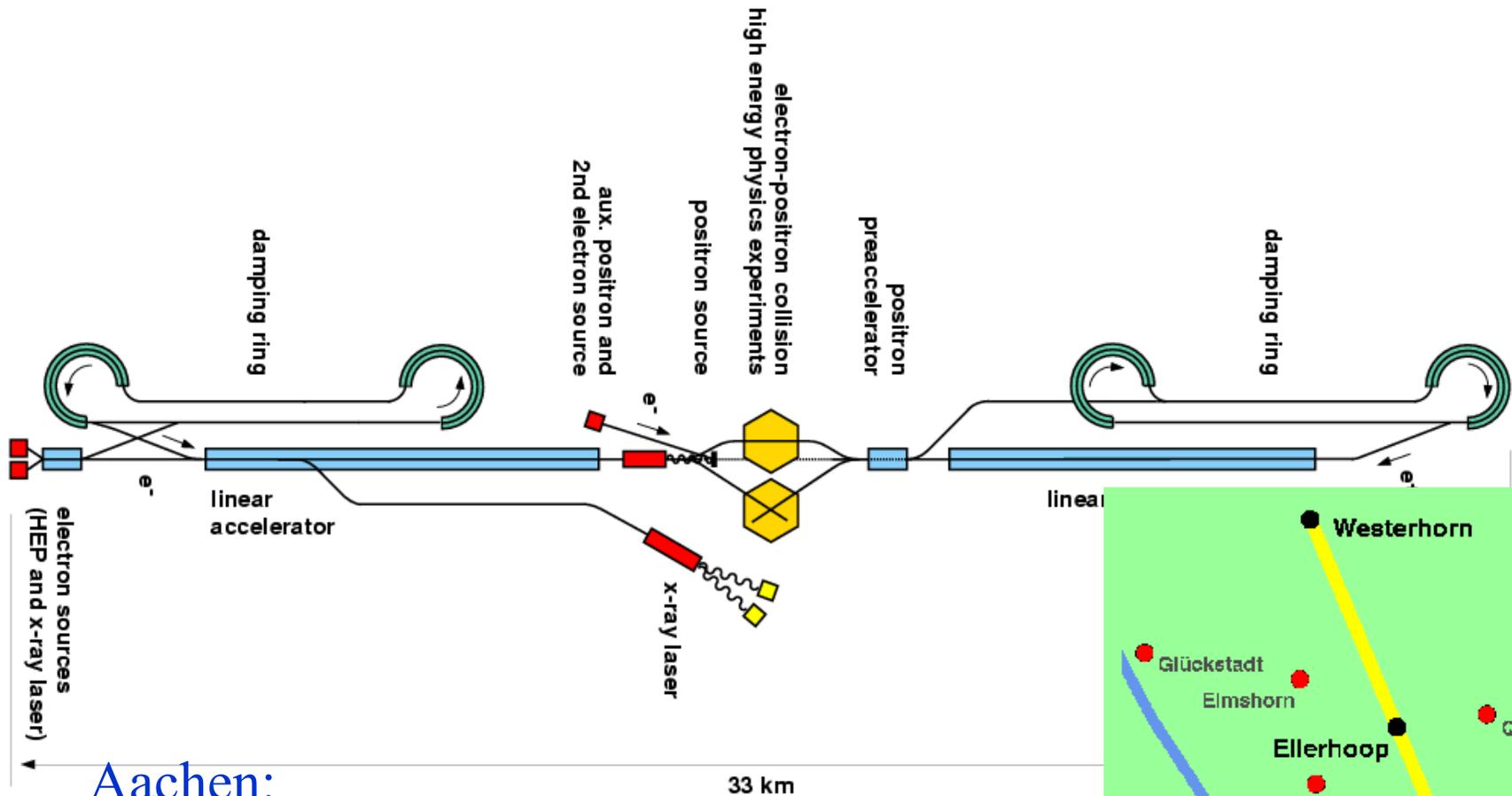
Suche nach

- Higgs
- Supersymmetrie ...

# Vision: TESLA-Linearbeschleuniger + Detektor

= TeV Energy Superconducting Linear Accelerator

( $e^+e^-$  500 GeV)



Aachen:

- Beschleunigerphysik
- Detektorentwicklung

