

Elementarteilchenphysik I RWTH SS 2007

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

Materie: Leptonen und Quarks

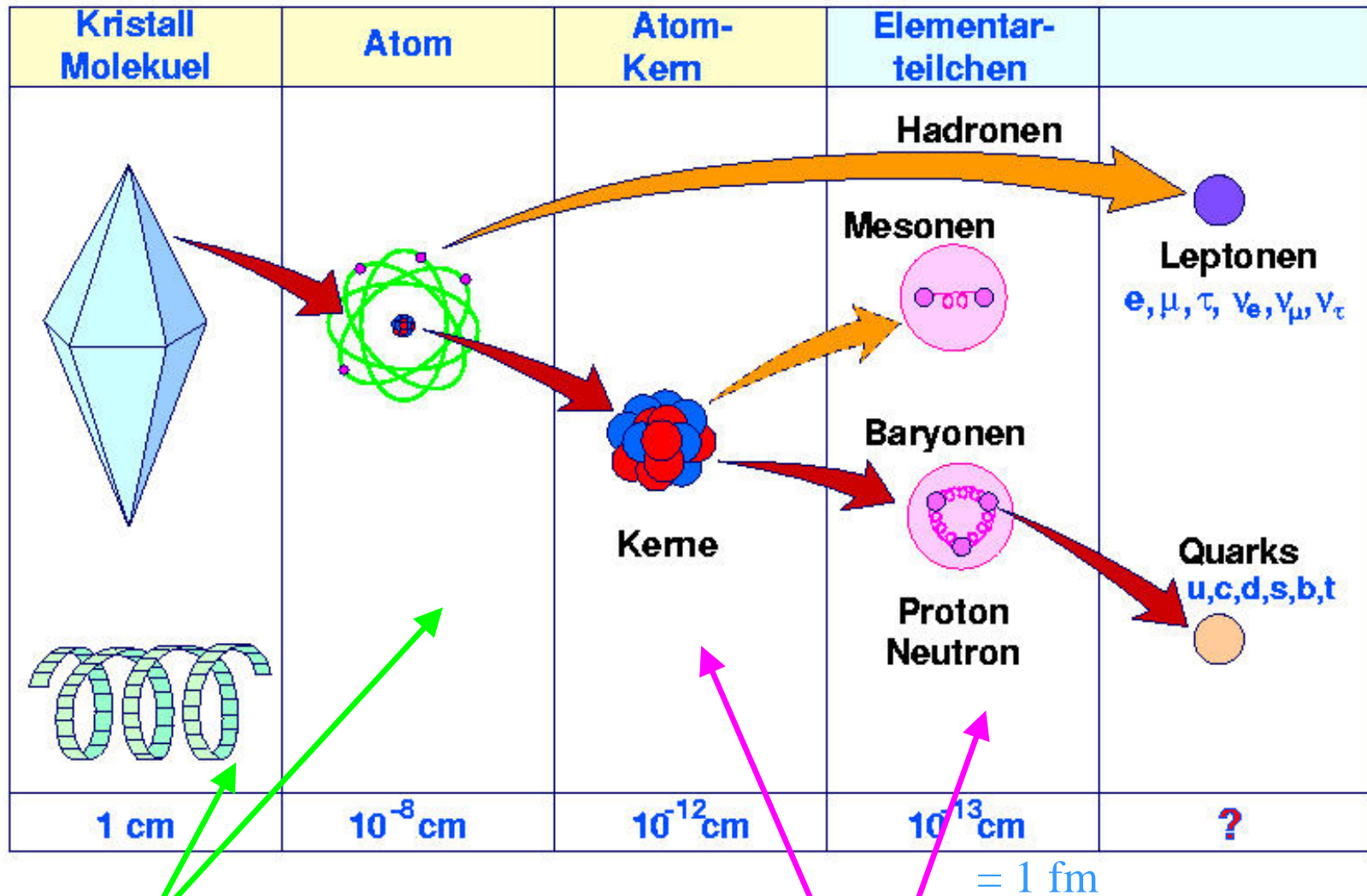
Kräfte: Die vier Wechselwirkungen

Theoretische Beschreibung: Feynman-Diagramme

Das Standardmodell

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

Die Struktur der Materie



elektromagnetische Kraft
(= elm. Wechselwirkung)

Kernkraft ~ starke Wechselwirkung

Grundlagen der Teilchenphysik

$$200 \text{ MeV} \leftrightarrow 1 \text{ f}$$

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

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

$\begin{pmatrix} u & u & u \\ d & d & d \end{pmatrix}$	up-Quark	2/3	5 MeV	} (3 „Farb“-Varianten)
	down-Quark	-1/3	10 MeV	
	<i>(nicht „direkt“ beobachtbar)</i>			

Kerne: Proton (938 MeV) = $u u d$, (Neutron), He, Li, ..., **Mesonen** = $q \bar{q}$

Elementarteilchen mit Spin $1/2$ (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:

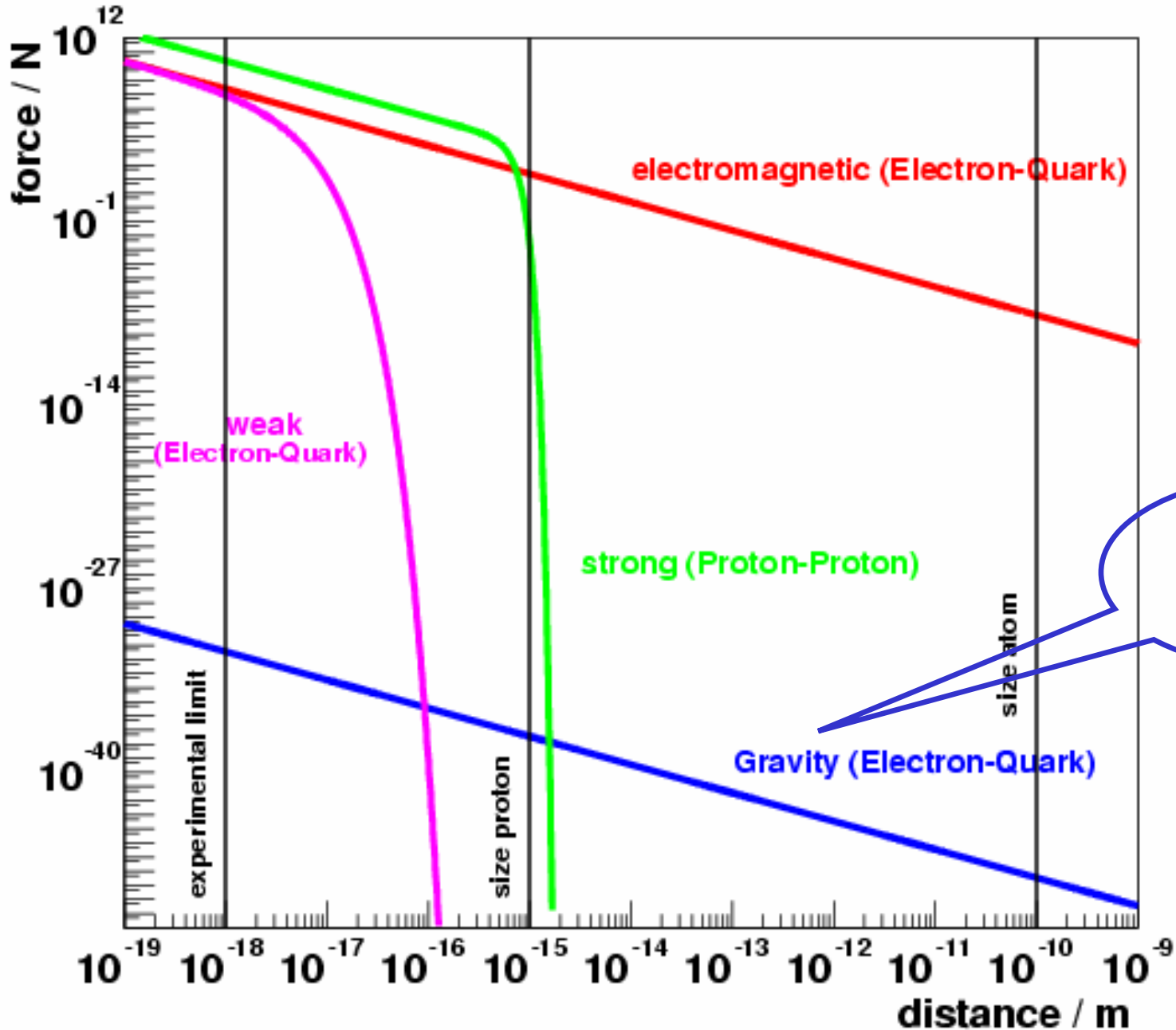
a) Nukleonen im Kern

b) $p + n \rightarrow d$

Quarks im Nukleon

(Fusion zu Deuteron)

Stärke und Reichweite der Kräfte



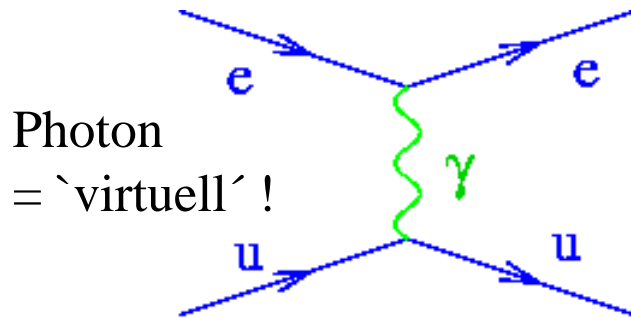
Zu schwach
für direkte
Messungen

Beschreibung der Wechselwirkungen

Feynman-Diagramme: Visualisierung und
Berechnung von Wahrscheinlichkeiten

Beispiele:

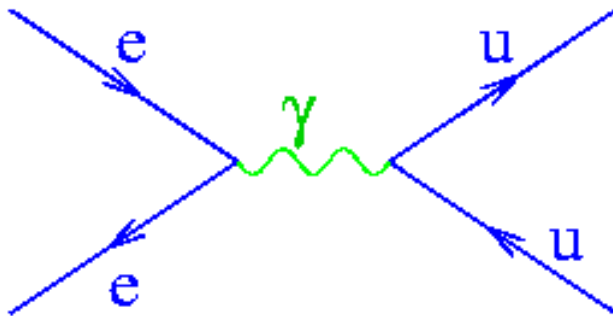
Elastische Elektron-Quark-Streuung (elm. WW):



Photon
= 'virtuell' !

Kräfte: Austauschteilchen
mit Spin 1 (Bosonen)

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



Photon = 'virtuell' !

**messbar:
nur ein- und
auslaufende
Teilchen !**

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Materie: Spin 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!

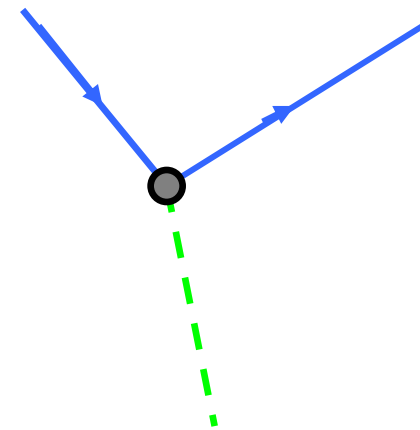
Wechselwirkungen: Spin 1 – Eichbosonen:

elektroschwach:

Photon	γ	masselos
Z-Boson	Z	91 GeV
W-Boson	W^+ W^-	80 GeV

stark:

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



Experimentelle Daten werden akkurat beschrieben! ($10^{-18} m$)

Inhalt

- Übersicht: Teilchen und Wechselwirkungen

- **Methoden: Beschleuniger und Detektoren**

 - Strukturuntersuchungen

 - Teilchenphysik und Kosmologie

 - Teilchenbeschleuniger:

 - Prinzipien, Beispiele

 - Teilchendetektoren:

 - Prinzipien, Beispiele

- **Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik**

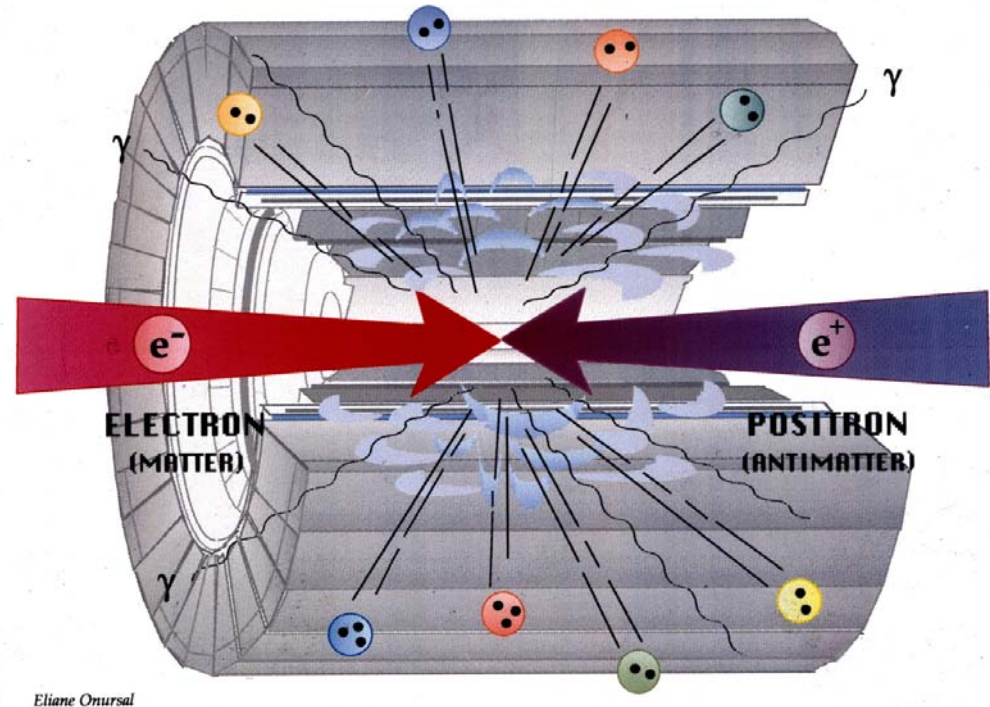
- **Offene Fragen**

- **Teilchenphysik an der RWTH**

Methoden der experimentellen Teilchenphysik

Werkzeuge:

- Teilchenbeschleuniger
- Teilchendetektoren



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

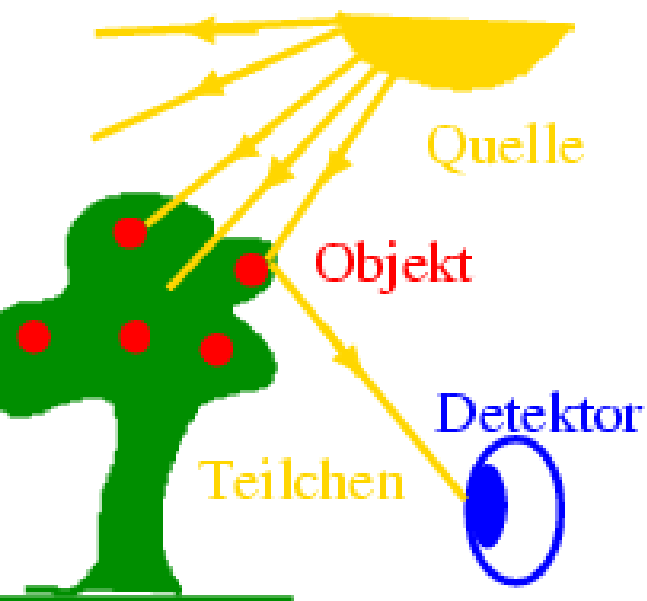
Studium der Kräfte bei hohen Energien:
(Big Bang!)

Neue schwere Teilchen (Masse m):

HOHE

ENERGIE !

Strukturuntersuchung

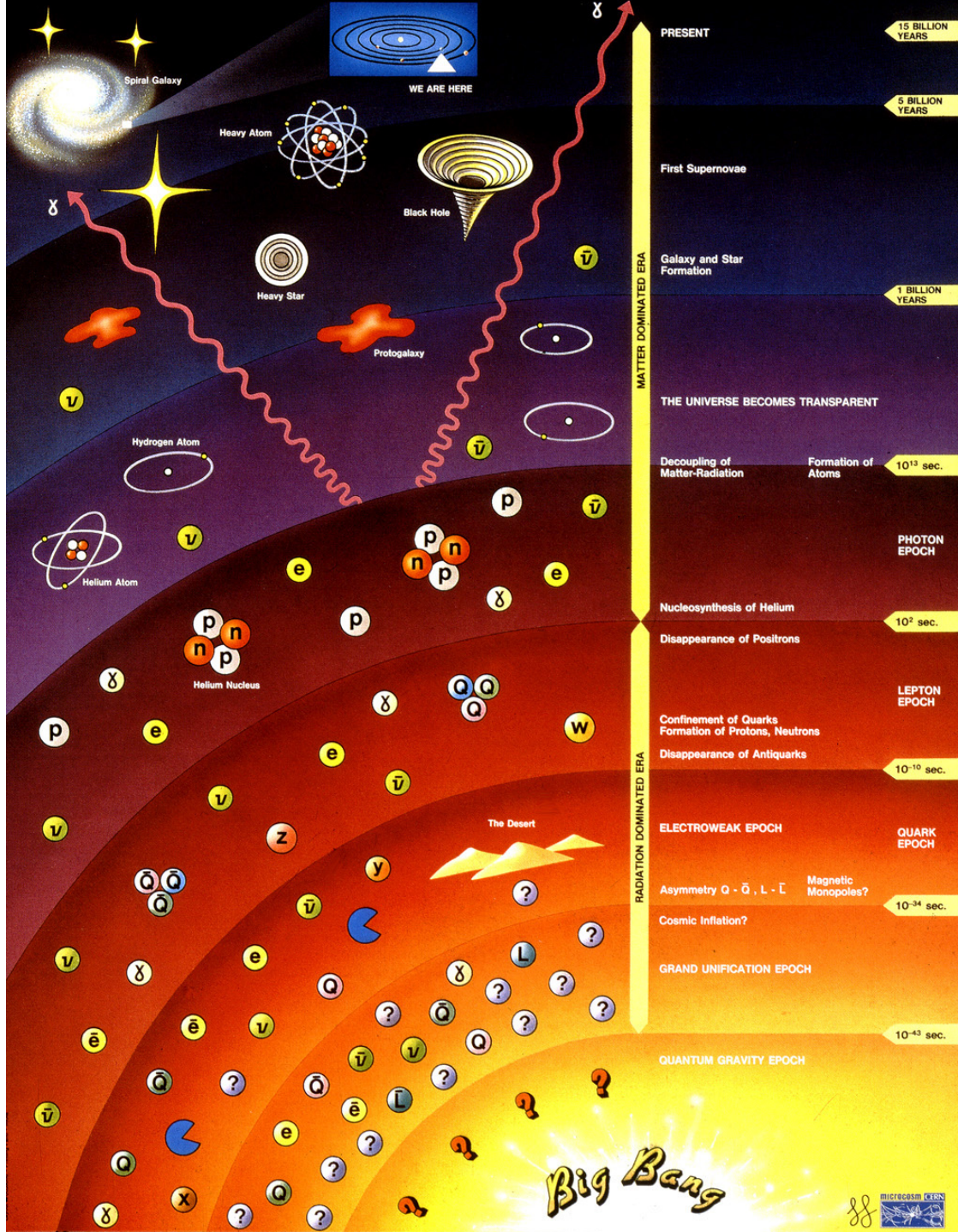


Prinzip: Streuung liefert Information über Objekt

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} m	100000 eV
Elektronen	Teilchen- beschleuniger	Teilchen- detektor	10^{-18} m	100 GeV

Teilchenphysik und Kosmologie



Dunkle Materie =
Neutralino ?
(Supersymmetrie)

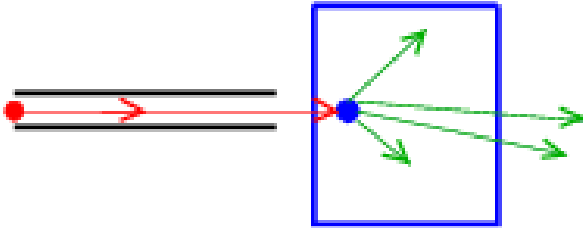
Teilchenbeschleuniger
untersuchen Prozesse
 10^{-10} s nach dem Urknall
(100 GeV)

Materie- Antimaterie-
Asymmetrie ?

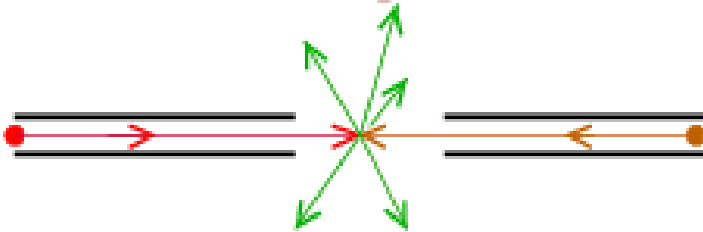
Teilchenkollisionen

Drei Möglichkeiten:

- Teilchen werden auf ruhende Materie geschossen



- Zwei Beschleuniger schießen Teilchen aufeinander



Hohe Kollisionsenergie!

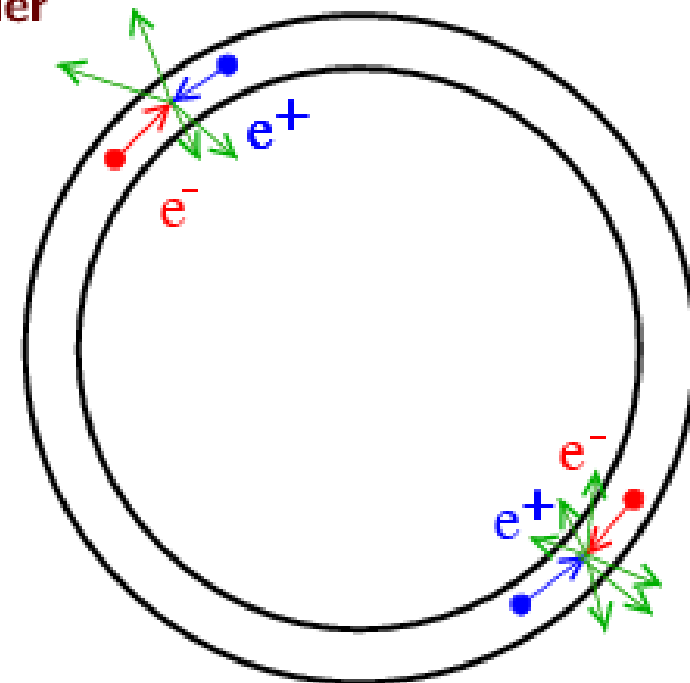
- EIN Ring mit entgegenlaufenden
Teilchen und Antiteilchen

Hohe Kollisionsenergie! Elegant!

Teilchensorten:

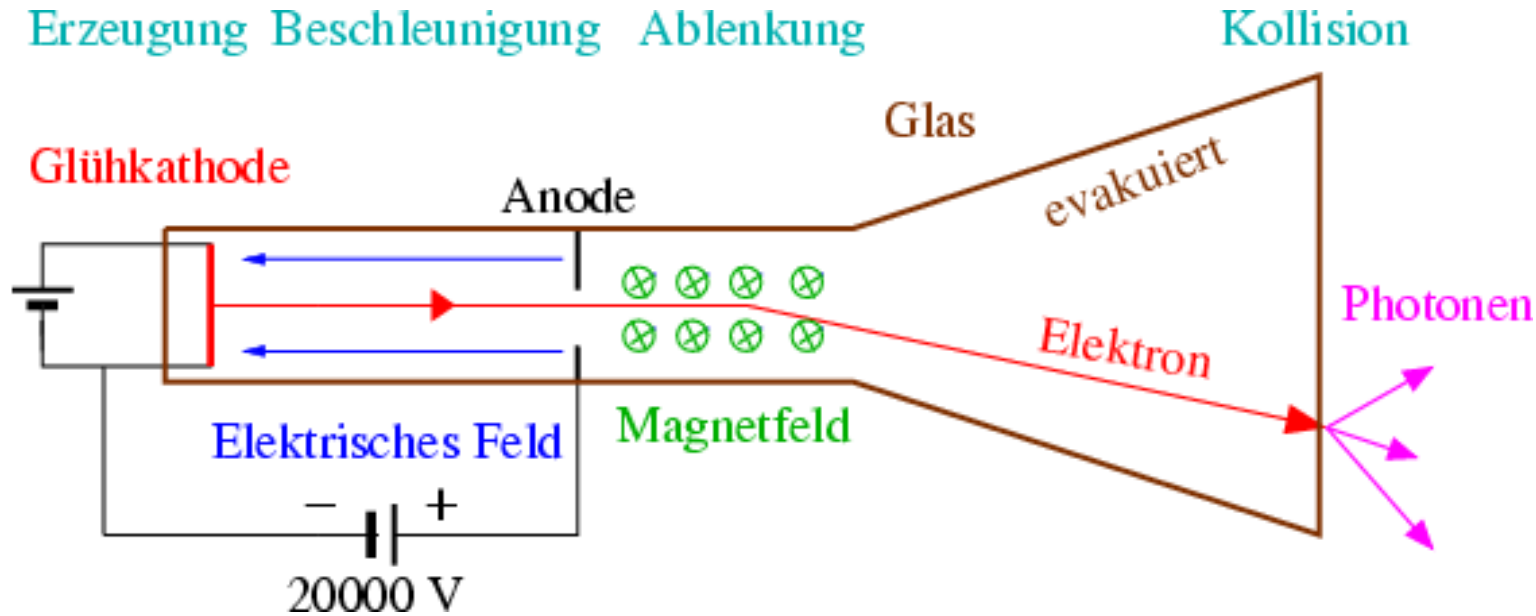
p, e und Antiteilchen

Kerne

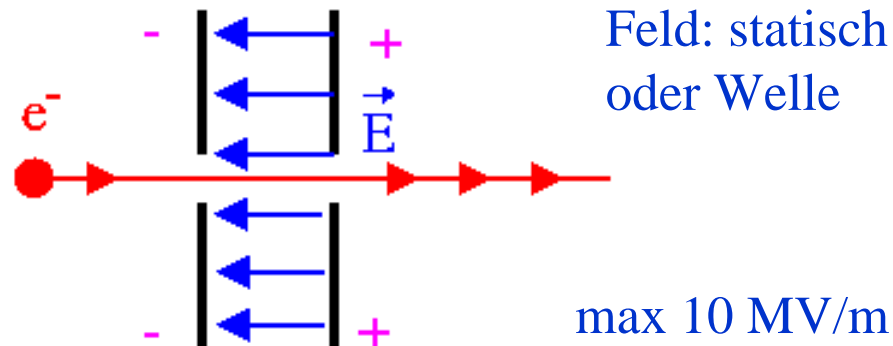


Teilchenbeschleuniger

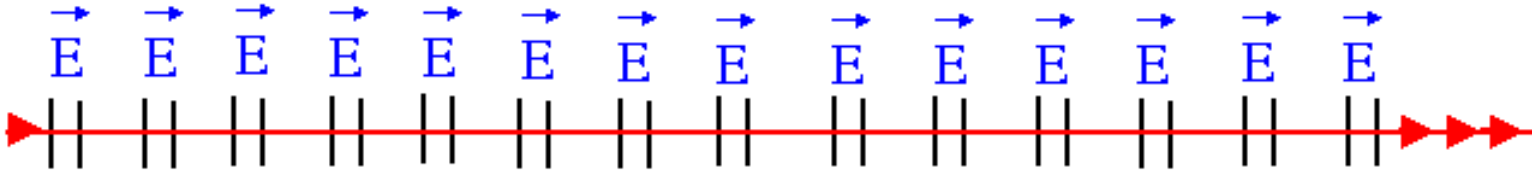
Prototyp: Braunsche Röhre



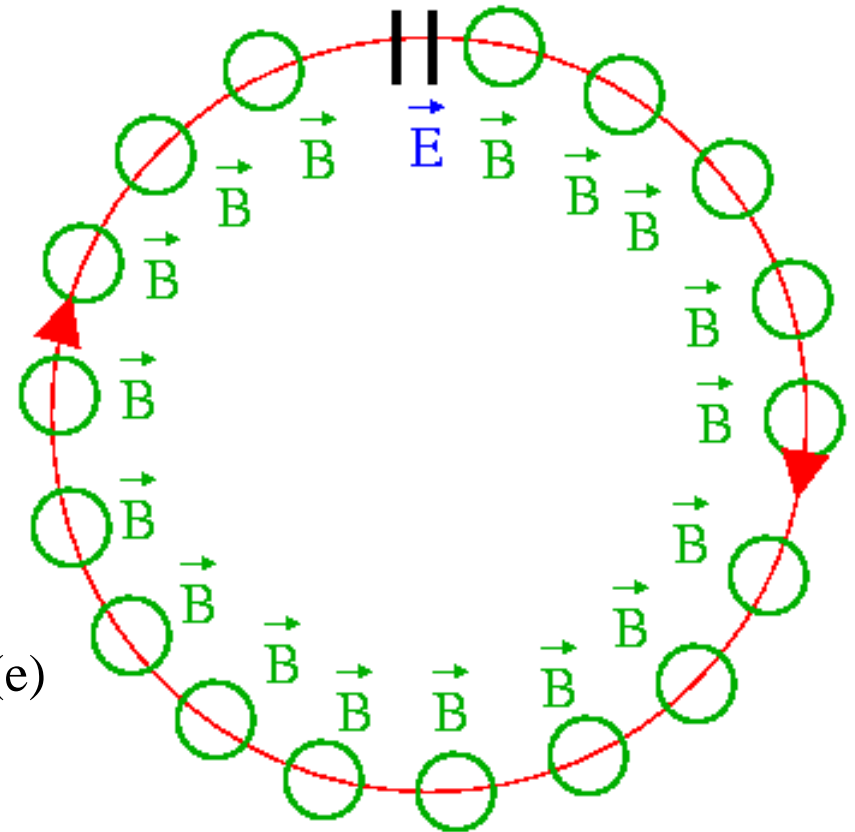
Energiezufuhr nur im elektrischen Feld:



Linear oder zirkular ?

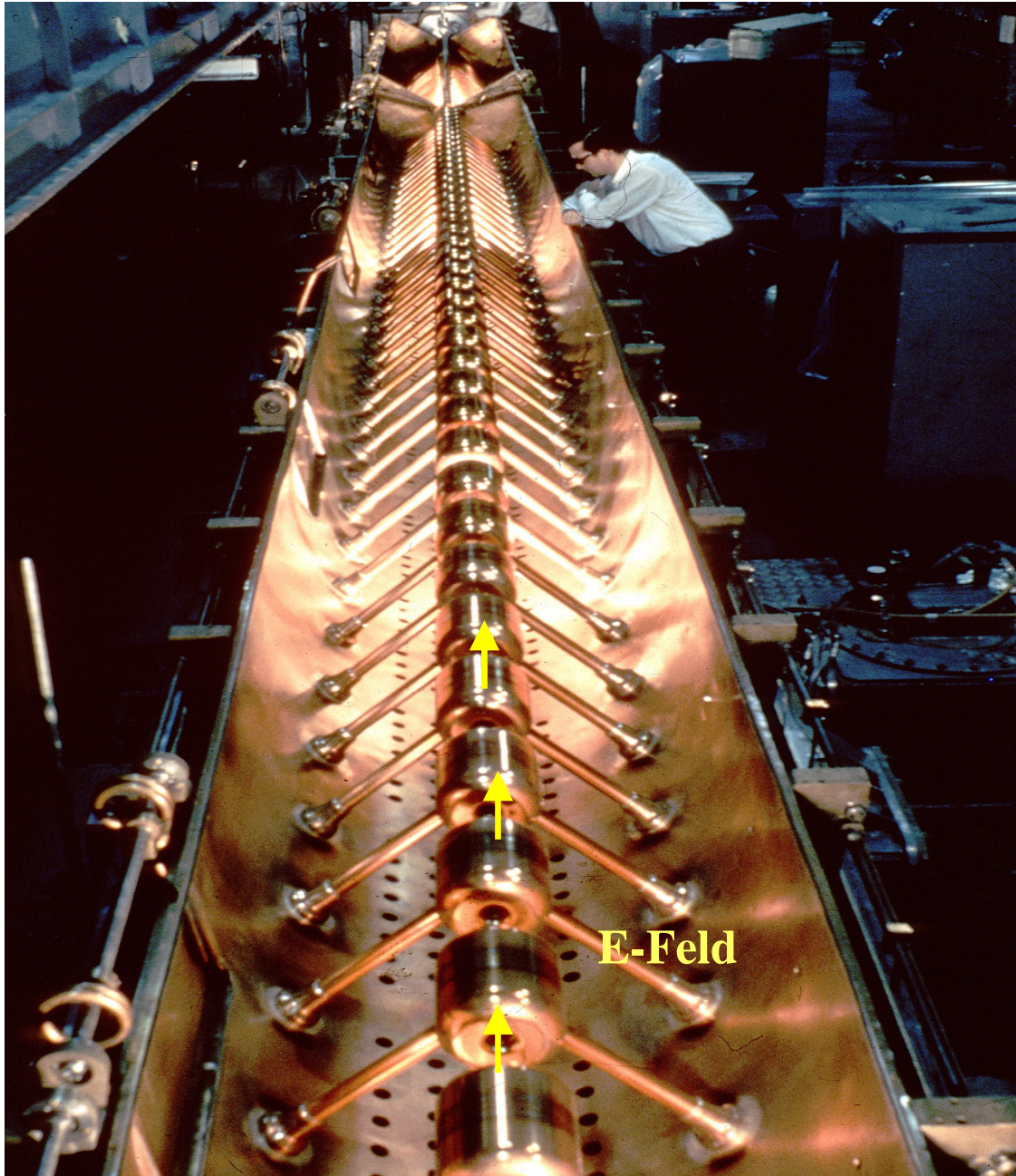


- + Teilchen-Antiteilchen-Kollisionen
- + „Recycling“
- Hohe Synchrotronstrahlungsverluste (e)



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

Linearbeschleuniger



CERN 1968

Protonen

$$E_{kin} = 50 \text{ MeV}$$

E-Feld

Forschungszentren und Beschleuniger

FERMILAB (USA)
[TEVATRON]

SLAC (USA)
[PEP-II]

KEK (Japan)

● DESY [HERA]

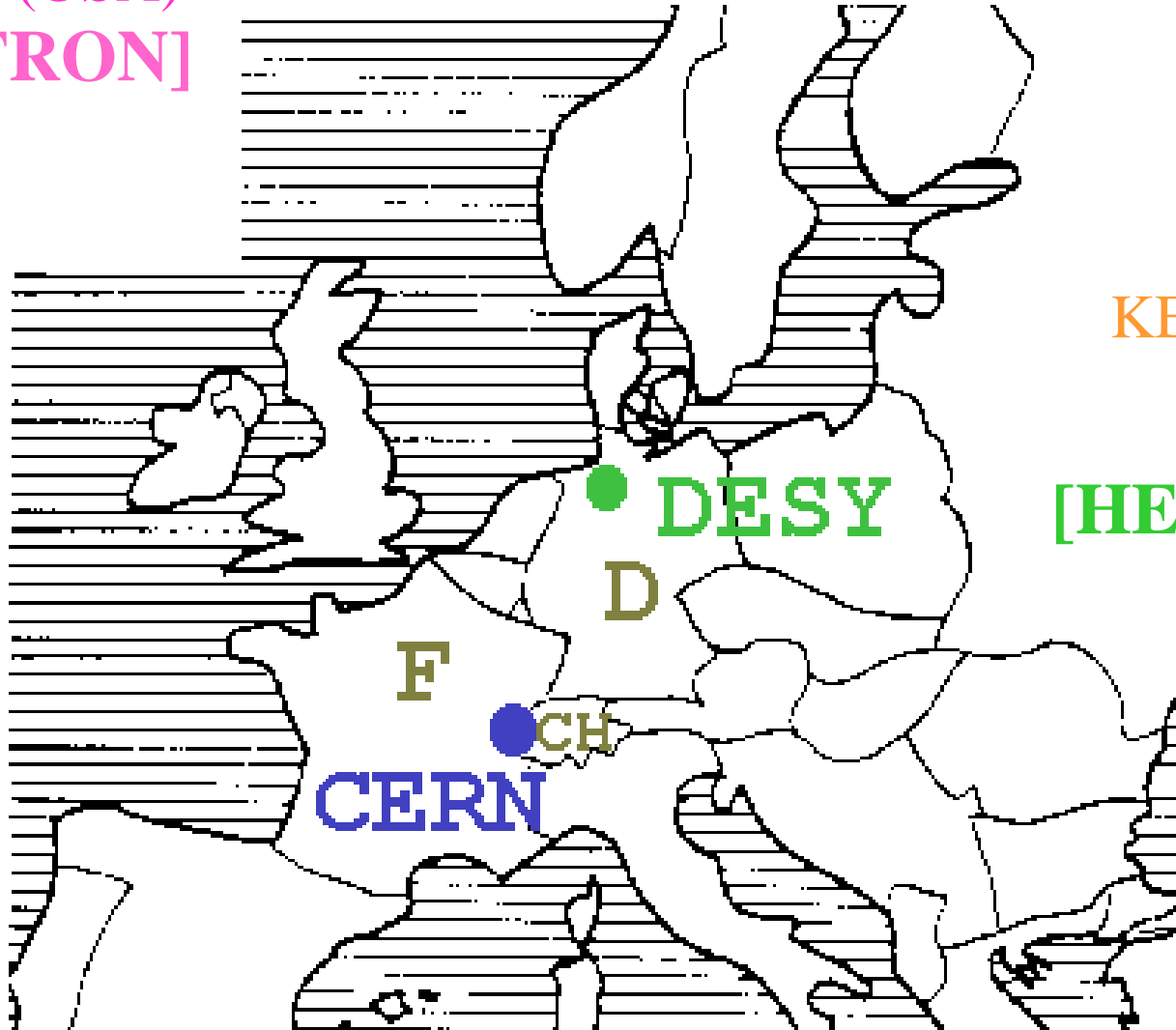
D

F

● CH

CERN

[LEP, LHC]

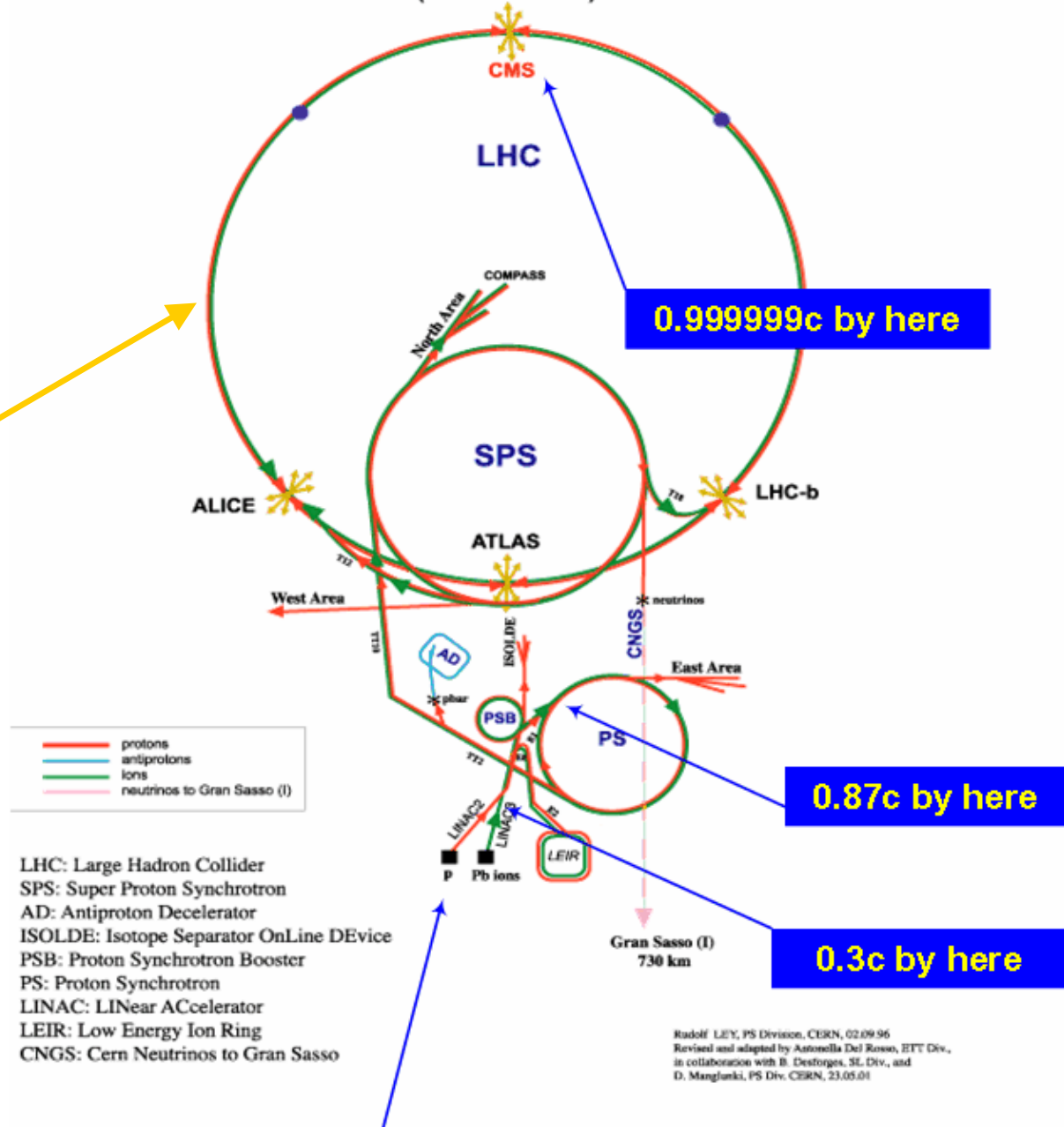


LHC (CERN)

Large Hadron Collider

Fast 10000 Magnete,
davon 1232 supraleitende
Dipole (8 Tesla)

CERN Accelerators (not to scale)



0.999999c by here

0.87c by here

0.3c by here

Start the protons out here

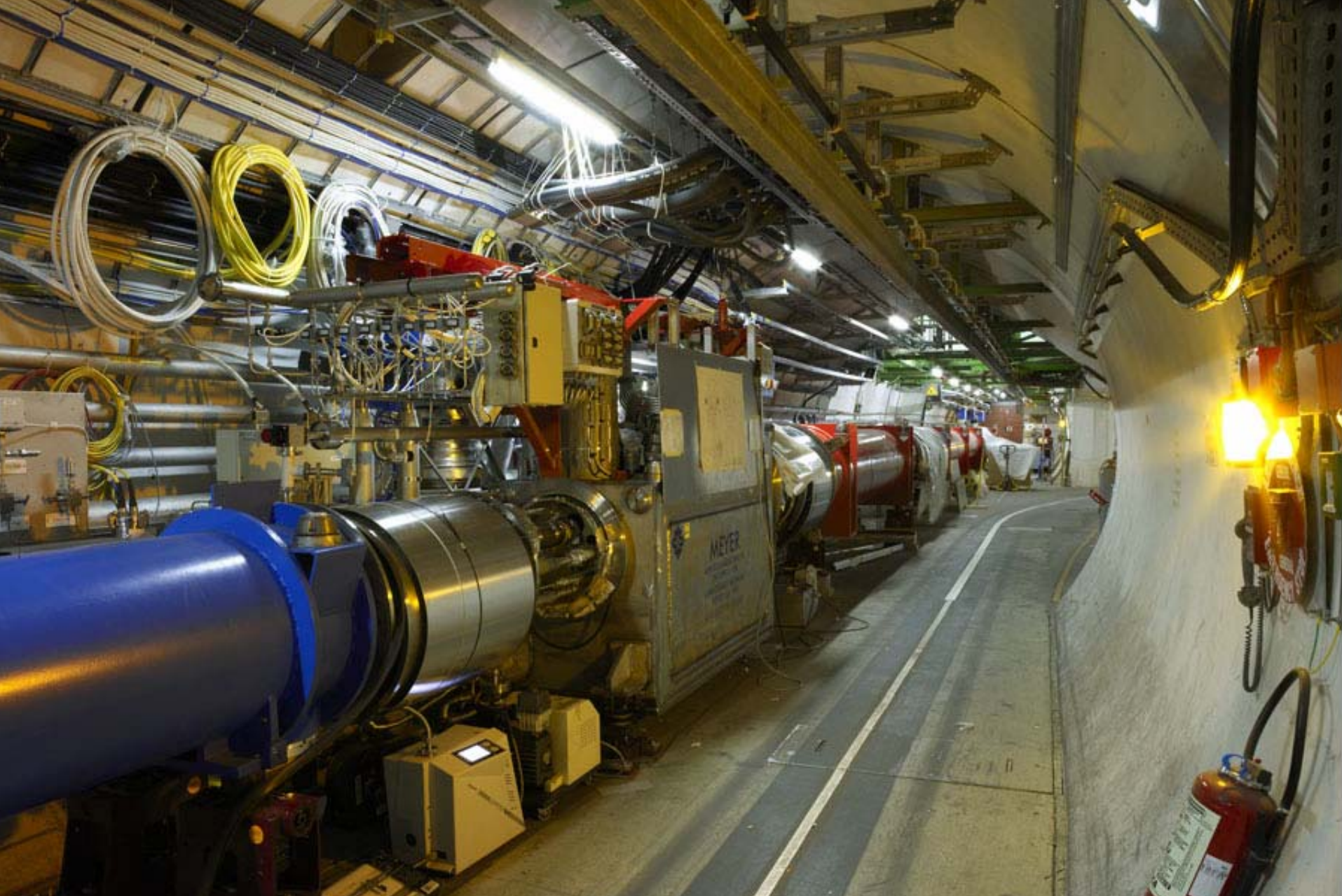
Radolf LEY, PS Division, CERN, 02/09/96
Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div,
in collaboration with B. Desforges, SE Div, and
D. Manglunki, PS Div, CERN, 23.05.01

LHC = Large Hadron Collider

7000 GeV + 7000 GeV



CERN



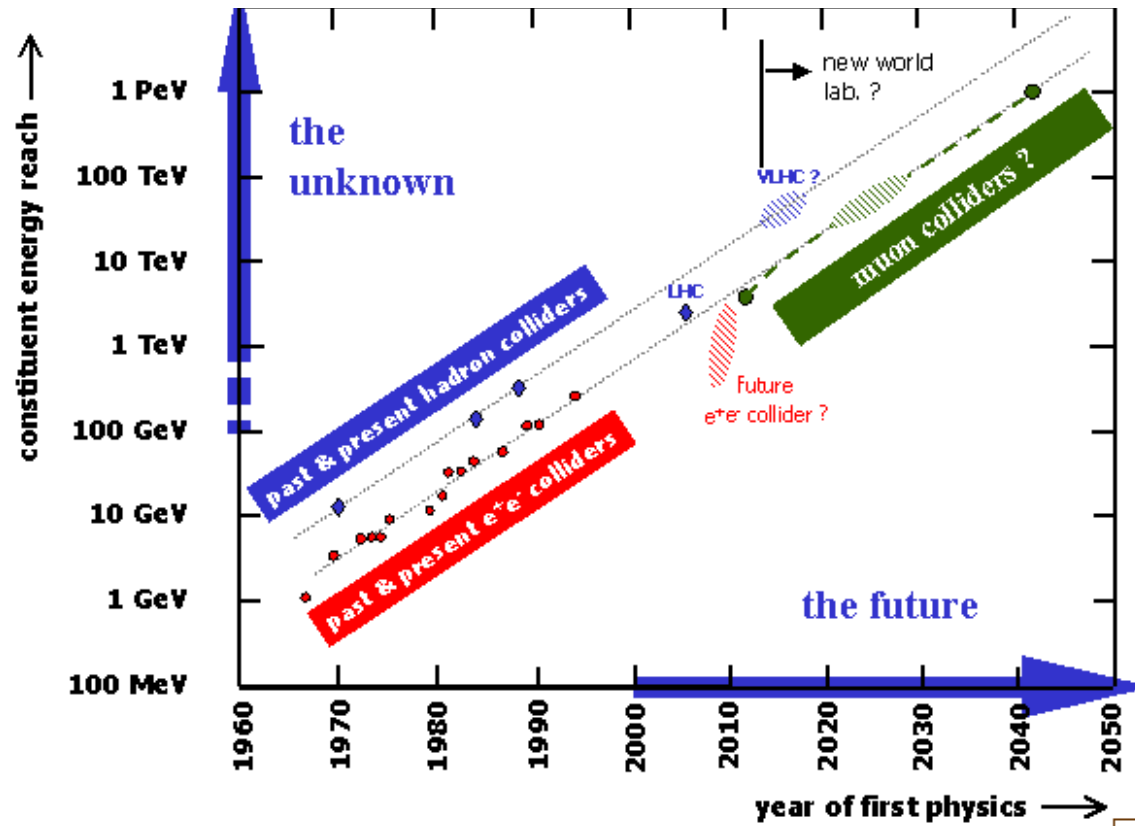
LHC (CERN): $p (7000 \text{ GeV}) + p (7000 \text{ GeV})$

CCC = CERN Control Center

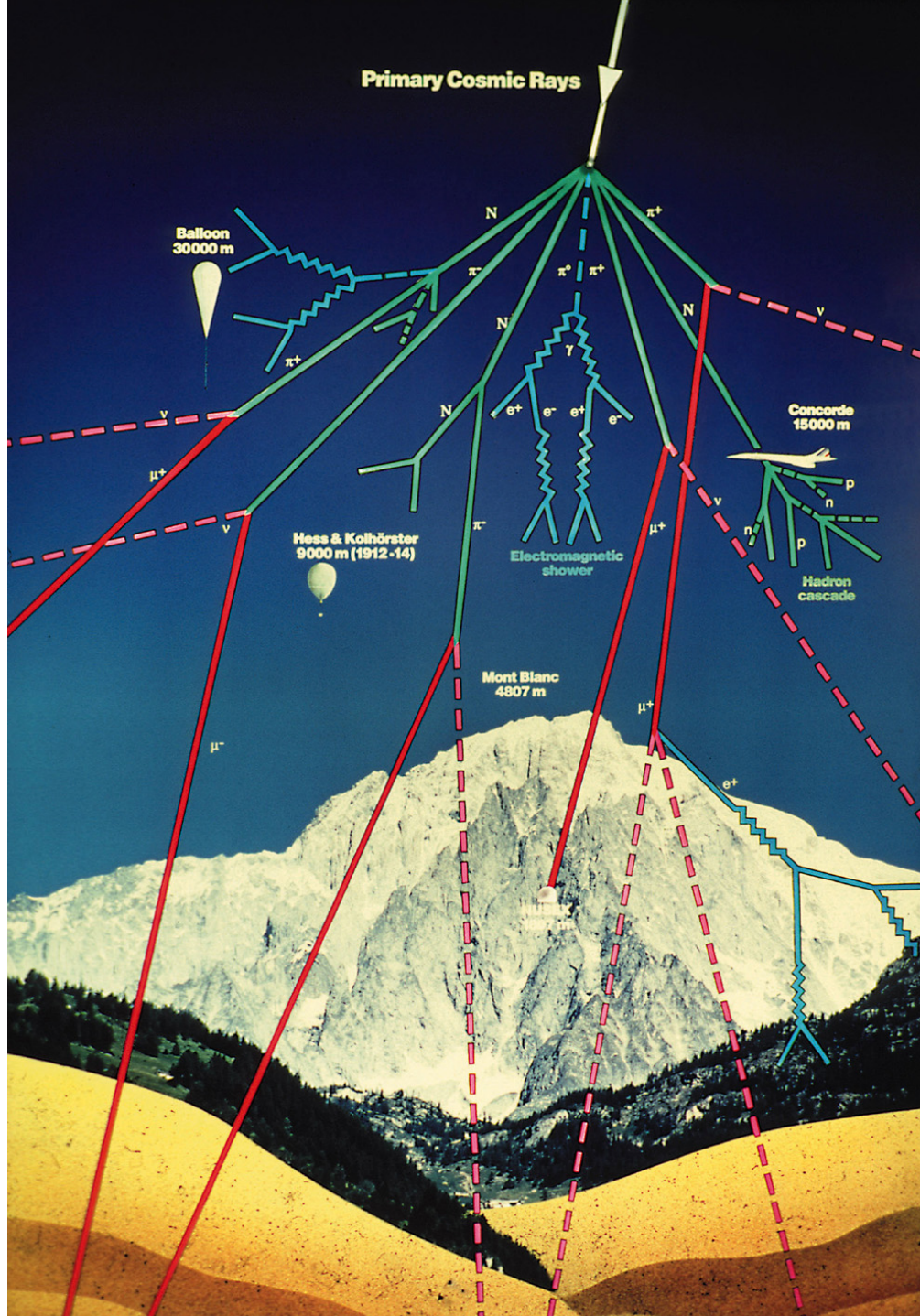


Grosse Teilchenbeschleuniger

Name	Zeit	Teilchen	ρ / km	E / GeV
HERA, DESY	1992 - 2007	e^-p, e^+p	1	30 + 900
SPS, CERN	1981 - 1990	$p\bar{p}$	1	300 + 300
TEVATRON, USA	1987 - 2009	$p\bar{p}$	1	1000 + 1000
LHC, CERN	2007 - 2020	pp	4	7000 + 7000
SLC, USA	1989 - 1999	e^-e^+	∞	50 + 50
LEP, CERN	1989 - 2000	e^-e^+	4	104 + 104



Teilchen aus dem Universum



Entdeckungen neuer
Teilchen 1930-1960:

kosmische Strahlung!

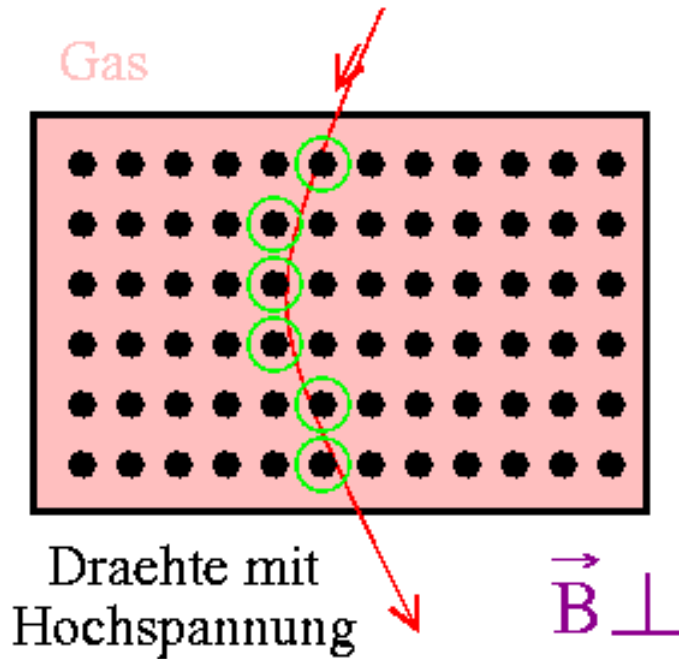
Energien bis

10^{11} GeV

Teilchendetektoren

Nobelpreis 1992

Charpak



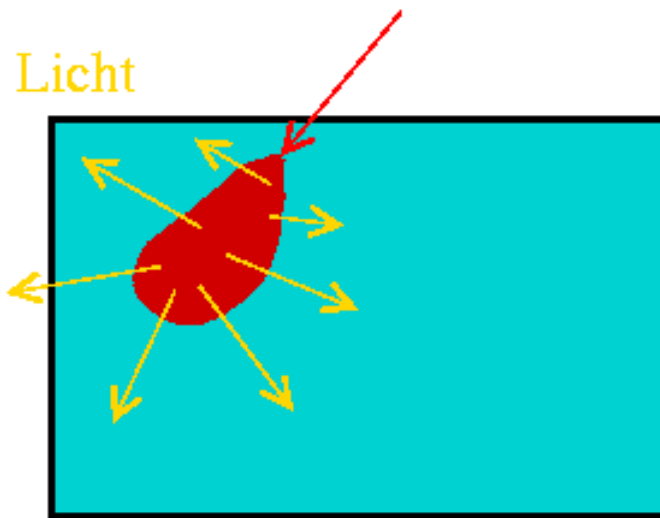
Spurdetektoren:

Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt.

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

Ortsauflösung ~ 0.1 mm

Aus Krümmung folgt **Impuls**



Kalorimeter:

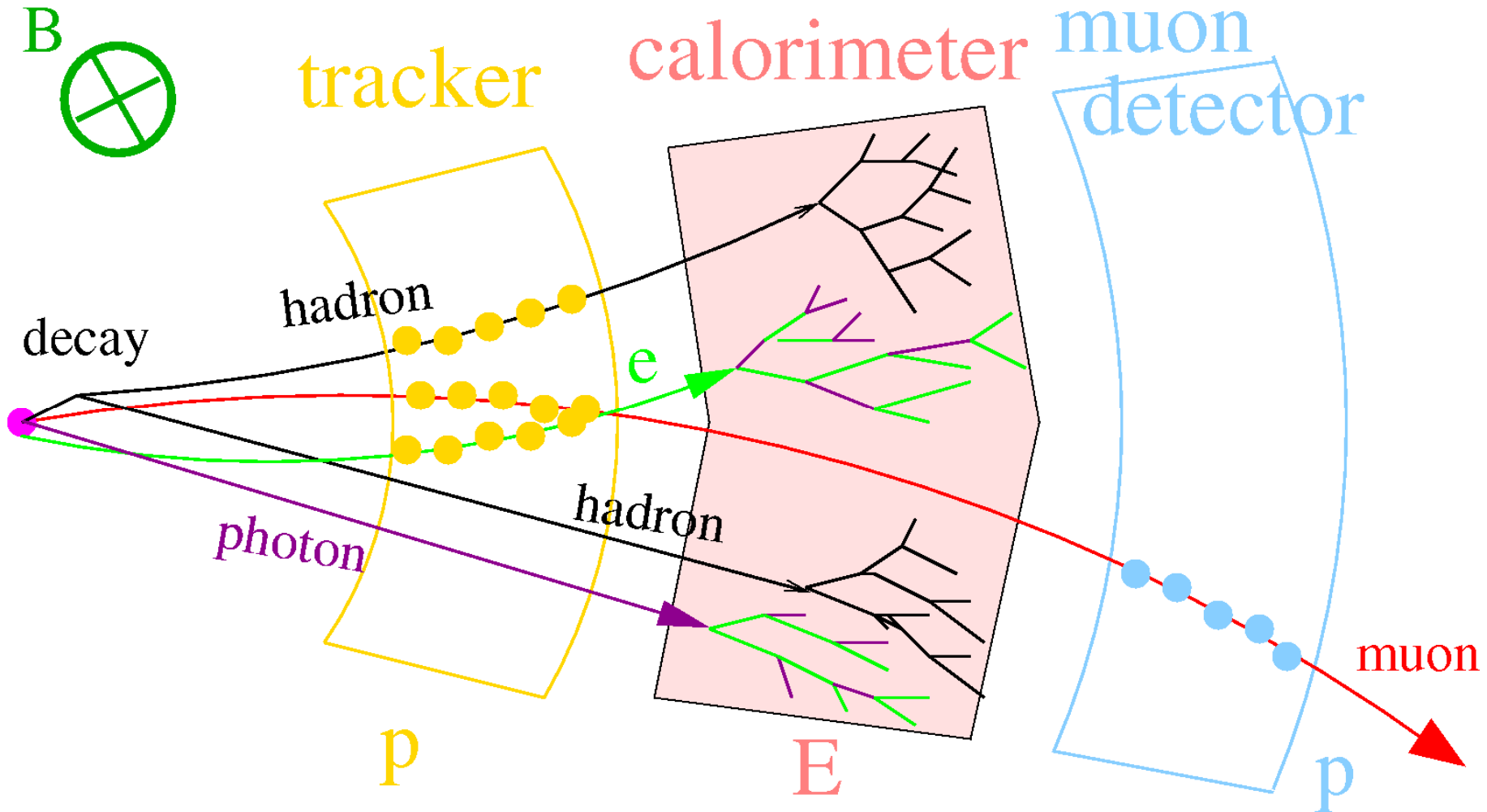
In Materie entstehen Sekundärteilchen, die das Material anregen.

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

Energieauflösung ~ Prozent

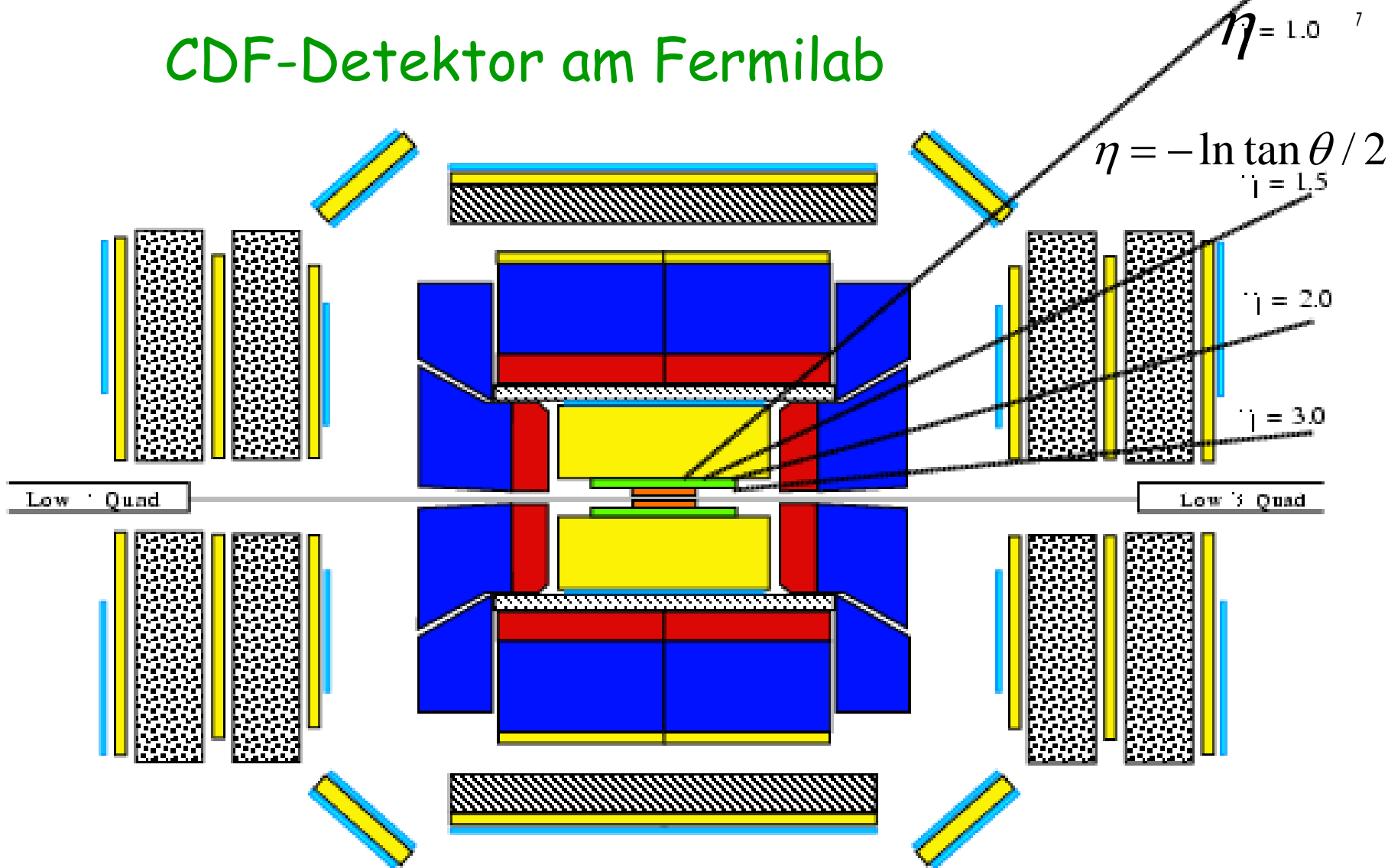
Universaldetektoren

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












Viele Teilchen sind kurzlebig → Nachweis nur über ihre Zerfallsprodukte

CDF-Detektor am Fermilab



Key:

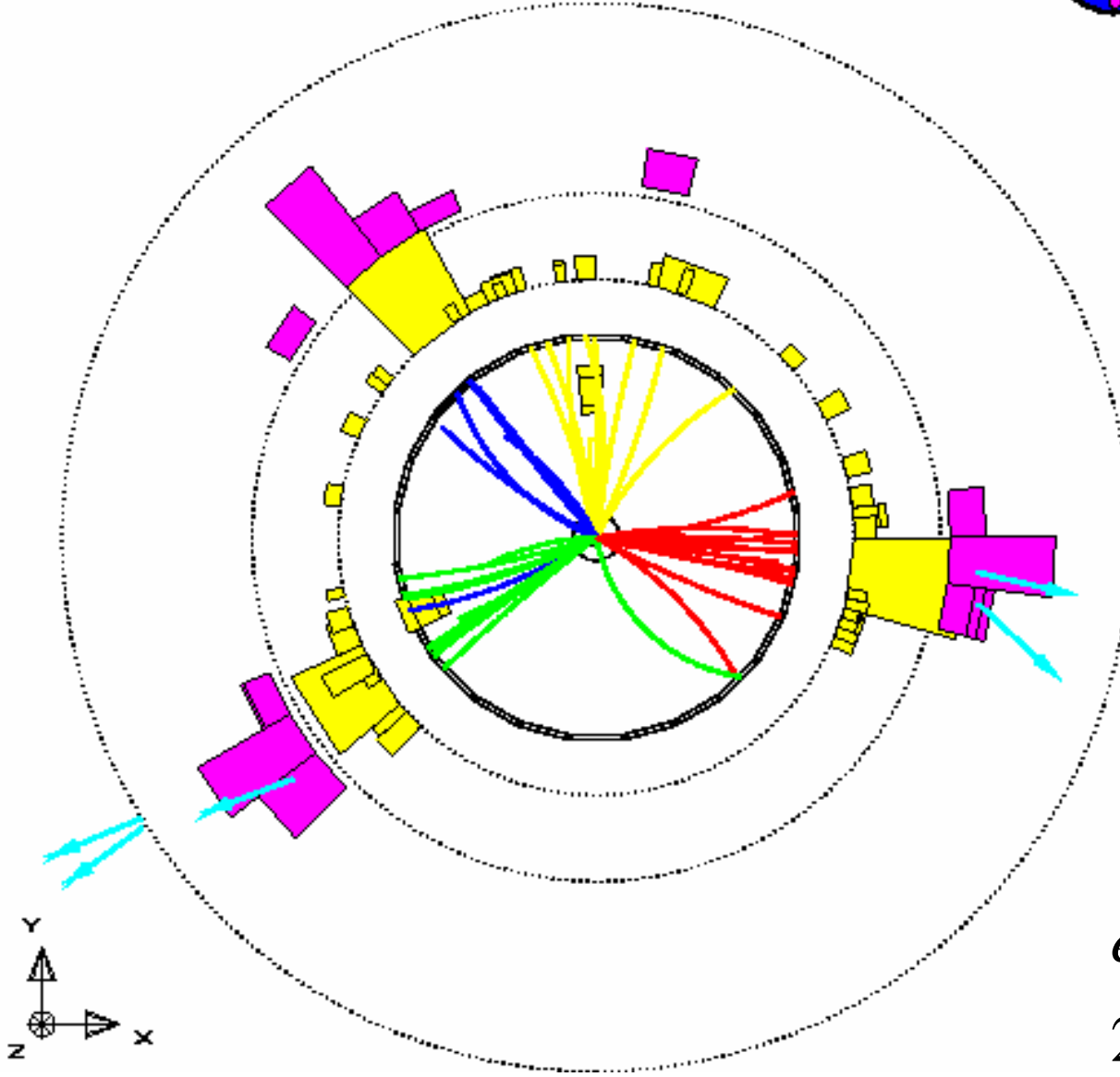
- | | | |
|---|---|---|
|  Silicon Tracker |  Scintillator Counter |  Solenoid Coil |
|  Fiber Tracker |  Electromagnetic Calorimeter |  Toroid |
|  Drift Chamber |  Hadronic Calorimeter |  Steel Shielding |

Kollisionereignis im OPAL-Detektor (LEP)

```

Run: event(11098): 18003      C1rA(N= 35 SumE=190.1) Ecal(N= 70 SumE= 94.0)
Ebeam 22.804 Vtx f: -.04, -.00, -.10)      Hcal(N=40 SumE= 78.0) Muon(N= 5)

```

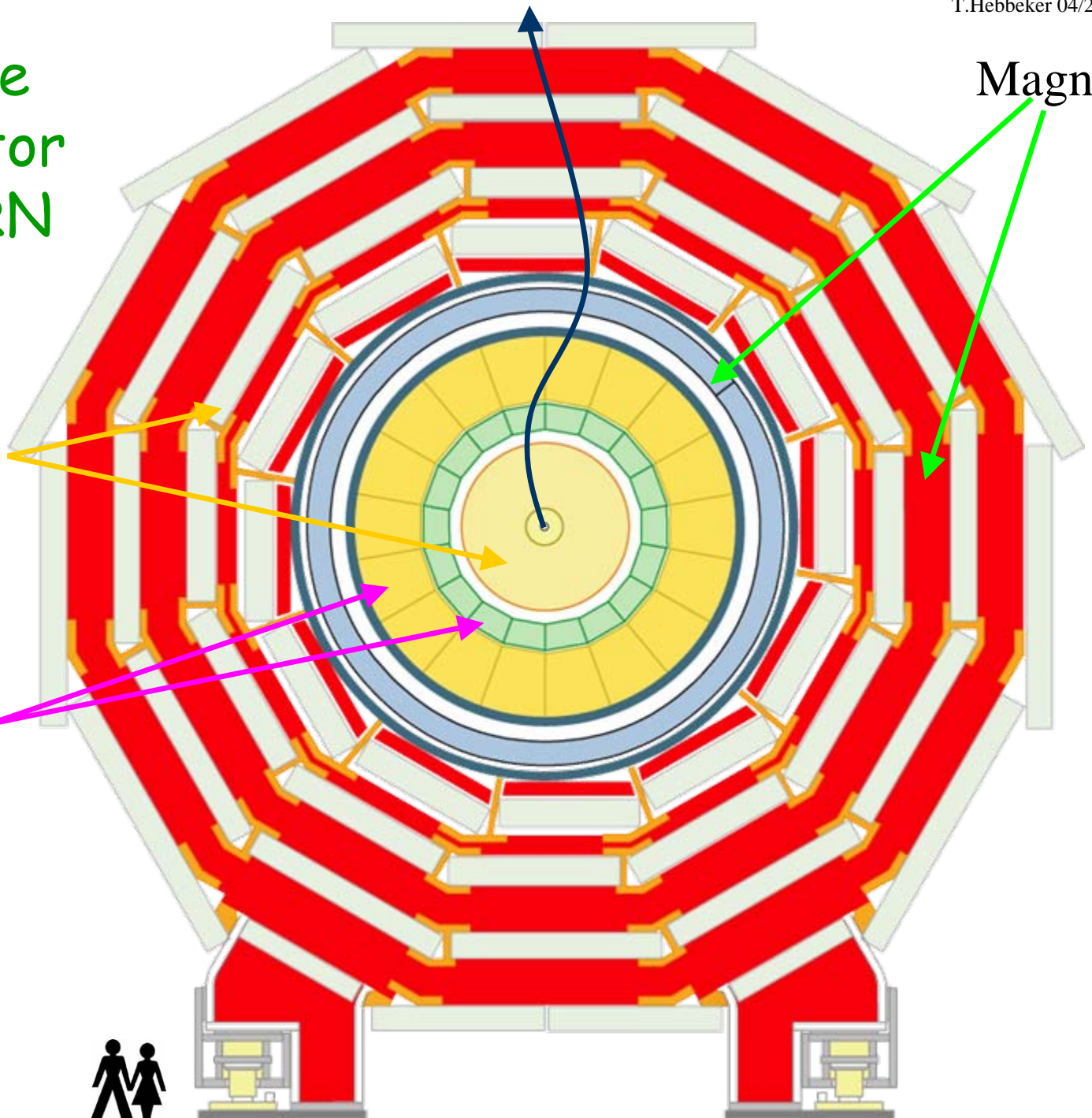


Der geplante CMS-Detektor am LHC/CERN

Spurdetektoren

Kalorimeter

Magnet



Inhalt

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

Teilchen

Wechselwirkungen

Symmetrie-Verletzungen

Bedeutende Resultate der letzten ~25 Jahre



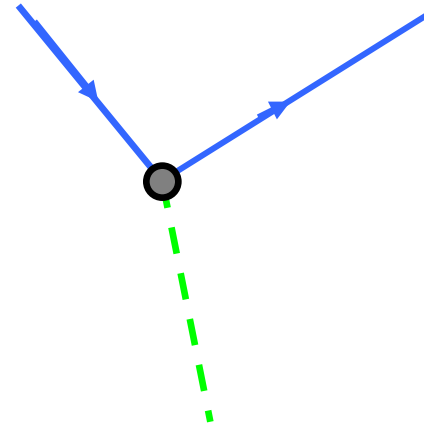
- **Offene Fragen**
- **Teilchenphysik an der RWTH**

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	γ	masselos
Z-Boson	Z	91 GeV
W-Boson	W^+ W^-	80 GeV

stark:

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

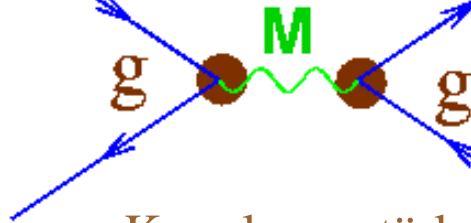
+ Higgs ?

Die fundamentalen Fermionen

Nobelpreise:

	Name	m	τ/s	Zerfall
1995 Reines	e	511 keV	-	-
	ν_e	< 3 eV 2 eV	-	-
1988 Steinberger et al	μ	0.106 GeV	$2.20 \cdot 10^{-6}$	$e \bar{\nu}_e \nu_\mu$
	ν_μ	< 0.19 MeV 2 eV	-	-
1995 Perl	τ	1.78 GeV	$2.96 \cdot 10^{-13}$	viele
	ν_τ	< 18 MeV 2 eV	-	-
1990 Friedmann et al	$\left\{ \begin{array}{l} u \\ d \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5 \text{ MeV} \\ 10 \text{ MeV} \end{array} \right.$	10^3	$u e^- \bar{\nu}_e$
1976 Richter, Ting	$\left\{ \begin{array}{l} c \\ s \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 1.3 \text{ GeV} \\ 0.2 \text{ GeV} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 10^{-12} \\ 10^{-9} \end{array} \right.$	$s e^+ \nu_e$ $u e^- \bar{\nu}_e$
	t	174 GeV	10^{-23}	$b e^+ \nu_e$
2002 Davis, Koshiba	b	4.3 GeV	10^{-12}	$c e^- \bar{\nu}_e$

Die Wechselwirkungen im Mikrokosmos



‘Vertex’:

Kopplungsstärke g (z.B. el. Ladung)

Bosonmasse M : Reichweite

Elektroschwache WW:

Nobelpreise 1979, 1999

Glashow, Salam, Weinberg

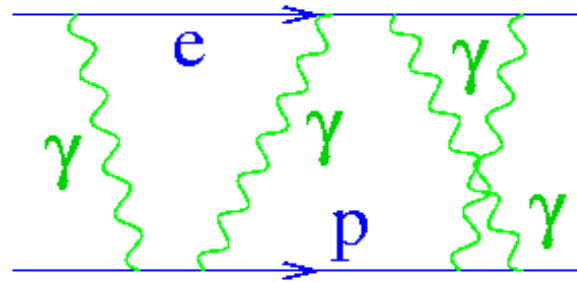
t’Hooft, Veltman

→ Wahrscheinlichkeit

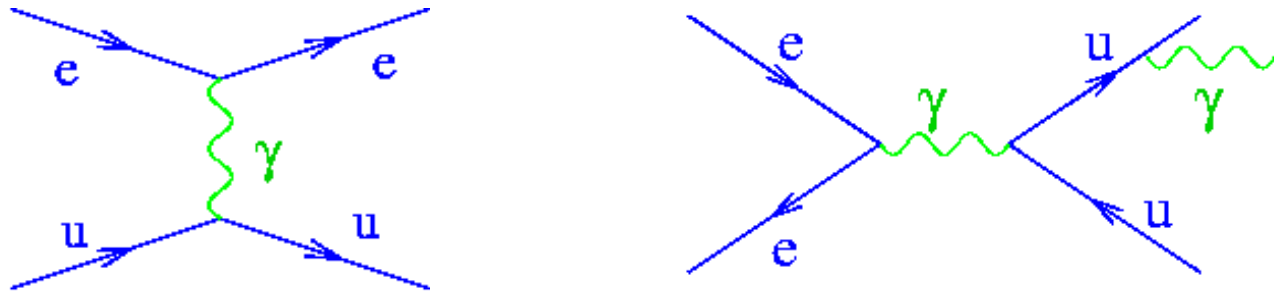
Boson	Photon g	W-Boson	Z-Boson	Gluon g
WW	elm.	schwach	schwach	stark
M	0	80.4	91.2	0
Arten		+ -		8 Farbkomb.
τ	-	$10^{-25} s$	$10^{-25} s$	-
g	~ 0.1	~ 0.1	~ 0.1	~ 0.3
R	∞	$\sim 0.001 \text{ fm}$	$\sim 0.001 \text{ fm}$	$\sim 1 \text{ fm} !$
Partner	Gel. Teilchen	alle	alle	Quarks

Elektromagnetische Wechselwirkung

Bindungszustand: H-Atom:

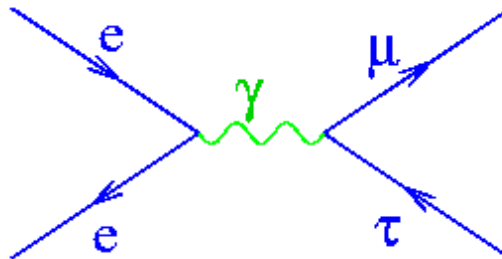


erlaubt:



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

verboten:



Starke Wechselwirkung



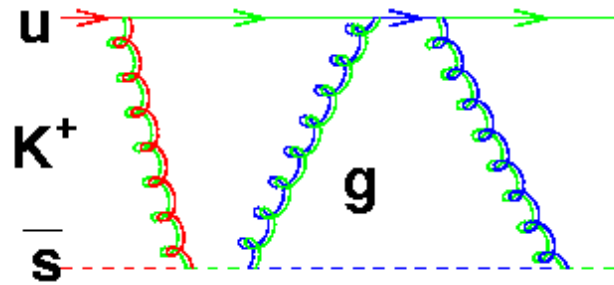
$$\text{Meson} = q \bar{q}$$

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

Isolierte Quarks gibt es nicht!

Beobachtbar sind nur „farbneutrale“
Kombinationen

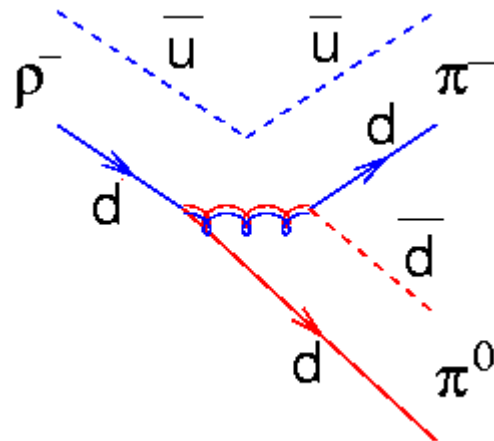
Bindungszustand:



Gluon =

Farbe+Antifarbe

Zerfall:

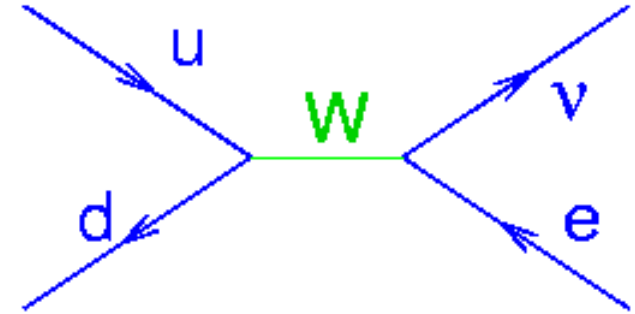
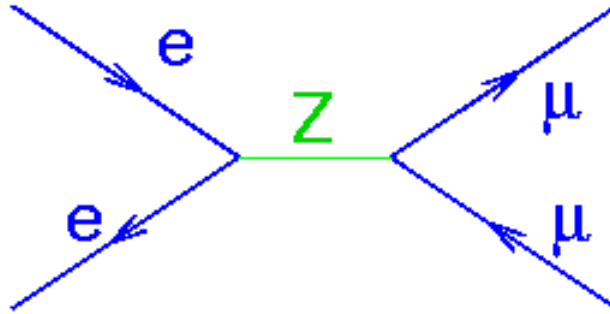


Starke WW:
Nobelpreis 2004:
**Gross, Politzer,
Wilczek**

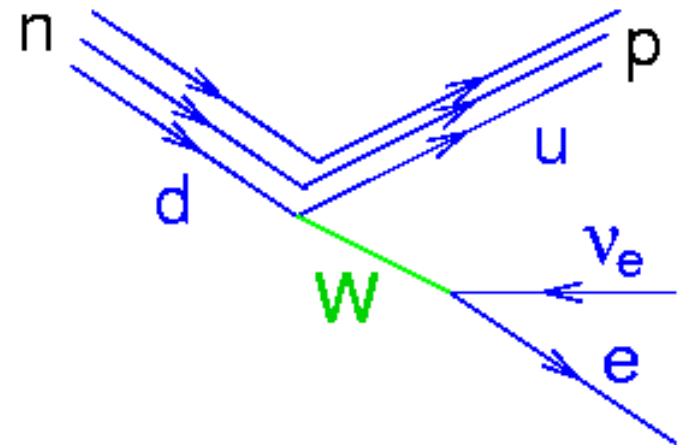
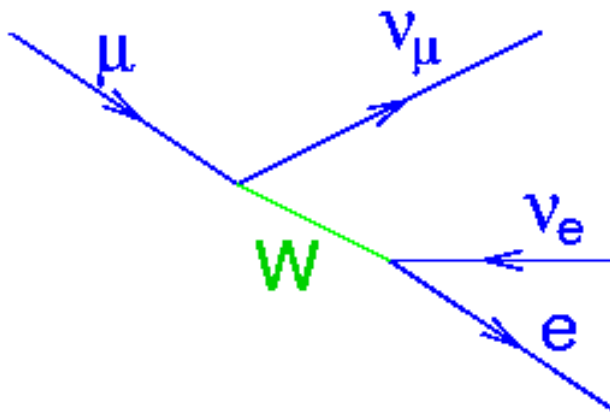
Erhaltungssätze: Quarksorte, Farbe

Schwache Wechselwirkung

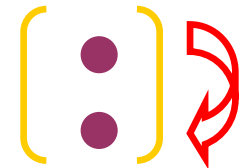
Kollisionsereignis



Zerfälle:



W-Austausch: Teilchenart ist NICHT erhalten !



Hadronen = Quarkbindungszustände

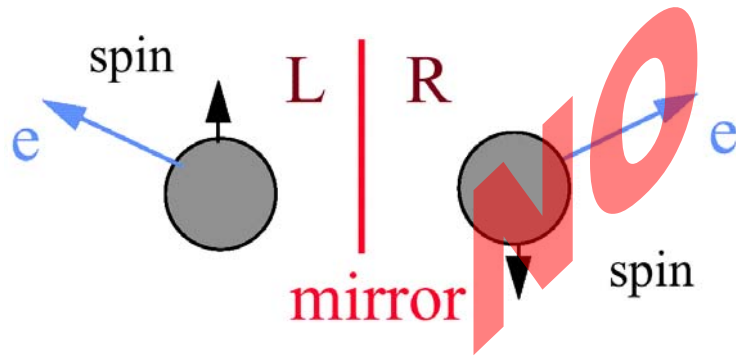
Mesonen

Baryonen

Name	Spin	Quarks	m/MeV	τ/s	Zerfall
π^+	0	$u\bar{d}$	140	$3 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ \nu$
π^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	$5 \cdot 10^{-8}$	$\pi e \nu_e (39\%)$
ρ^+	1	$u\bar{d}$	768	10^{-24}	$\pi^+ \pi^0$
ρ^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	$p e^- \bar{\nu}$
Λ	1/2	uds	1116	$3 \cdot 10^{-10}$	$p \pi^- (64\%)$

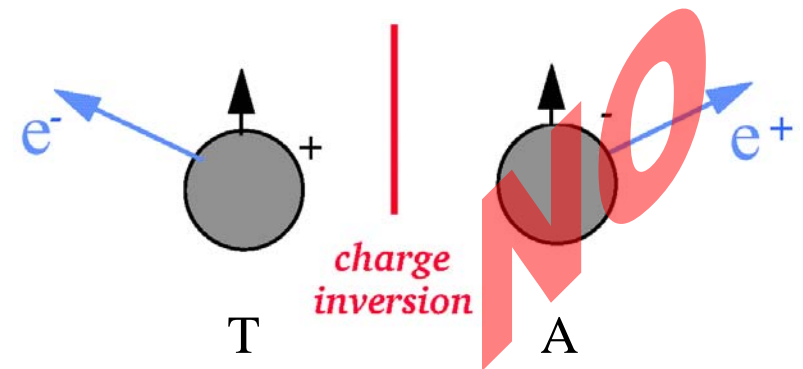
Symmetrieverletzungen (schwache WW)

Spiegelsymmetrie **P**



verletzt! (1957)

Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie **C**



verletzt!

aber: Kombination **CP** : ok!

(linkshändiges T \leftrightarrow rechtshändiges A)

Seit 1964: Experimente:

Auch CP ist (schwach) verletzt!

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

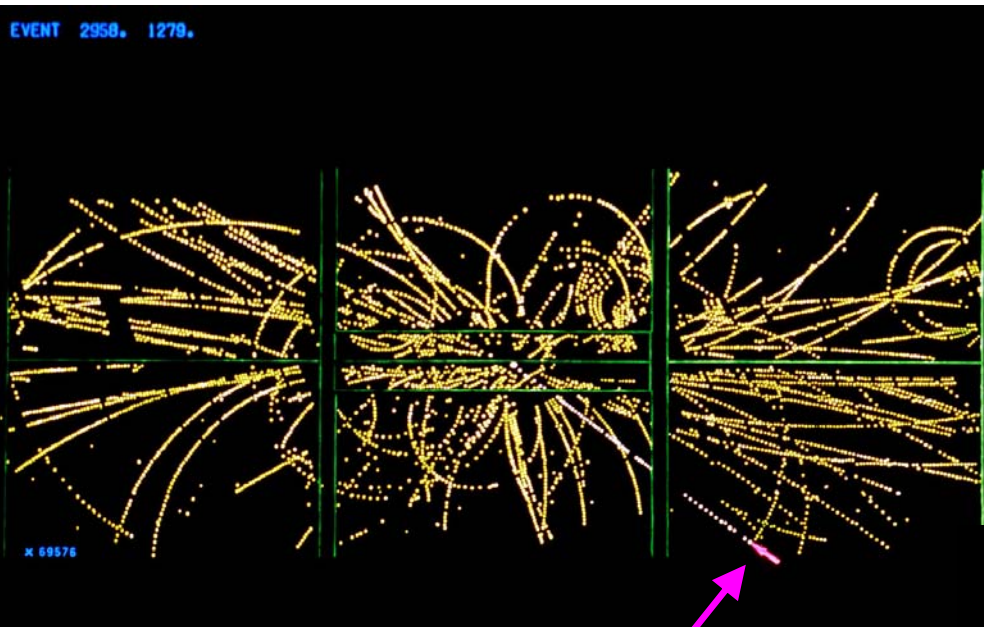
$$\neq$$

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

Entdeckung von W und Z



CERN 1983



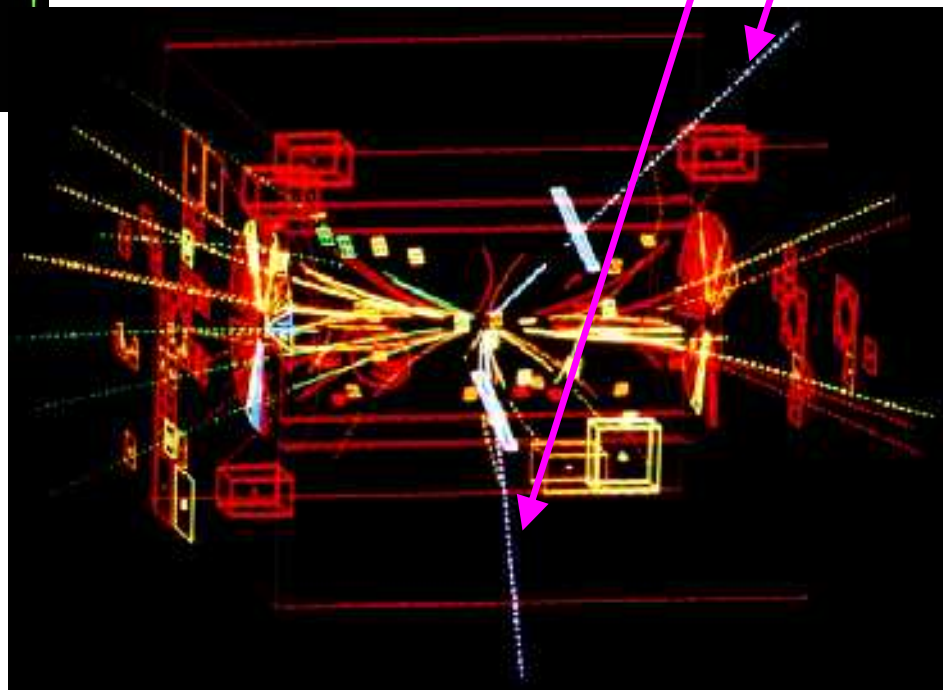
UA1, UA2

$p \bar{p}$ 600 GeV

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

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

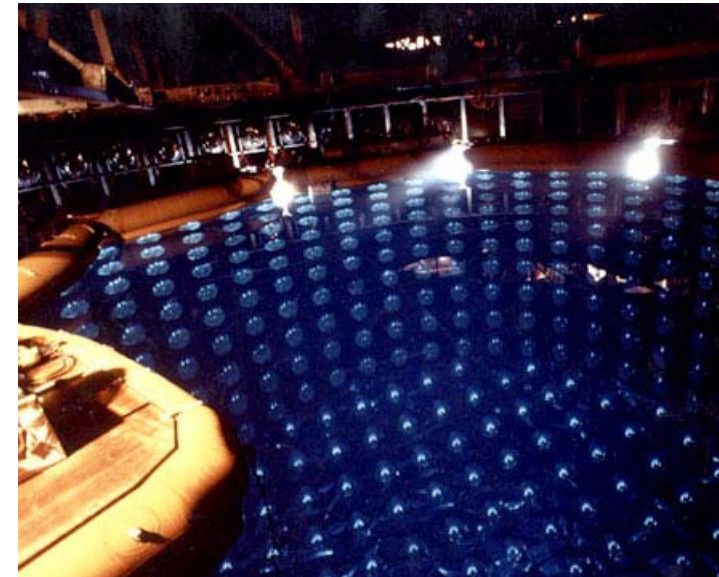
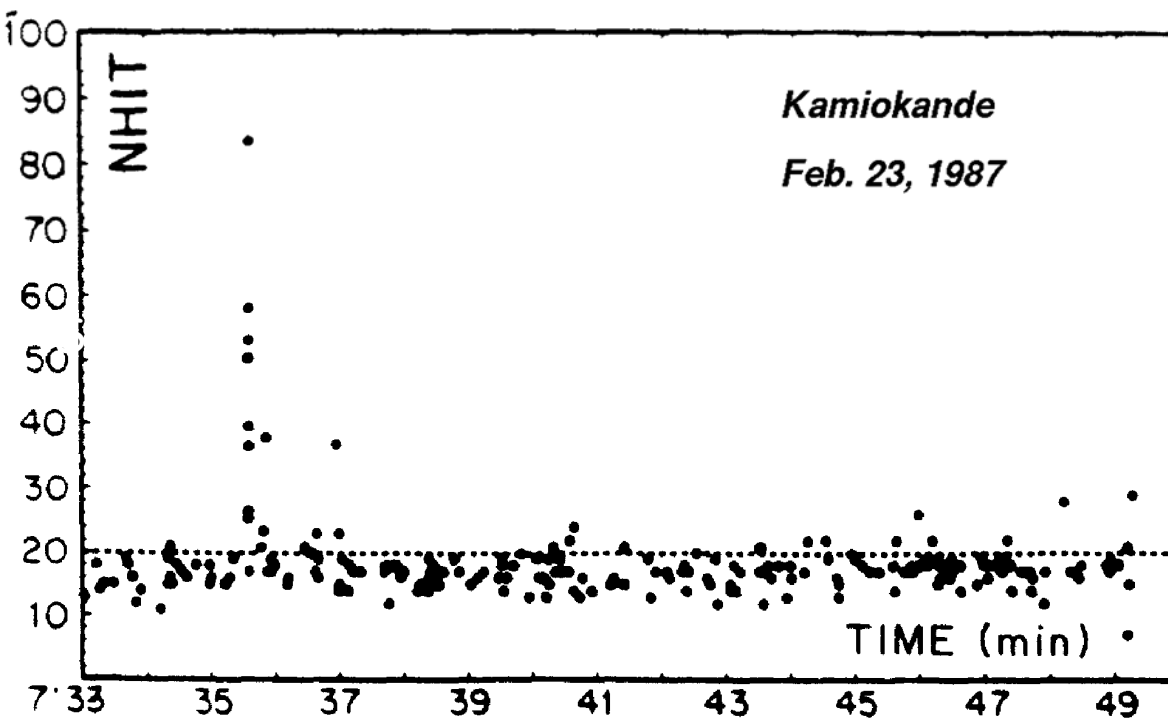
Nobelpreis 1984
Rubbia, Van der Meer



Neutrinos aus Supernova

SN 1987A

(Magellansche
Wolke)



Kamiokande

Präzisionsmessungen bei LEP



Z-Masse:

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

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

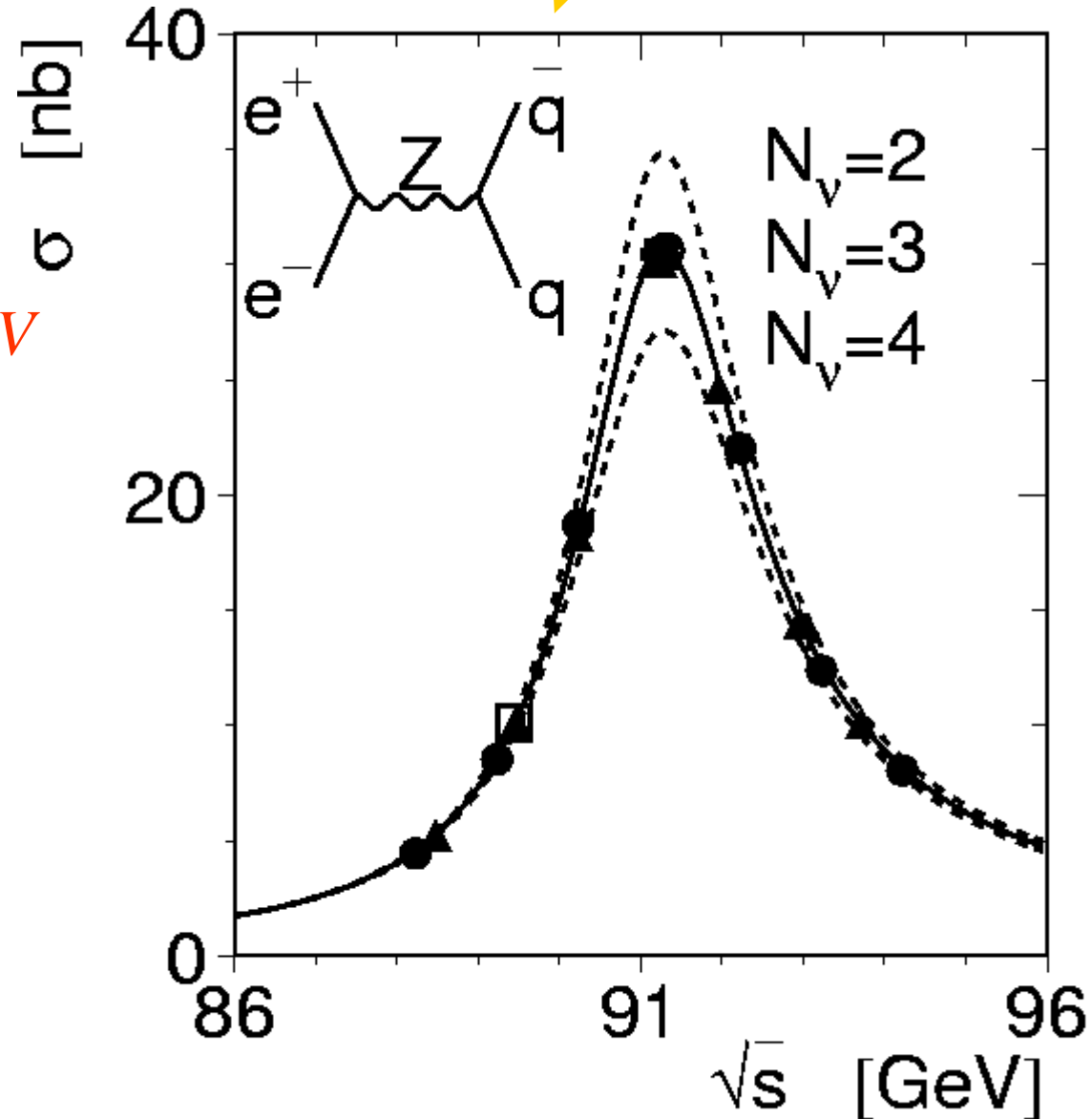
Zahl der Neutrinofamilien:

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

Top-Quark-Masse:

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

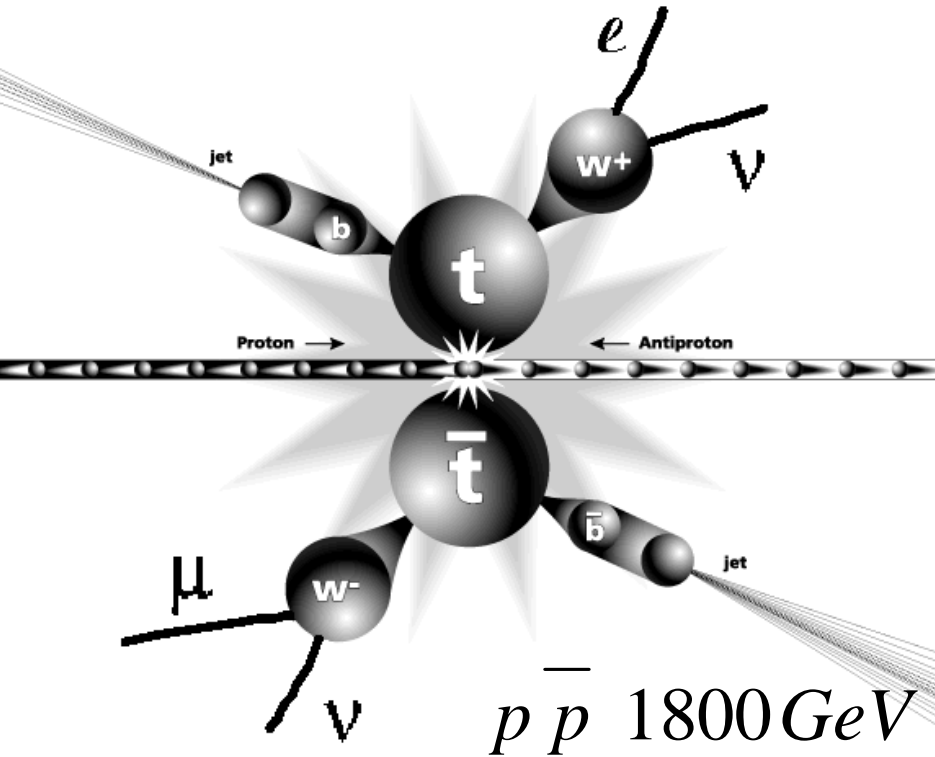
(Vorhersage !)



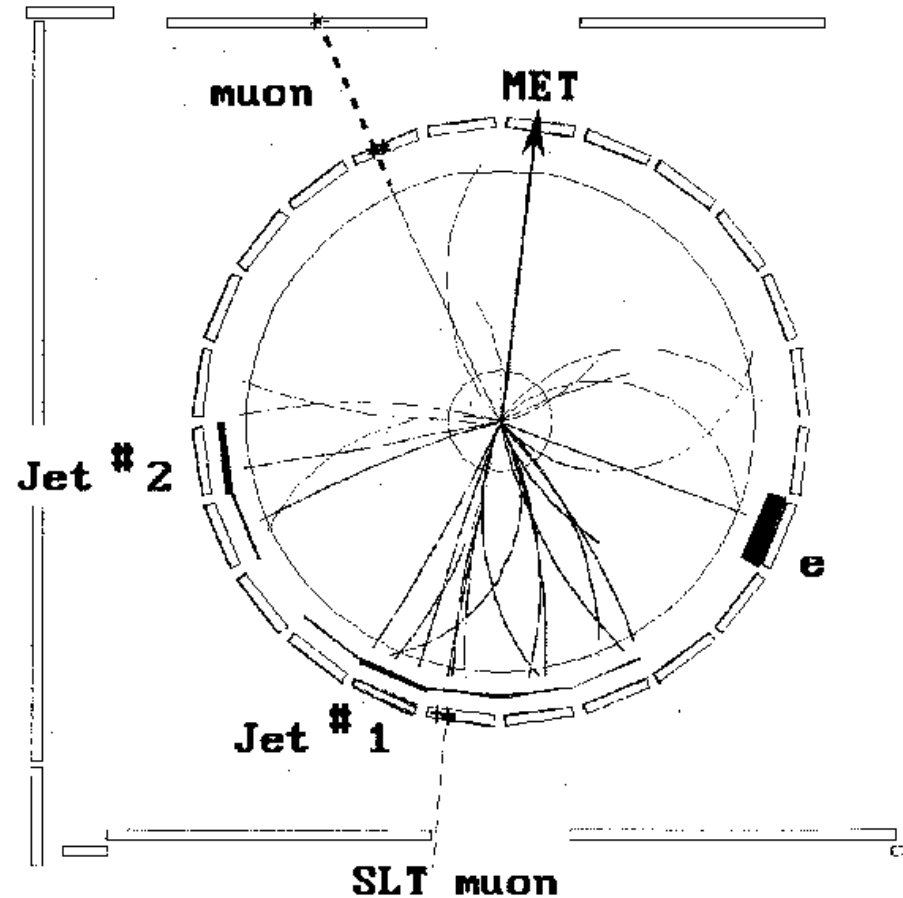
Entdeckung des top-Quarks

Fermilab, 1995

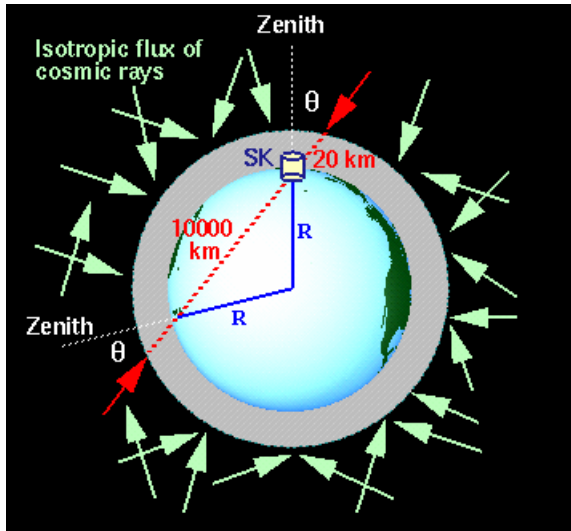
CDF, D0



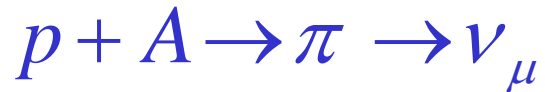
$$m = 171.4 \pm 2.1 \text{ GeV} \quad (2007)$$



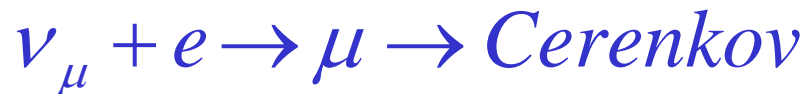
Neutrino-Oszillationen



Erdatmosphäre:

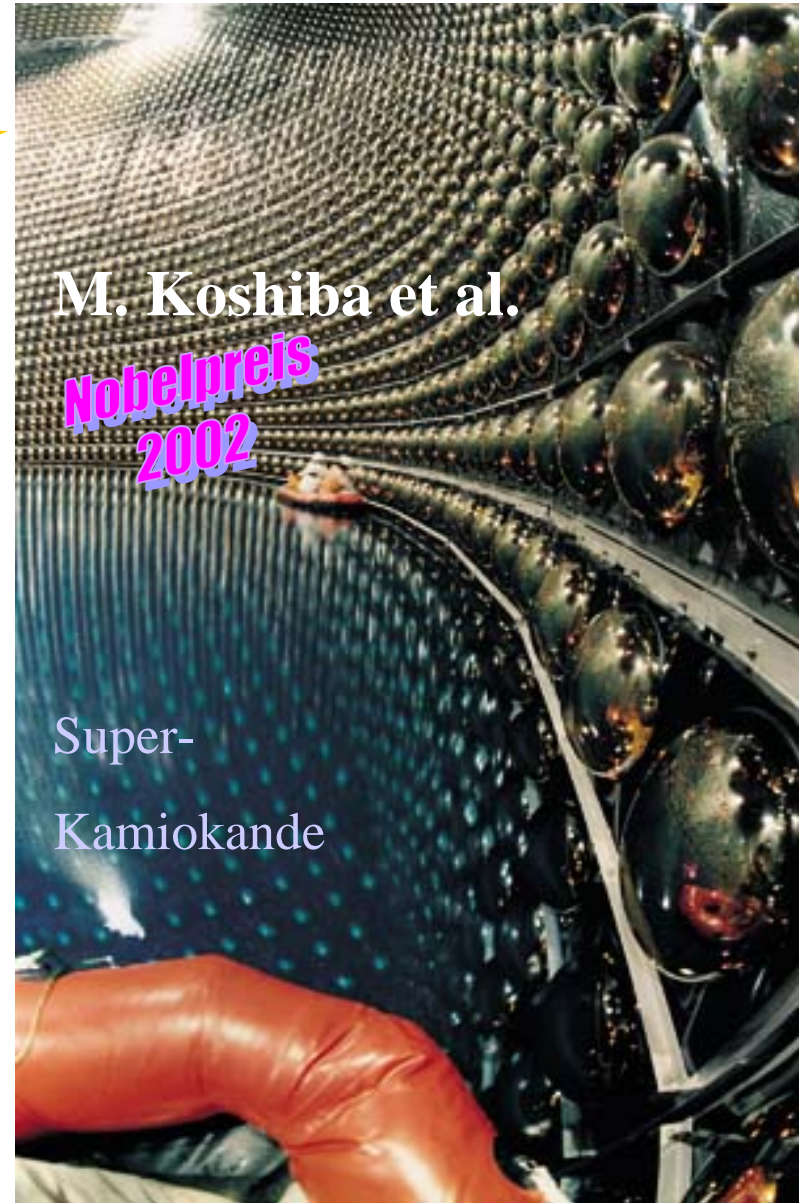


Nachweis:



Ergebnis:

zu wenige μ , da $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$



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

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

ABER:
Theorie verlangt:
Alle Teilchen sind **masselos** !

Ausweg: **zusätzliches Teilchen:**

Higgs

neutral, Spin-0, instabil, (nur) Masse unbekannt

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

Das Higgs-Boson

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

Messung

$$= 0.8812 \pm 0.0014$$

Rechnung

zusätzliches Teilchen:

Higgs

neutral, Spin-0, instabil, (nur) Masse unbekannt



Standardmodell-Theorie

(mit Higgs) funktioniert hervorragend !

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:

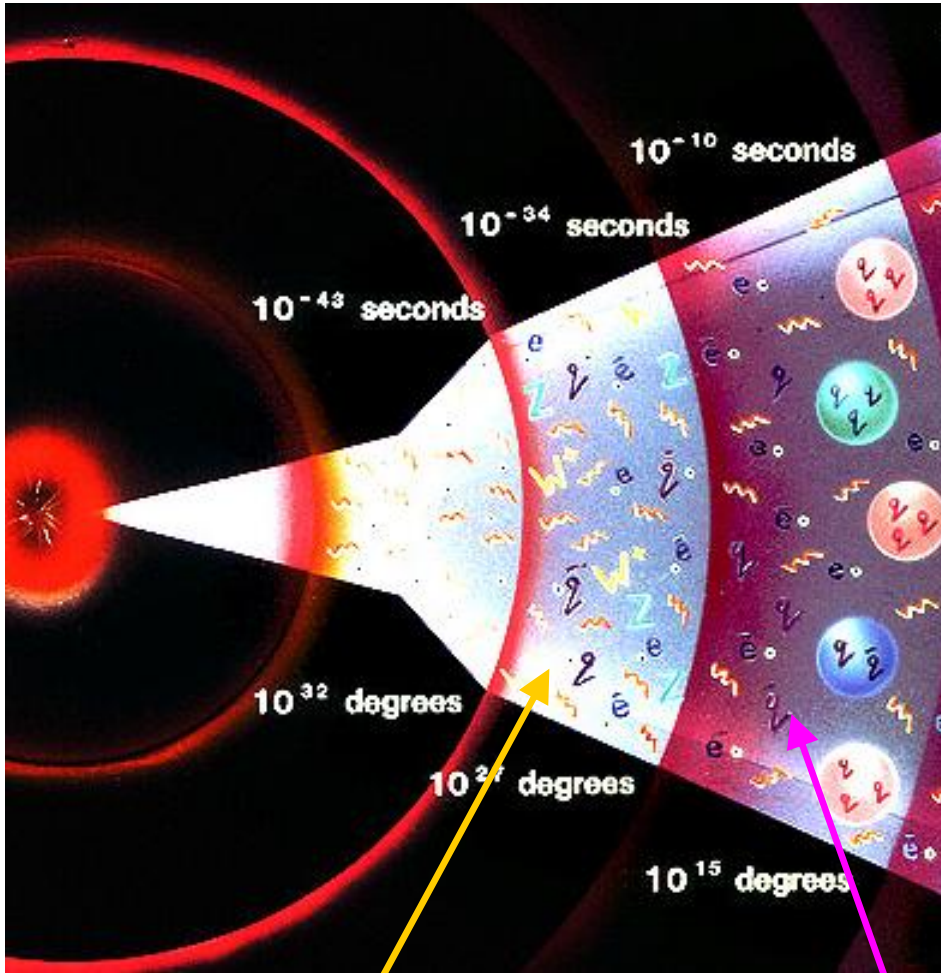
Teilchen	Spin	Partner	Spin
Elektron e	$1/2$	Selektron \tilde{e}	0
Top-Quark t	$1/2$	Stop \tilde{t}	0
Photon γ	1	Photino $\tilde{\gamma}$	$1/2$
W-Boson W	1	Wino \tilde{W}	$1/2$

Experimentelle

Massengrenzen: $> 50 \text{ GeV}$

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 (Beispiele)

CMS = Compact Muon Solenoid

D0

Auger

Experimentelle Teilchenphysik in Aachen

Institute:

I B, III A, III B

Theorie:

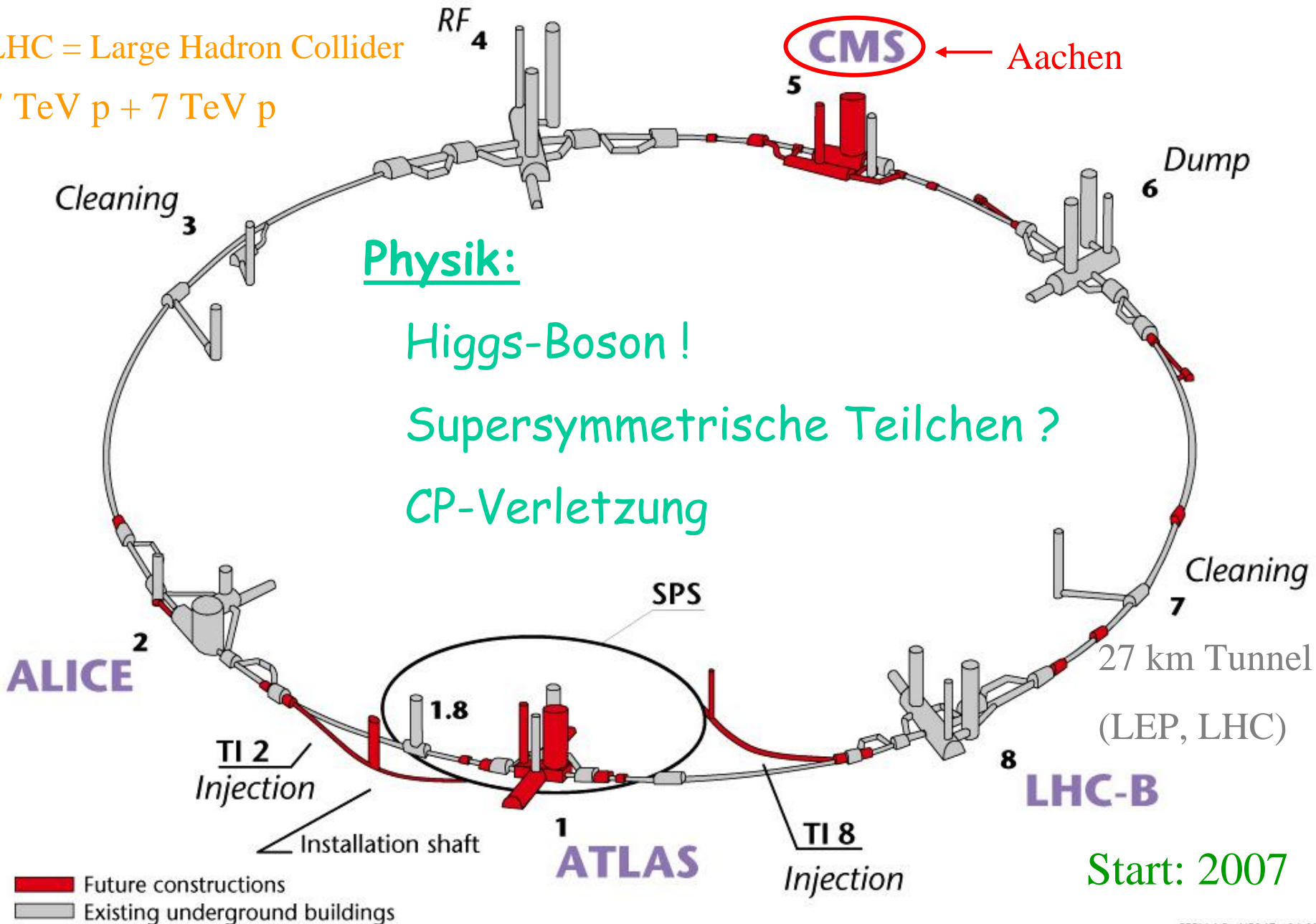
Lehrstuhl E

- CMS [LHC], D0 [Tevatron]
- AMS, Auger, Xenon
- Double Chooz

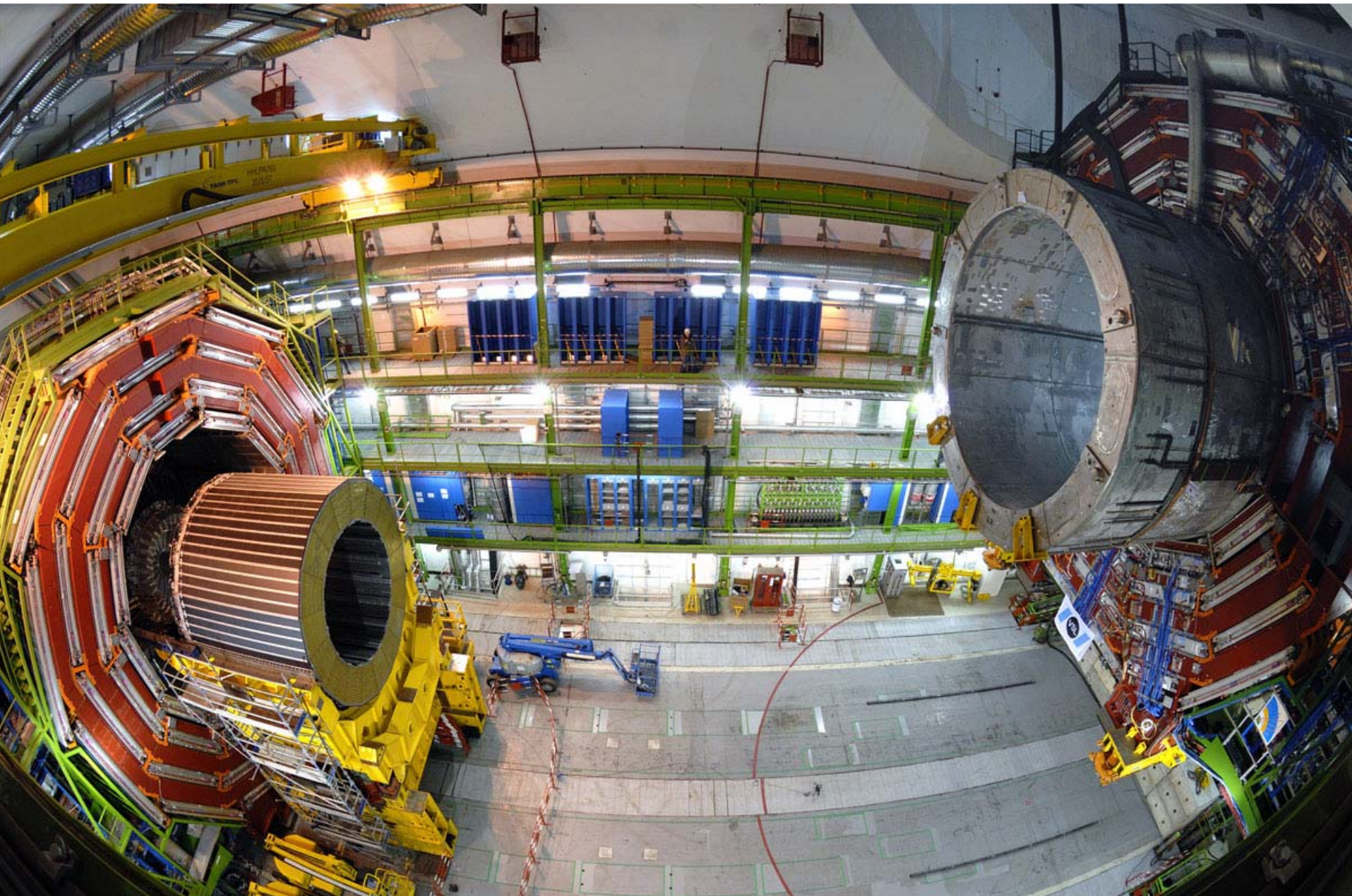
LHC am CERN

LHC = Large Hadron Collider

7 TeV p + 7 TeV p



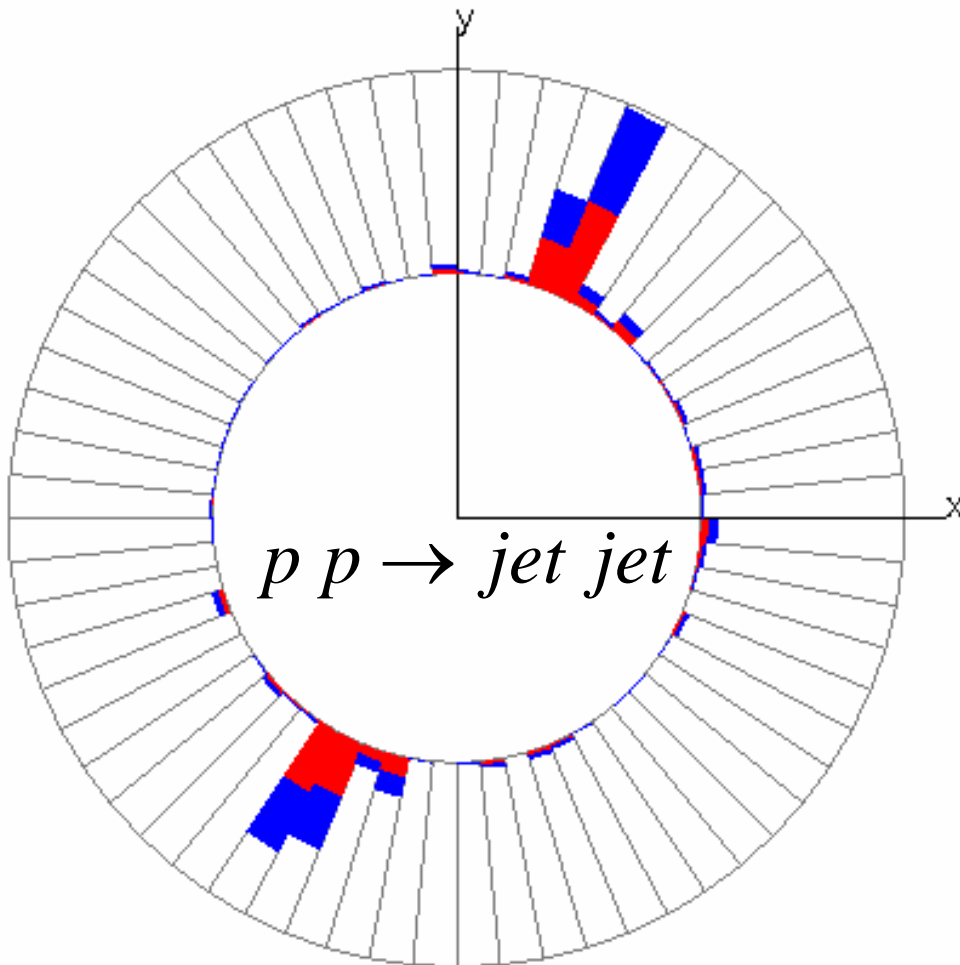
Der CMS Detektor



D0-Experiment am Tevatron

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

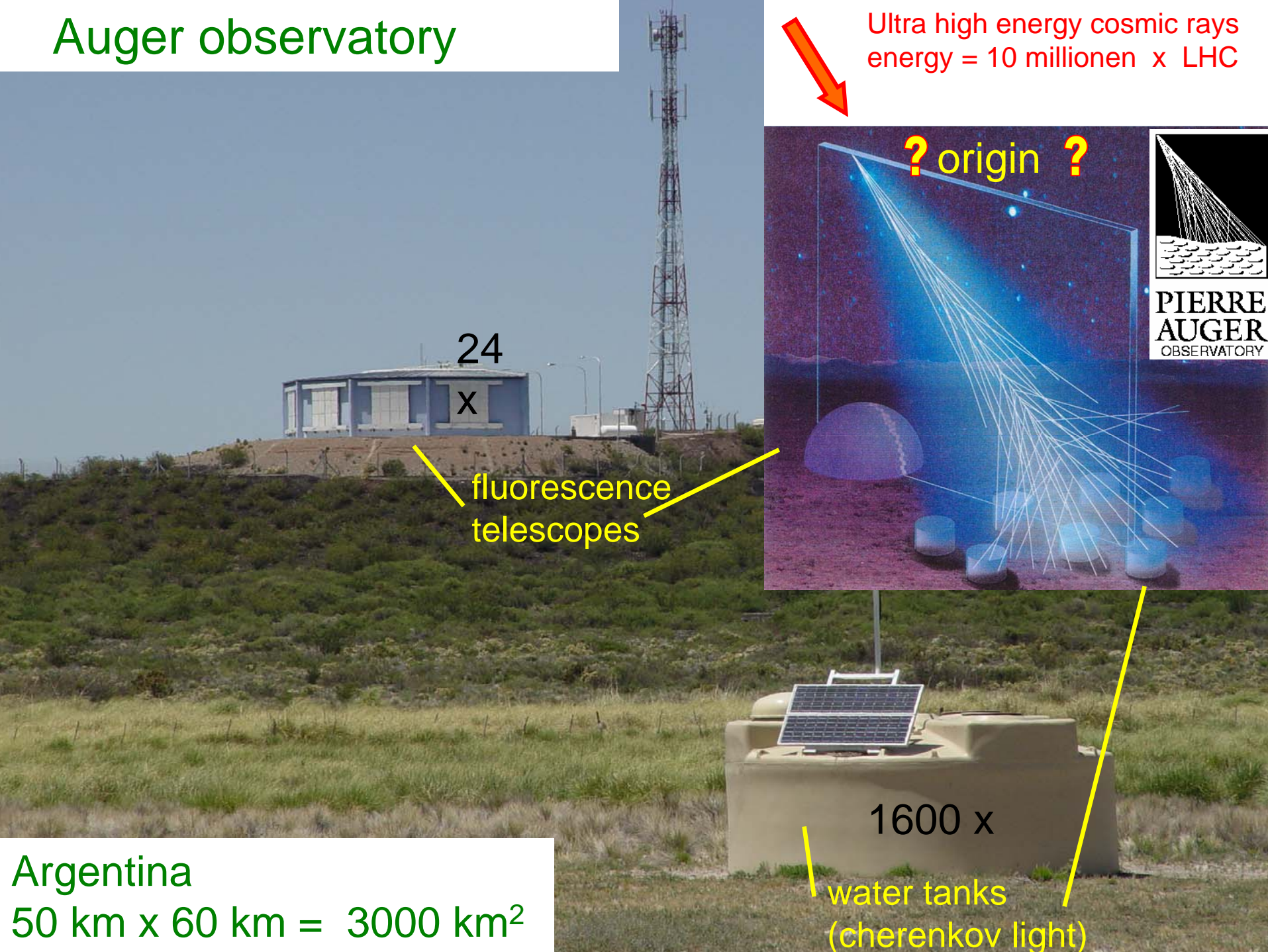
Top-Physik, QCD, ...



Suche nach

- **Higgs**
- **Supersymmetrie ...**

Auger observatory



Ultra high energy cosmic rays
energy = 10 millionen x LHC

24
x

fluorescence
telescopes

? origin ?



1600 x

water tanks
(cherenkov light)

Argentina
50 km x 60 km = 3000 km²

Das Wichtigste sind die Köpfe !

