

Das Unsichtbare sichtbar machen

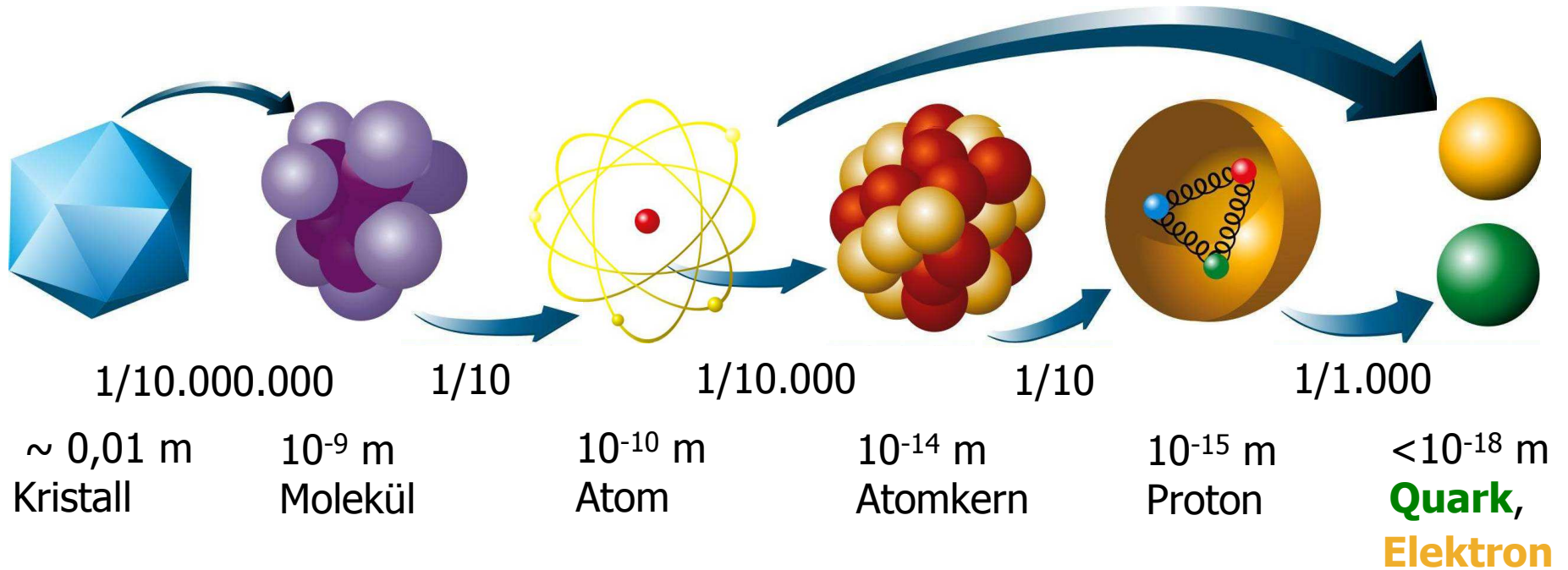


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Dr. Martin zur Nedden
Humboldt-Universität zu Berlin
Technische Universität Dresden



Der Aufbau der Materie



Stecknadelkopf:
 $10^{-3}\text{m} = 0,001\text{m}$

Elektron, Quark:
 $<10^{-18}\text{m} = 0,00000000000000000001\text{m}$

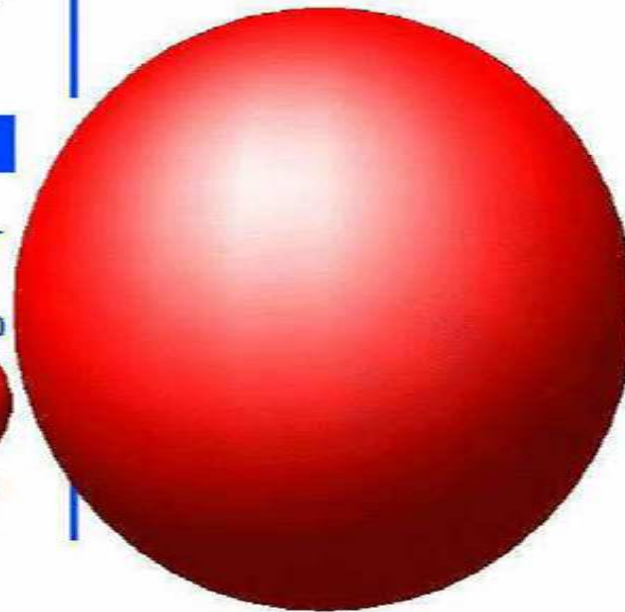
Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

Stabile Materie: **up- und down-Quark**, **Elektronen**

Strukturlose, fundamentale
Teilchen: Alle **Leptonen**

Teilchen mit innerer Struktur:
Proton, Neutron,....
aufgebaut aus **Quarks**

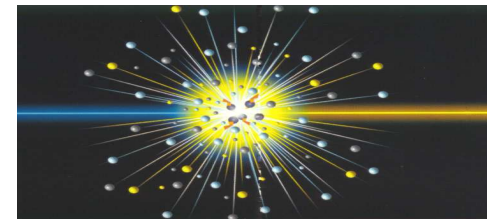
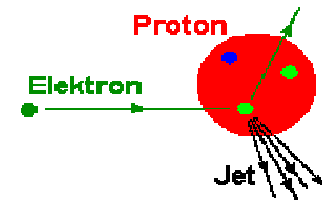
LADUNG	LEPTONS		
0	Electron Neutrino Mass ~0	Muon Neutrino ~0	Tau Neutrino ~0
-1	Electron .511	Muon 105.7	Tau 1 777
QUARKS			
+2/3	Up Mass: 5	Charm 1 500	Top ~180 000
-1/3	Down 8	Strange 160	Bottom 4 250



Experimente mit Teilchenstrahlen

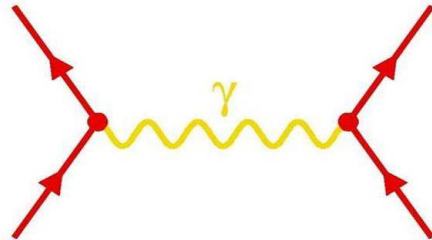
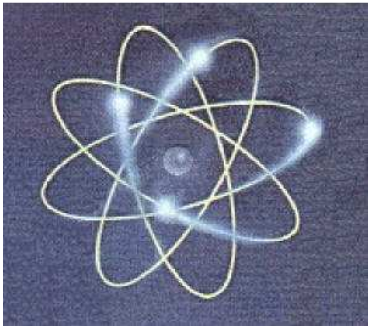
Teilchenstrahlen höchster Energie notwendig, denn mit steigender Energie E (bzw. Impuls p) der Projektile steigt

- die Fähigkeit, kleine Strukturen Δx zu erkennen
 $\Delta x \Delta p = \hbar$ (**Heisenberg**)
- die Fähigkeit, neue schwere Teilchen zu erzeugen
 $E = mc^2$ (**Einstein**)

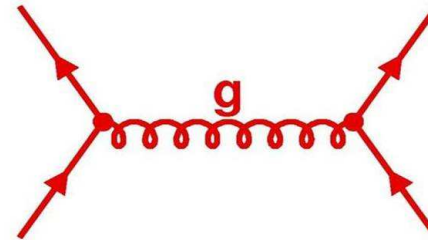


- **Streuexperimente:**
 - Kollision von Teilchenstrahlen mit Materie
 - Kollision von zwei Teilchenstrahlen

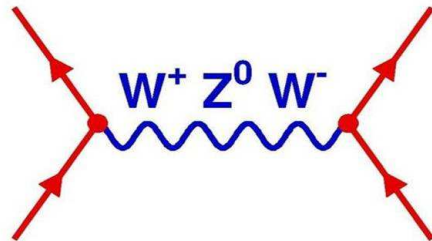
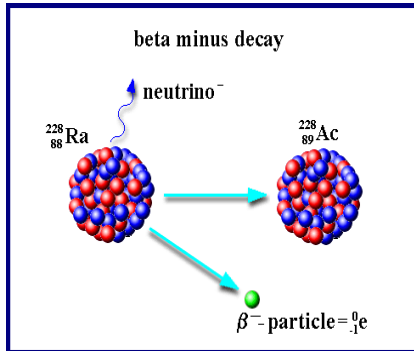
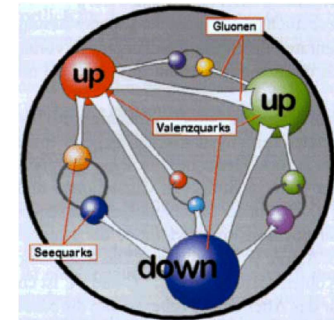
Teilchen als Kraftvermittler



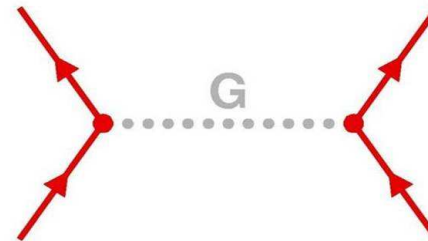
elektromagn. Kraft



starke Kraft



schwache Kraft



Gravitation

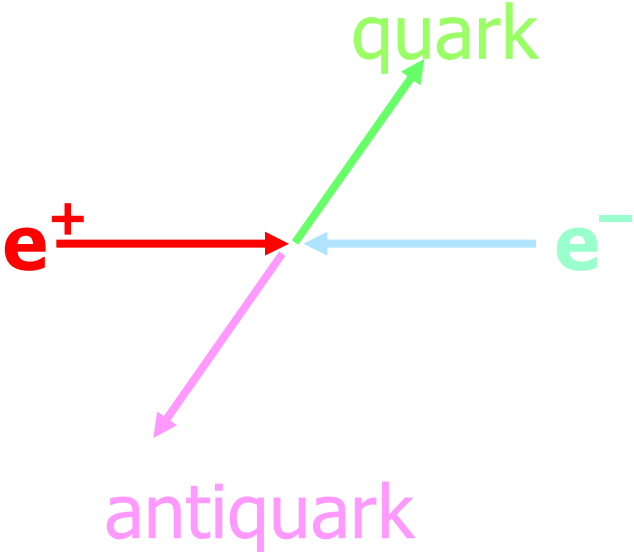
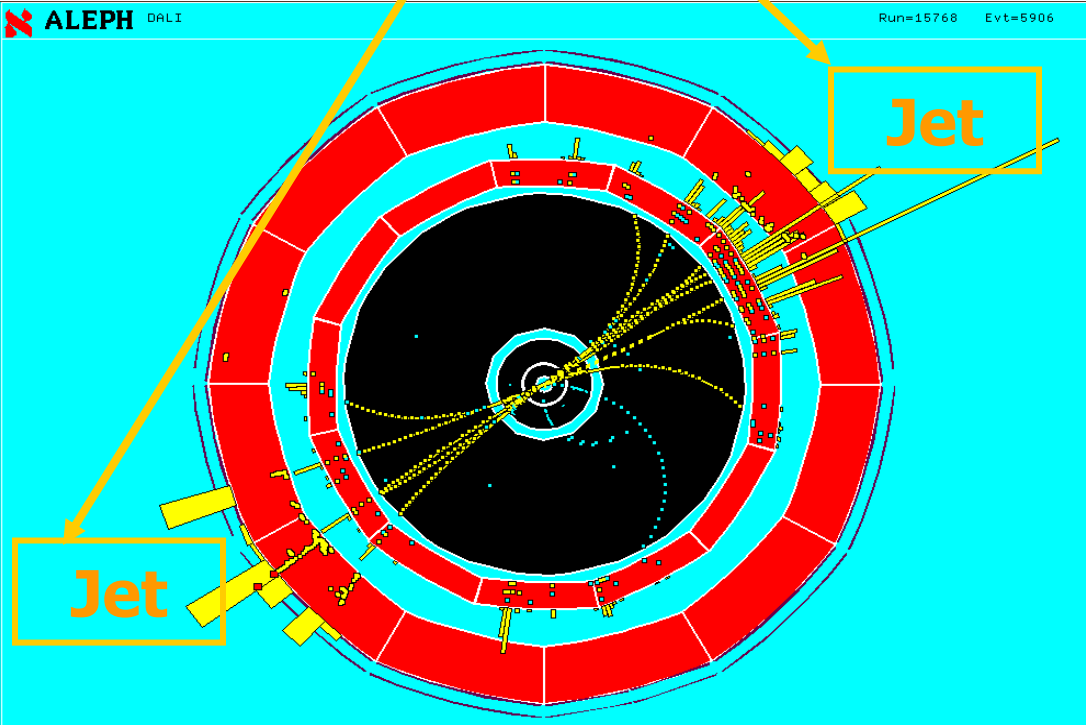
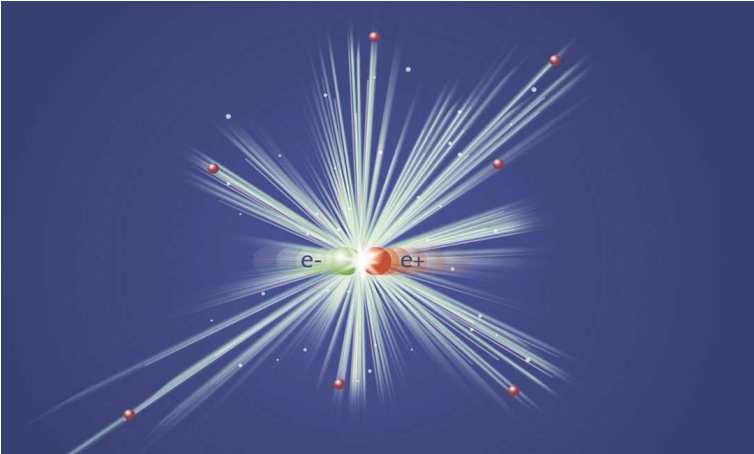


Austauschteilchen sind die Quanten der Kraftfelder

Erzeugung von Quarks und Antiquarks aus Energie

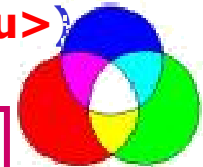
man sieht Bündel neuer Teilchen

Warum sieht man keine einzelnen Quarks?



Die starke Kraft: „Quantenchromodynamik“

Quarks erscheinen nur im Verband (Bsp Proton = $|uud\rangle$, Neutron = $|ddu\rangle$)
 Quarks erscheinen frei beweglich im Verband

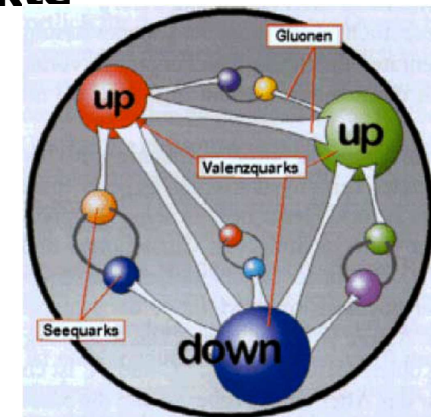
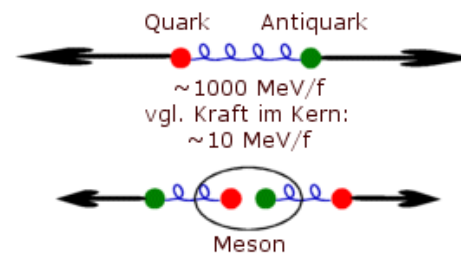
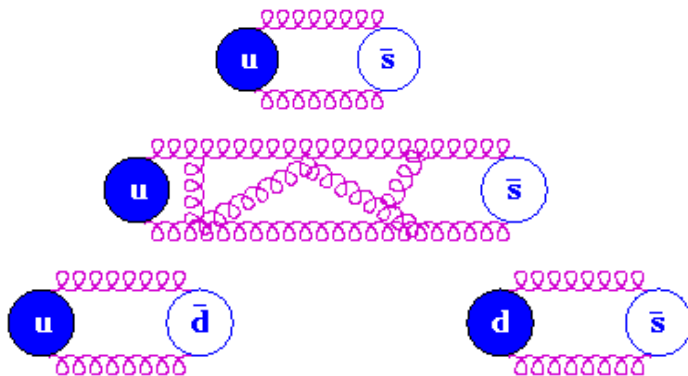


Grund:

3 Ladungen: **rot, grün, blau**

Eigenschaft der starken Kraft:

- die notwendige Energie zum separieren von Quarks **wächst mit dem Abstand** (Analogie: Federkraft)
- Gluonen tragen Farbladung und **koppeln aneinander**
- **Quarks sind eingesperrt**, es gibt nur farbneutrale Objekte



Nützliche Einheiten für Teilchen

- **Größe:**

1 fm = 1 Femtometer („Fermi“) = 10^{-15} m
(1 μm = 1.000.000.000 fm)

- **Energie:**

1 eV = 1 Elektronvolt = $1.6 * 10^{-19}$ J

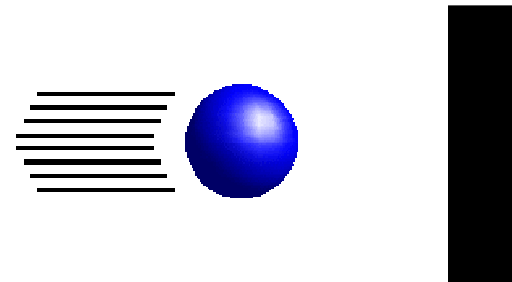
**(eine Ladung auf einem
Meter bei 1 V Spannung)**



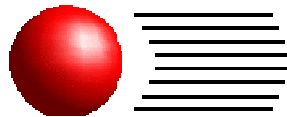
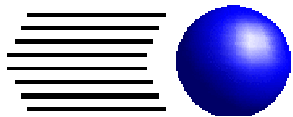
**1 GeV: „viel“ für ein Teilchen, aber makroskopisch winzig:
könnte Taschenlampe (1,6 Watt) für ganze
0,000.000.0001 Sekunden zum Leuchten bringen**

Vom Beschleuniger zum Collider

Ein **Beschleuniger** lenkt einen Strahl von beschleunigten Teilchen auf ein festes Ziel.



Collider – zwei kombinierte Beschleuniger:
Zwei Teilchenstrahlen werden beschleunigt
und zur Kollision gebracht:
Größere Energien werden erreicht



Arten von Collidern

- **Elektron-Positron-Collider:** Präzisionsmessungen

- LEP, CERN in Genf bis 2000

(bis 105 GeV pro Strahl)

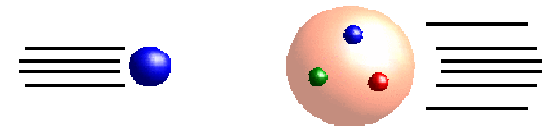
- ILC (International Linear Collider) ab 2015(?)



- **Elektron-Proton-Collider:** Substrukturmessungen

- HERA, DESY in Hamburg, bis 2007

(e: 30 GeV, p: 920 GeV)



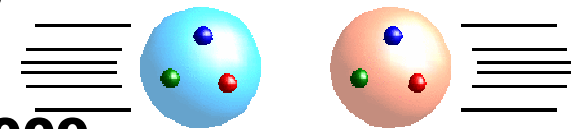
- **Hadron-Hadron-Collider:** Entdeckungsmaschinen

- TEVATRON, FERMILAB in Chicago, bis 2009

(900 GeV pro Strahl)

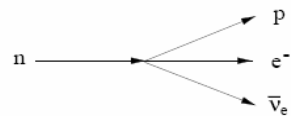
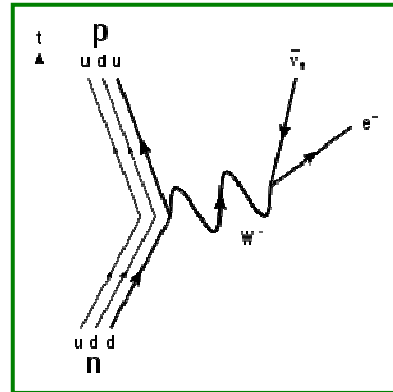
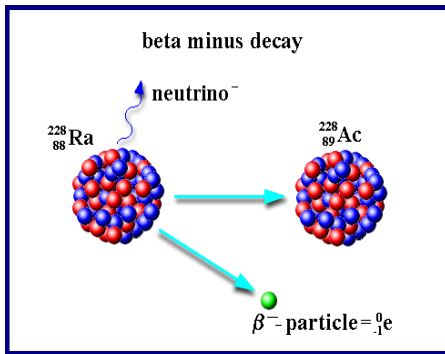
- LHC, CERN in Genf (Proton-Proton) seit 2009

(7000 GeV pro Strahl)



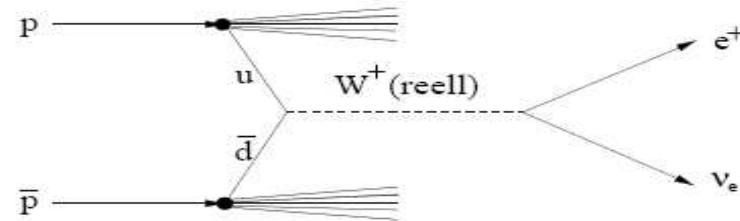
Die Schwache Wechselwirkung

1. Zerfall eines freien Neutrons/ β-Zerfall: Schwache Wechselwirkung!



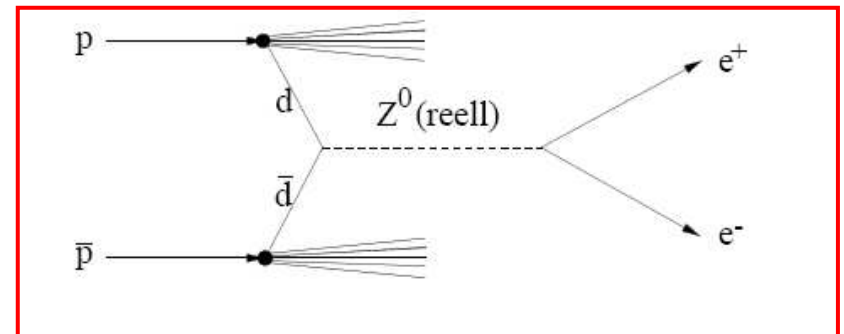
Quark-Umwandlungsprozess!

2. Nähere Untersuchung an Beschleunigern

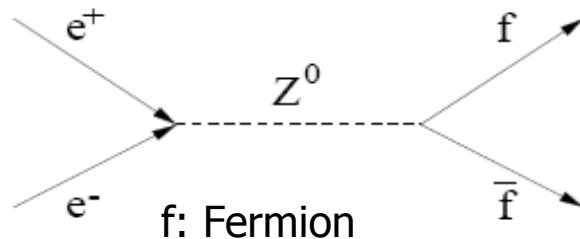


Entdeckung des Austauschteilchens!

Beobachtung von "Neutralen" Strömen:



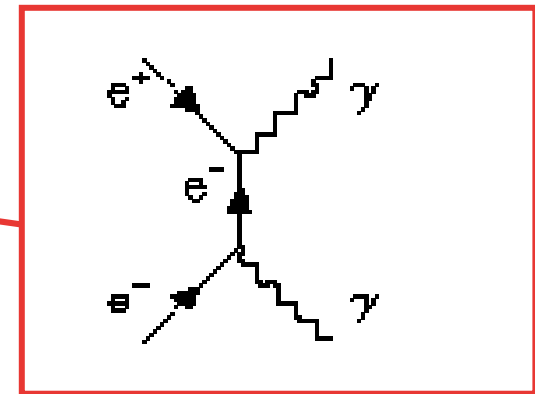
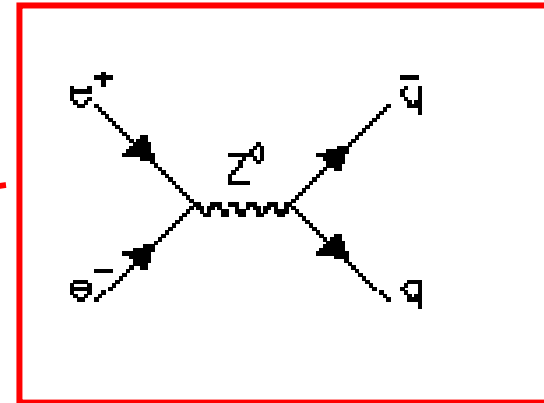
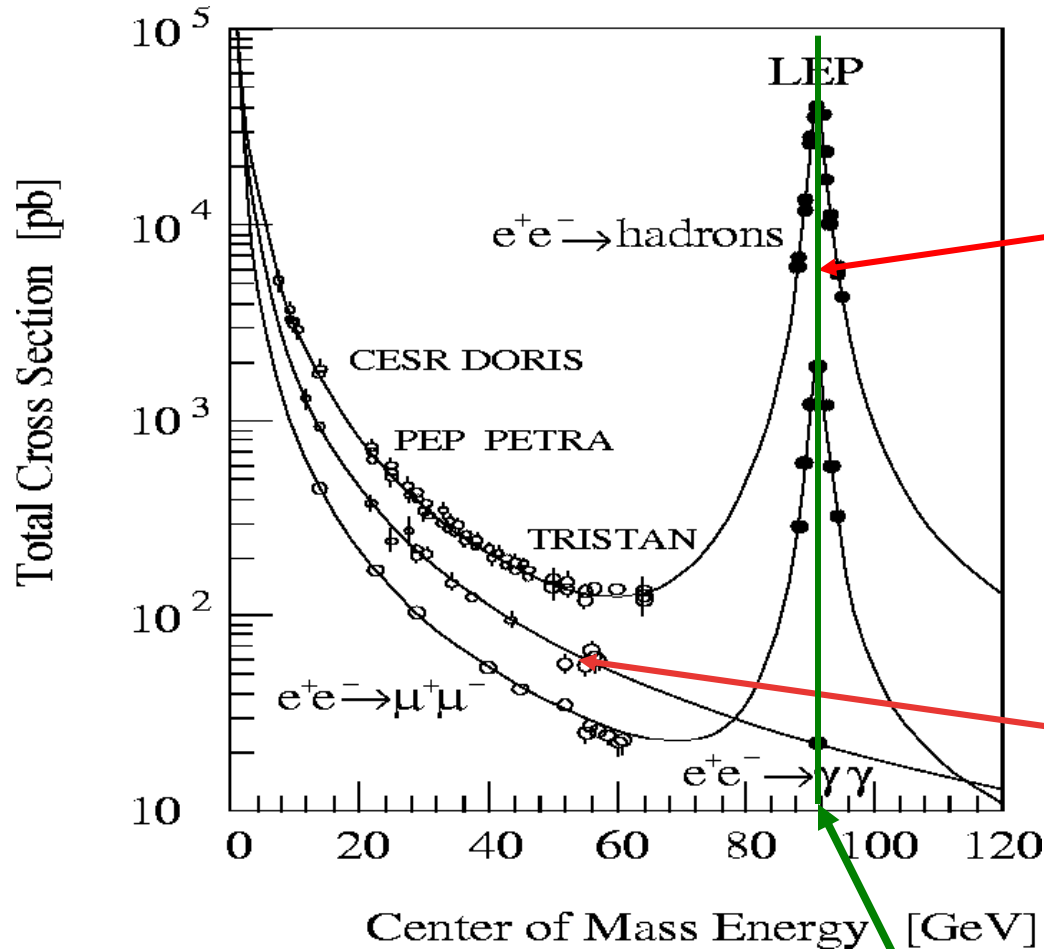
3. Genaue Untersuchung der neutralen Ströme



Das Z-Boson

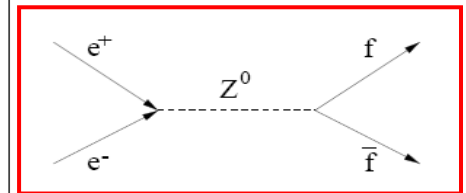
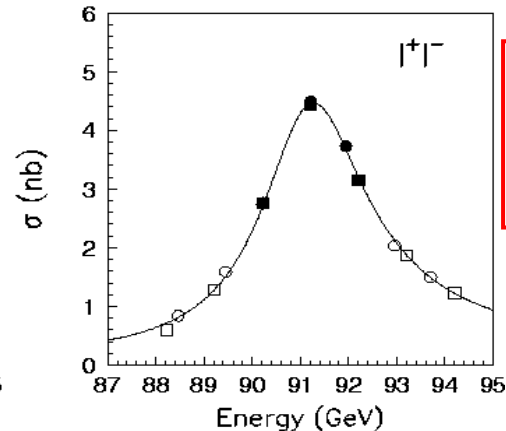
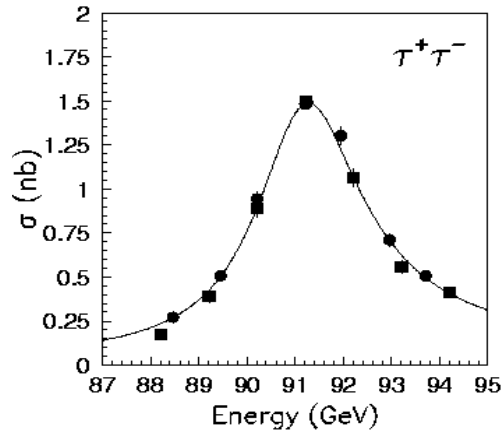
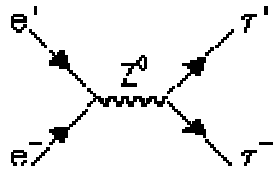
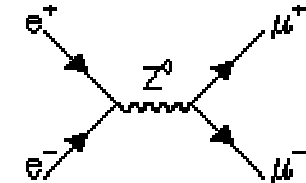
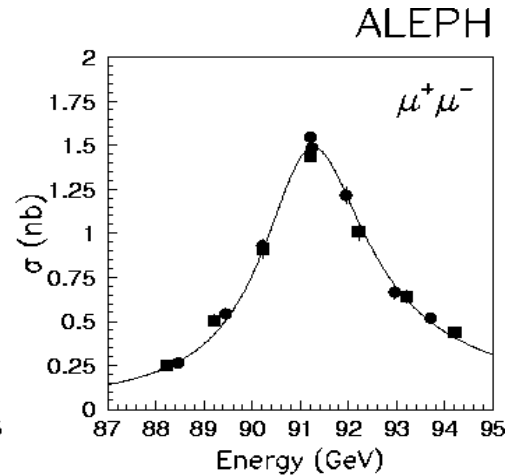
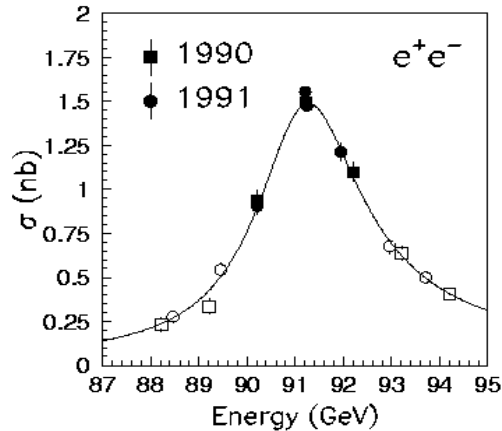
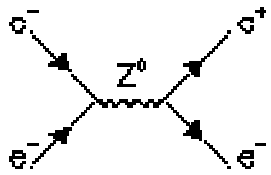
- eins der drei Botenteilchen (Austauschteilchen) der schwachen Wechselwirkung
- elektrisch neutral
- Zerfällt in "Fermionen":
 - Quark-Antiquark-Paare (im Detektor als zwei Jets sichtbar)
 - Lepton-Antilepton-Paare: $e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$
 - Neutrino-Antineutrino-Paare: $\nu\bar{\nu}$
 - unbekannte Teilchen?

Erzeugung von Z-Bosonen am Beschleuniger



Z^0 -Boson: grosse Masse, **resonante Erzeugung**, wenn die **Energie gleich der Masse** ist

Zerfallskanäle des Z-Bosons



f: Fermion

Vorhersage der Theorie: **Zerfallswahrscheinlichkeit für alle drei Leptonen gleich**

Die Zerfallsbreite

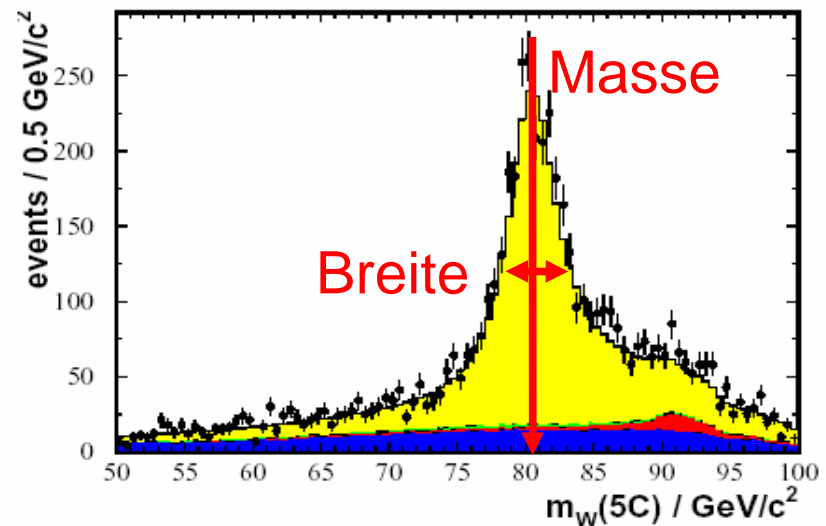
- Was ist eine Zerfallsbreite?

- Heisenberg'sche Unschärferelation:
- Masse und Energie sind äquivalent
- jedes instabile Teilchen hat eine Energieunschärfe, die sich als Massenunschärfe bemerkbar macht
- Beispiel: W-Boson
 - Punkte: Daten
 - farbige Flächen: theoretische Modelle

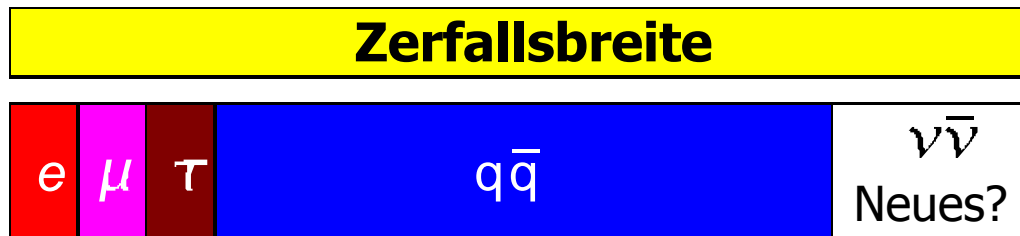
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Z-Boson:

- Zerfallsbreite 2.5 GeV
- Lebensdauer 10^{-25} s

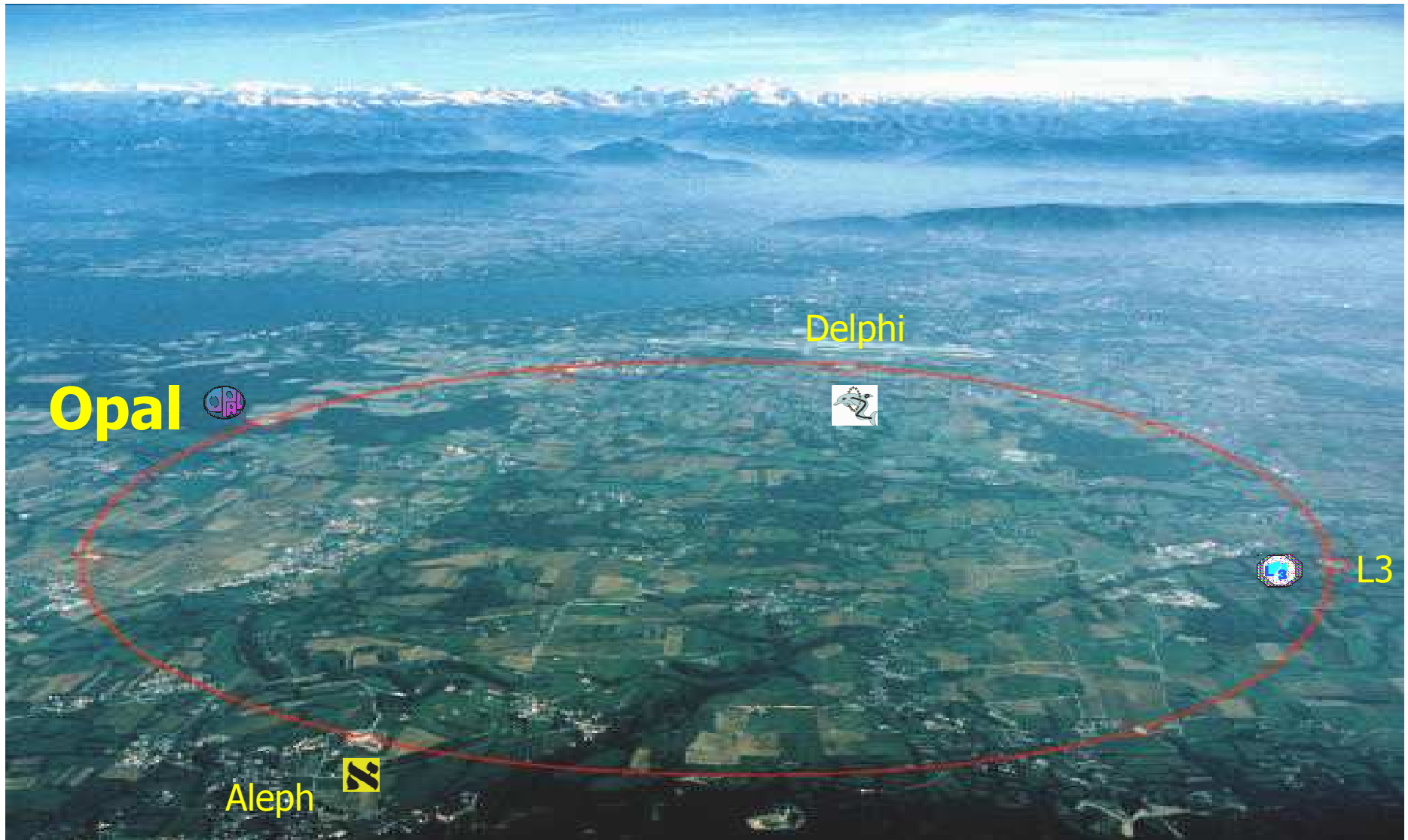


Die Zerfallsarten: Verzweigungsverhältnisse



- **Messungen:**
 - **Auszählen der Zerfallsarten:**
 - Wieviele Ereignisse in jedem Zerfallskanal?
 - Stimmen die vorhergesagten Verhältnisse?
 - **Vergleich mit der Zerfallsbreite:**
 - Wieviele Sorten Neutrinos gibt es?
 - Gibt es noch andere (vorher nicht entdeckte) Teilchen, die leichter als die halbe Z-Masse sind?
- **Verifikation der Vorhersagen der Theorie:**
 - Zerfall in Leptonen gleich wahrscheinlich („Leptonuniversalität“ = Myonen und Taus verhalten sich wie Elektronen)
 - Zerfall in Quarks viel wahrscheinlicher als Zerfall in geladene Leptonen
 - Summe aller Zerfälle ergibt Zerfallsbreite

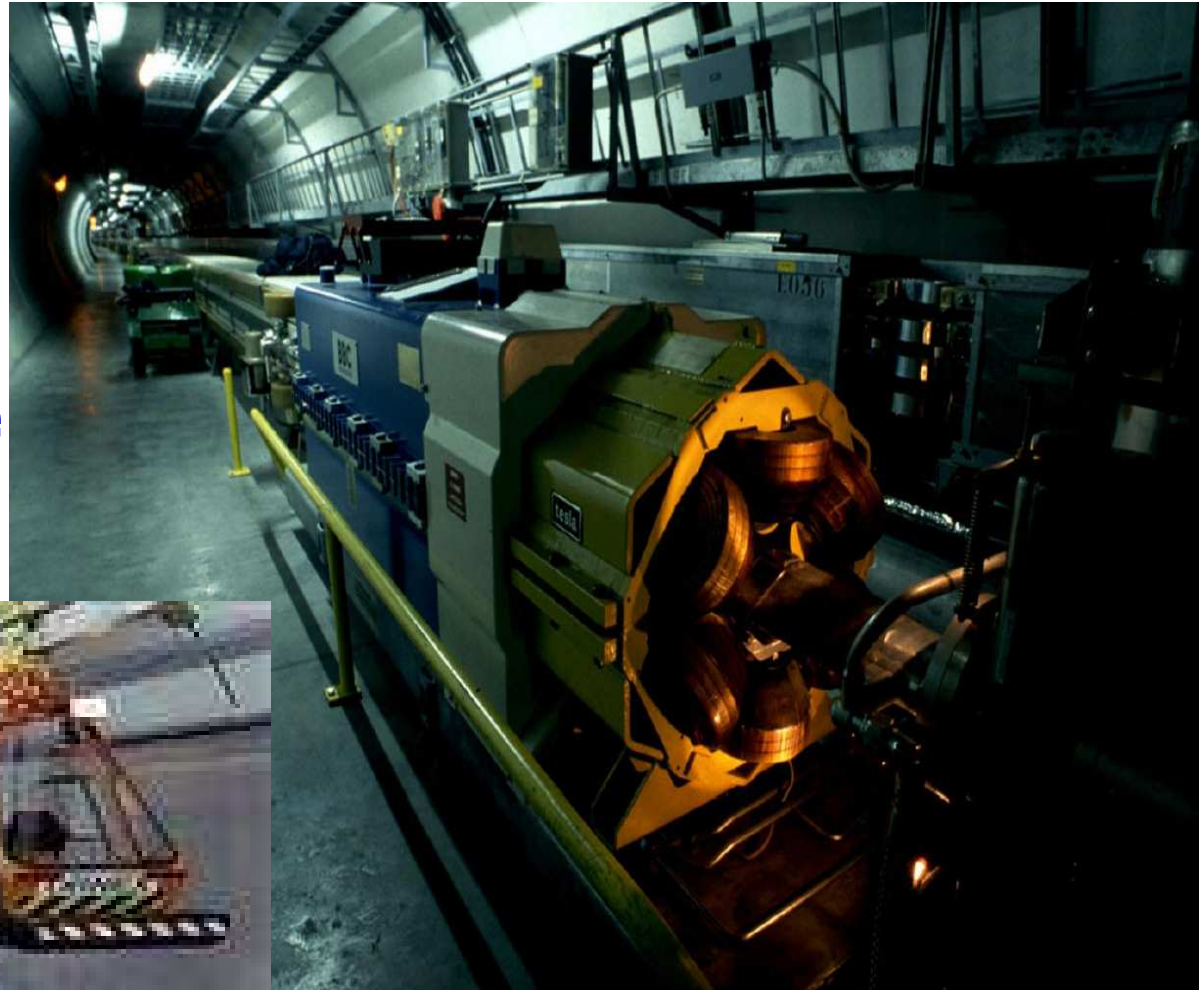
LEP: Der Large Electron Positron Collider



Blick in den LEP-Tunnel

**LEP-Tunnel:
Umfang von 27 km**

**Wenige Zugänge:
lange Transportwege**



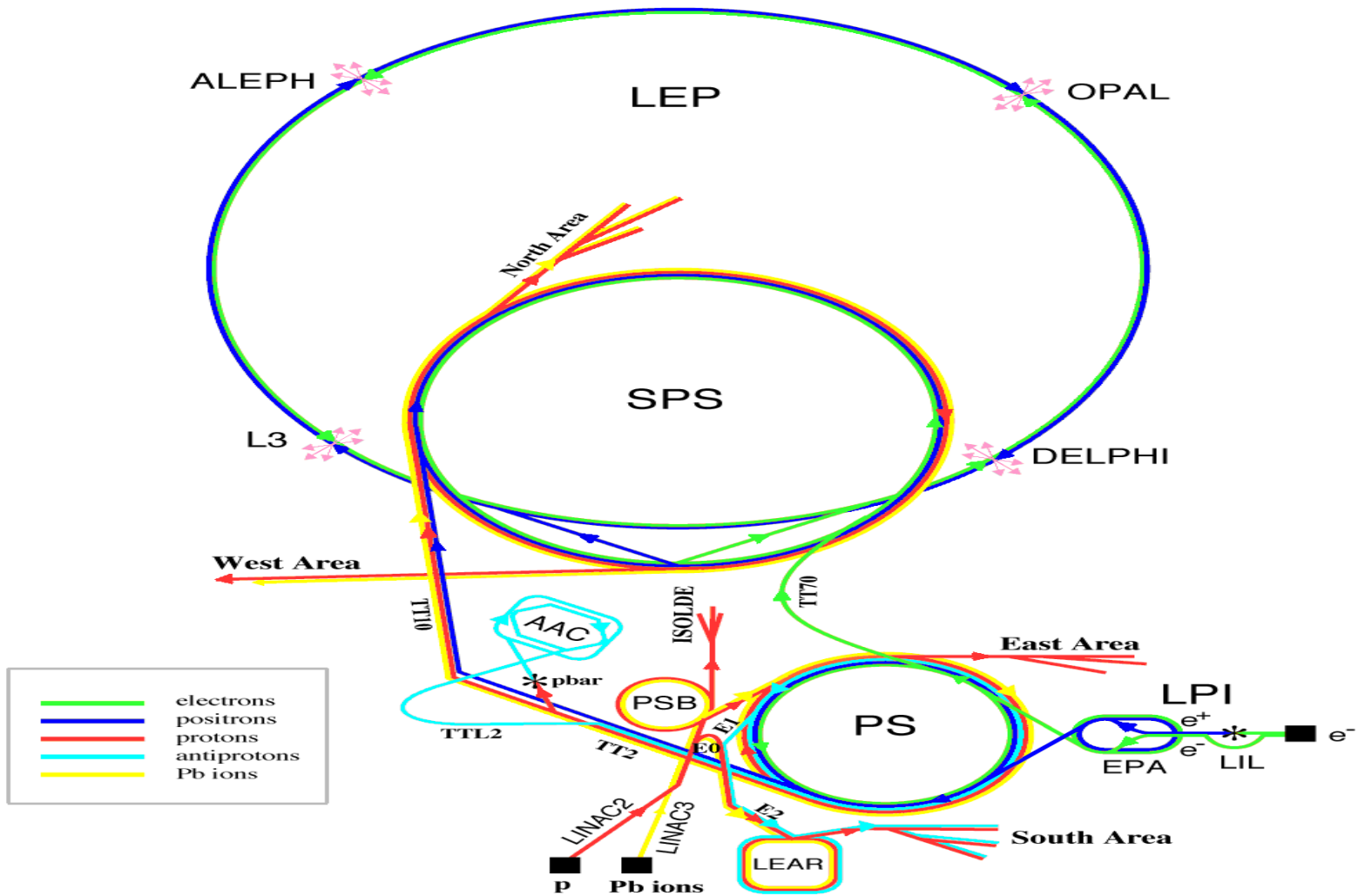
LEP: Magnete und Beschleuniger



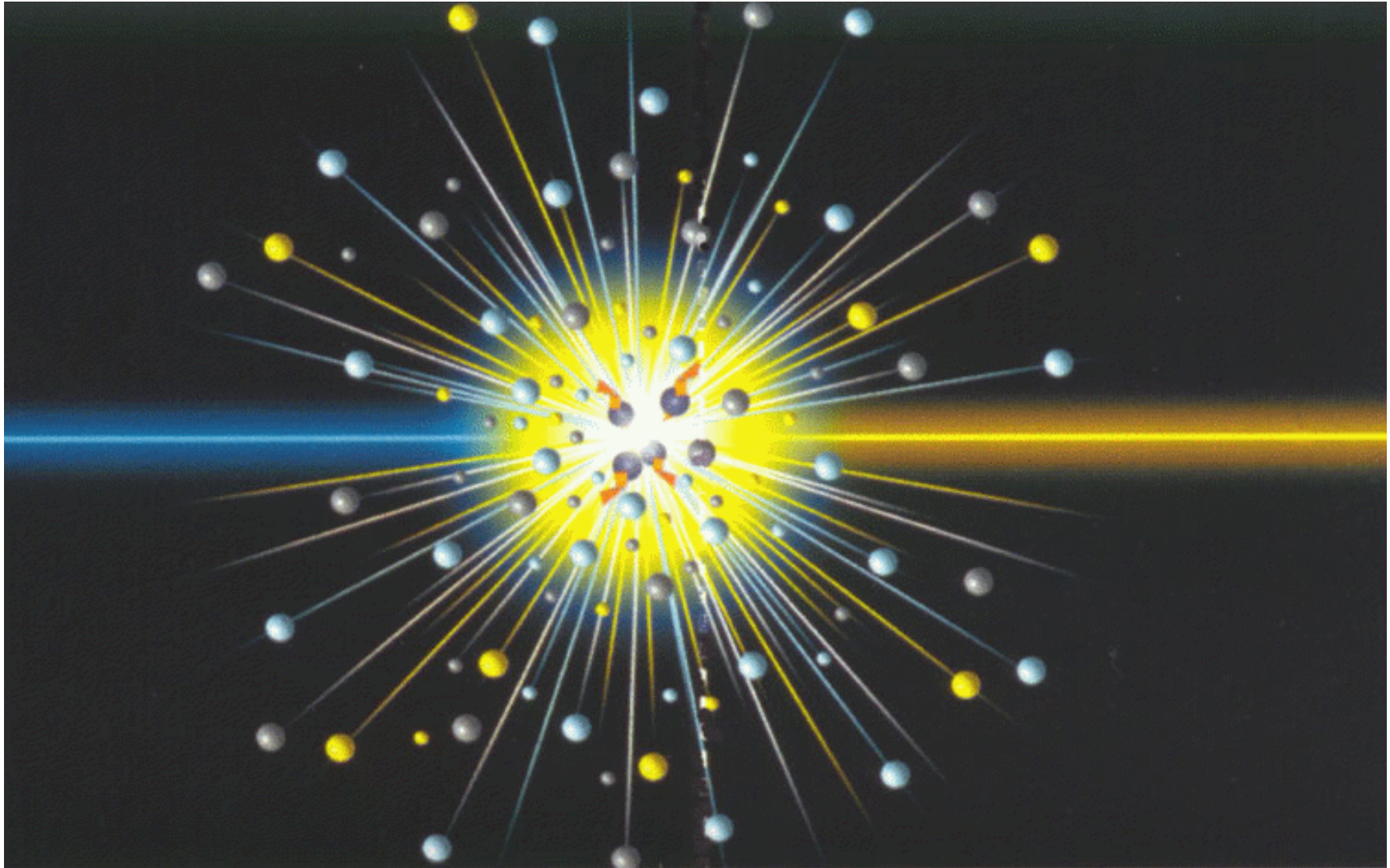
Martin zur Nedden

CERN Master Class 2010
Lehrerfortbildung

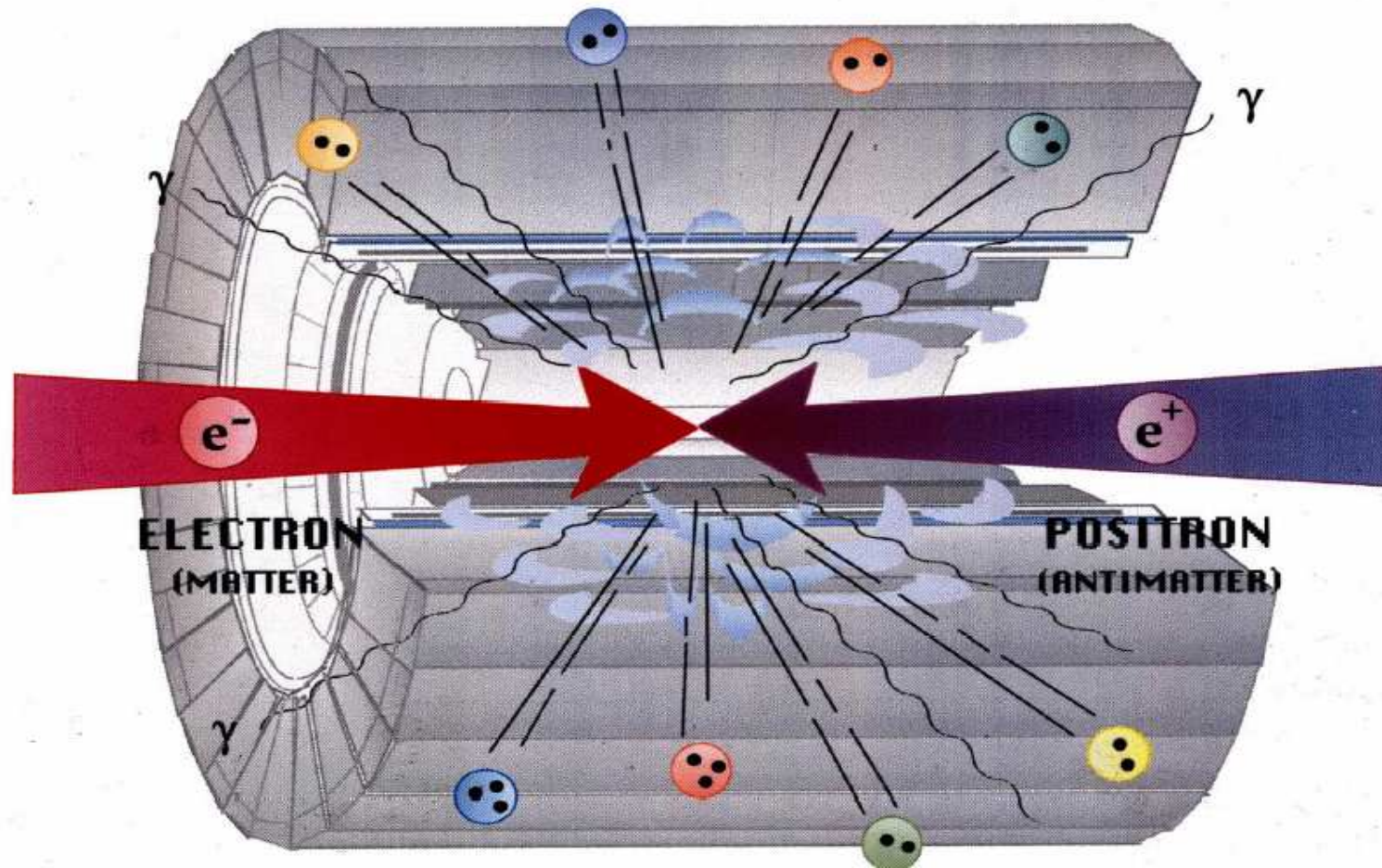
Beschleuniger-Systeme am CERN



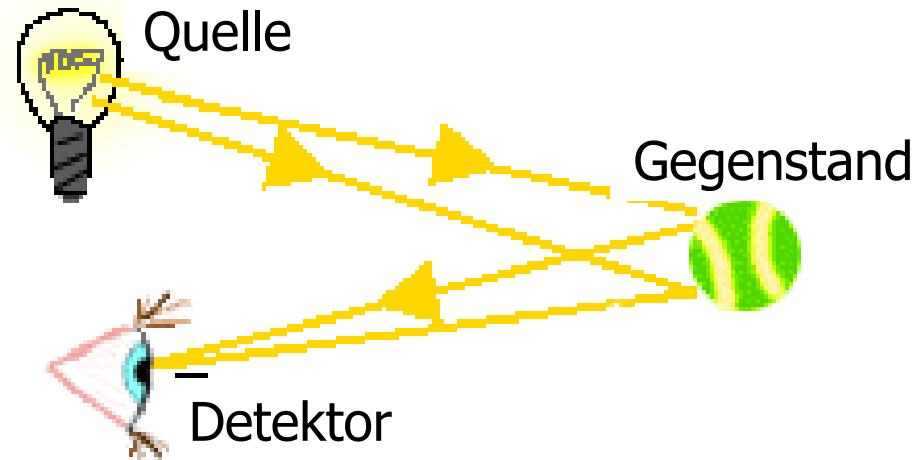
Neue Teilchen entstehen ...



... und sollen jetzt von IHNEN nachgewiesen werden!



Detektoren – die Augen der Teilchenphysiker



- **Teilchen sind zu klein, um sie mit bloßen Auge zu sehen**
- **Teilchen müssen wechselwirken, um nachweisbar zu sein.**

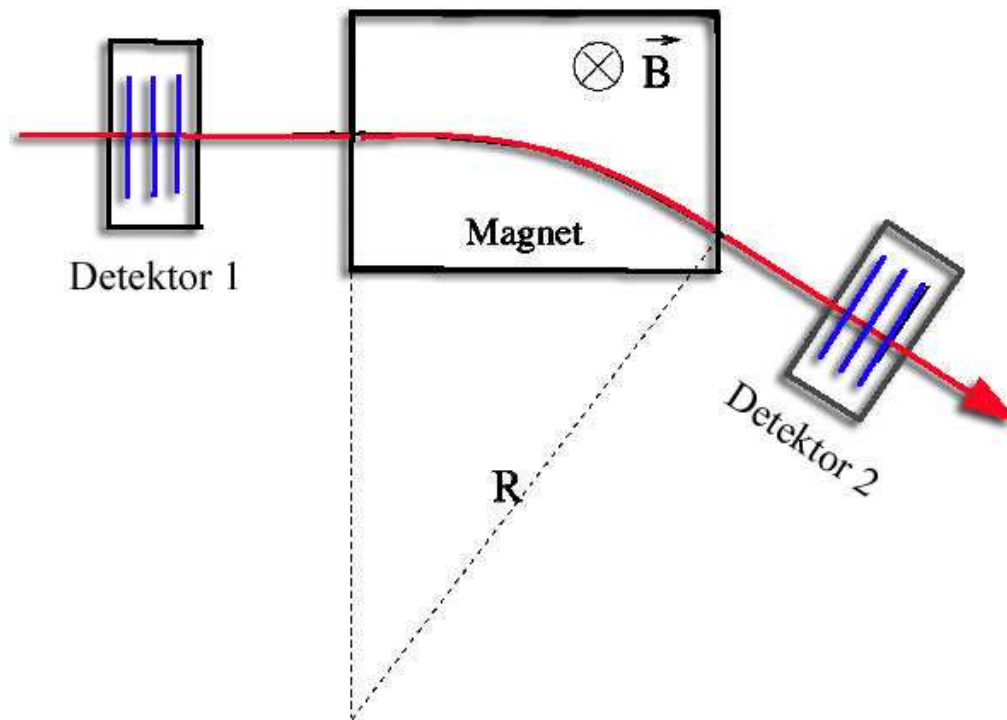
Voraussetzung für den Nachweis: Wechselwirkung der Teilchen mit Materie

Verschiedene Arten der Wechselwirkung:

- **Schwerkraft:** gut für den Nachweis von Kometen,
für Teilchen nicht sehr hilfreich
- **Elektromagnetisch:** Ionisation, Szintillationslicht
Photoeffekt
elektromagnetische Schauer (e^\pm, γ)
- **Stark:** Kern-WW (Neutron-Nachweis),
hadronische Schauer
- **Schwach:** Neutrino-Nachweis (inverser β -Zerfall)

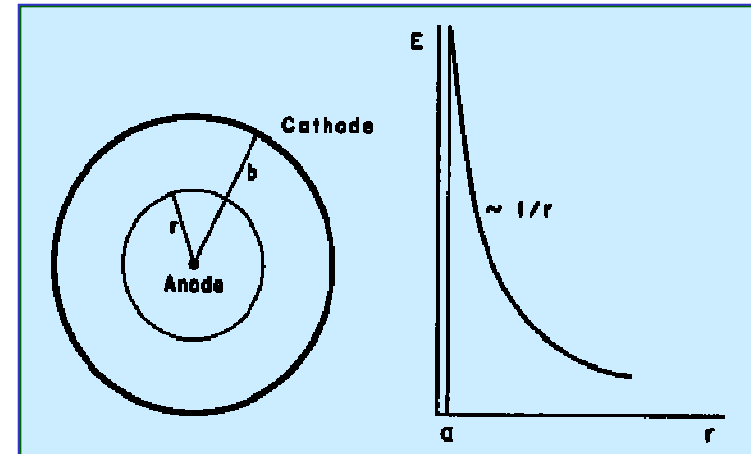
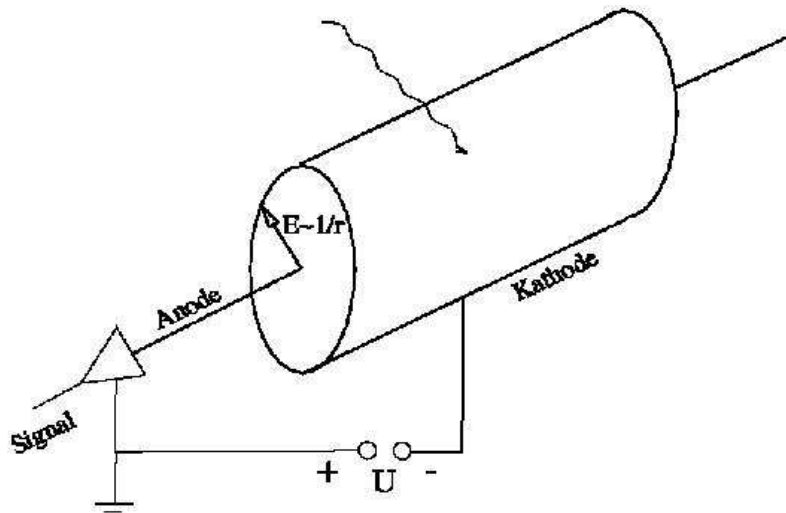
Impulsmessung: Prinzip

Impuls = Masse \times Geschwindigkeit

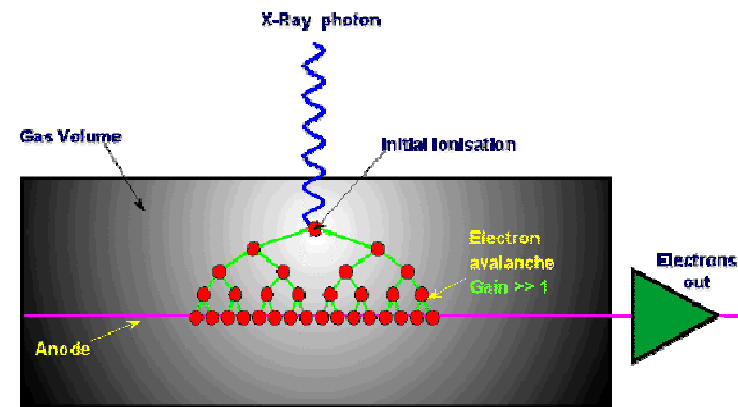


- Stärke der Krümmung \rightarrow Impuls
- Richtung der Krümmung \rightarrow Ladung
- Rückführung der Impulsmessung auf eine Ortsmessung
- Häufig ganze Detektoren im Magnetfeld

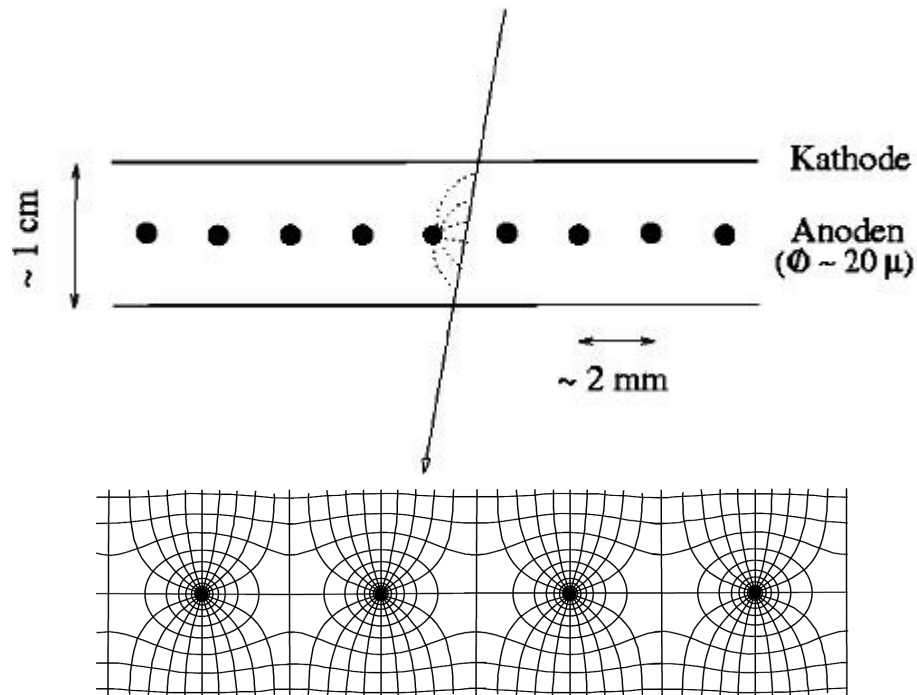
Ortsmessung: z.B. Geiger-Müller-Zähler



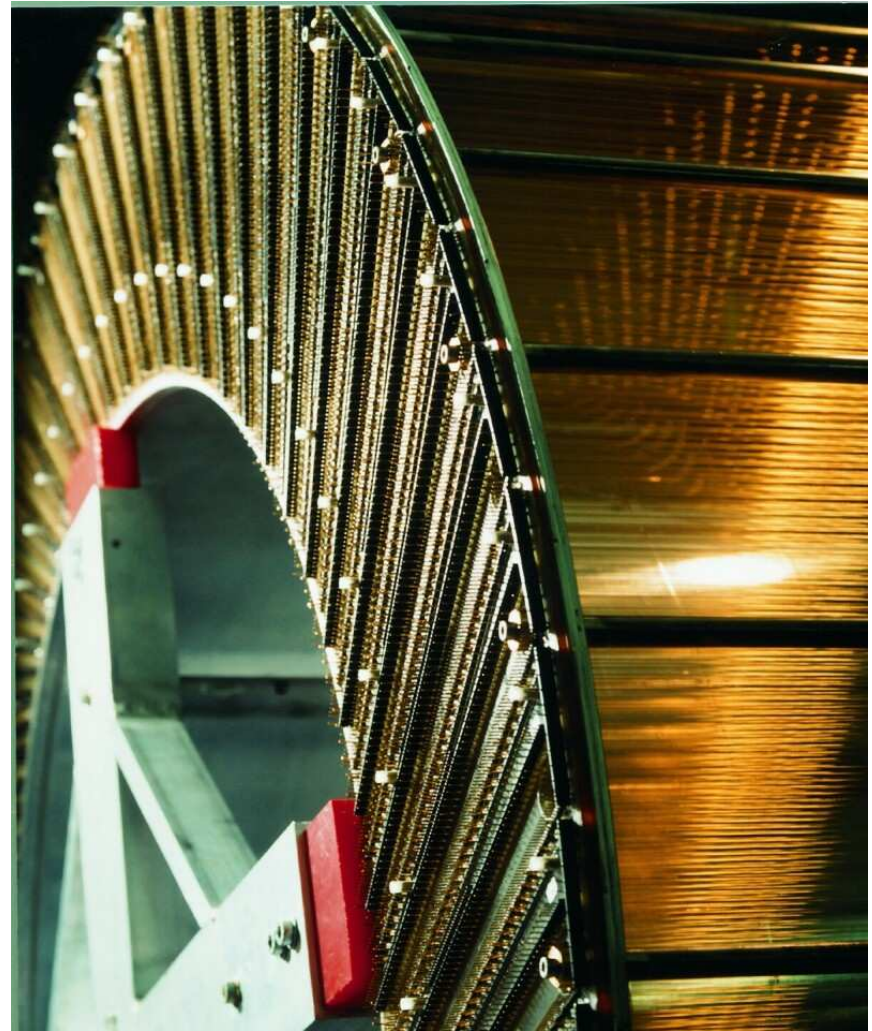
- Ionisationsladungen driften zum Anodendraht → elektrisches Signal durch Gasverstärkung
- Elektronische Auslese



Ortsbestimmung: Spurkammern

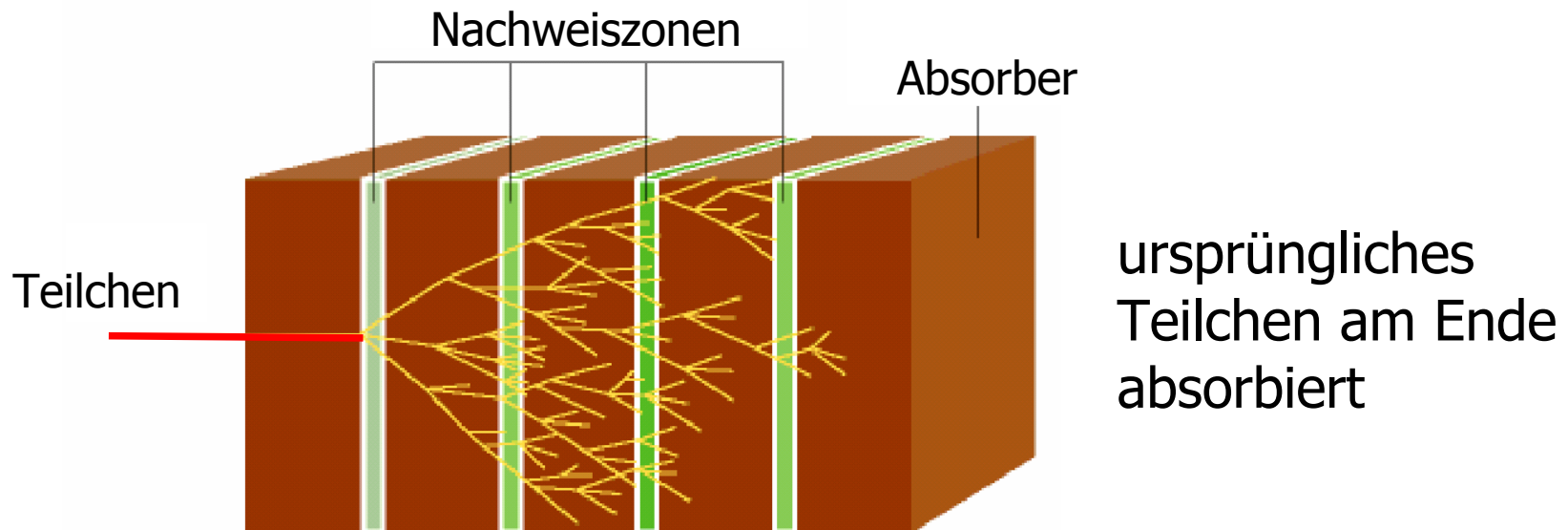


- oft mehrlagig
- Messung von Flugrichtung und Zerfallsstrecke



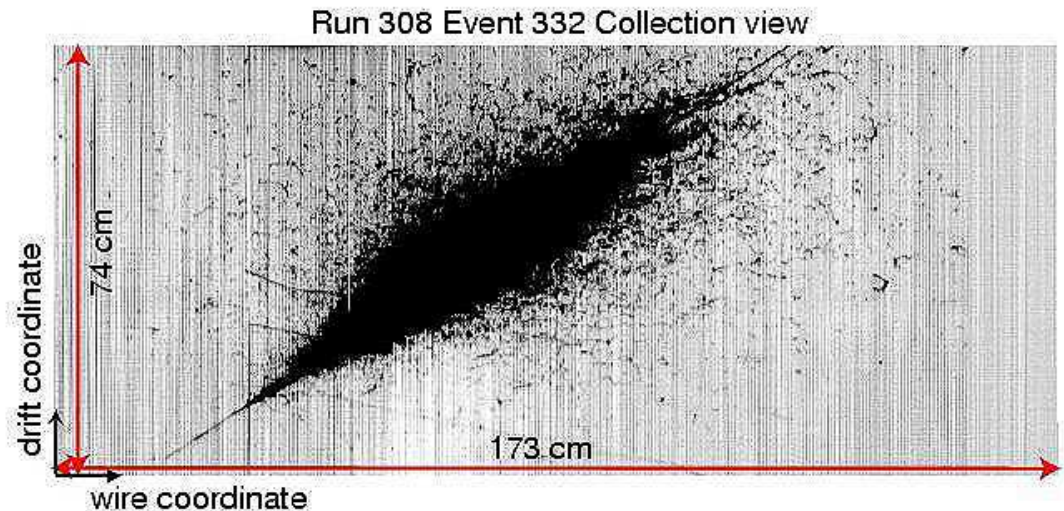
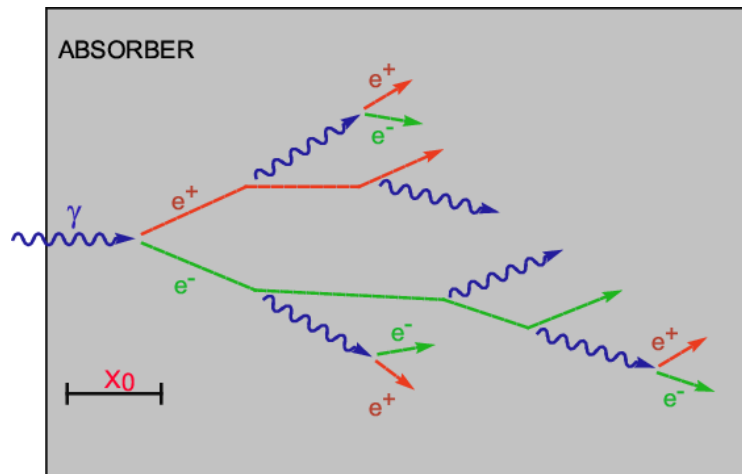
Energiemessung: Prinzip

- Teilchen geben in Materie ihre Energie durch Produktion neuer Teilchen ab → Schauer
- Anzahl der Teilchen im Schauer ist proportional zur Energie
- Messung von Szintillationslicht in den Nachweiszonen

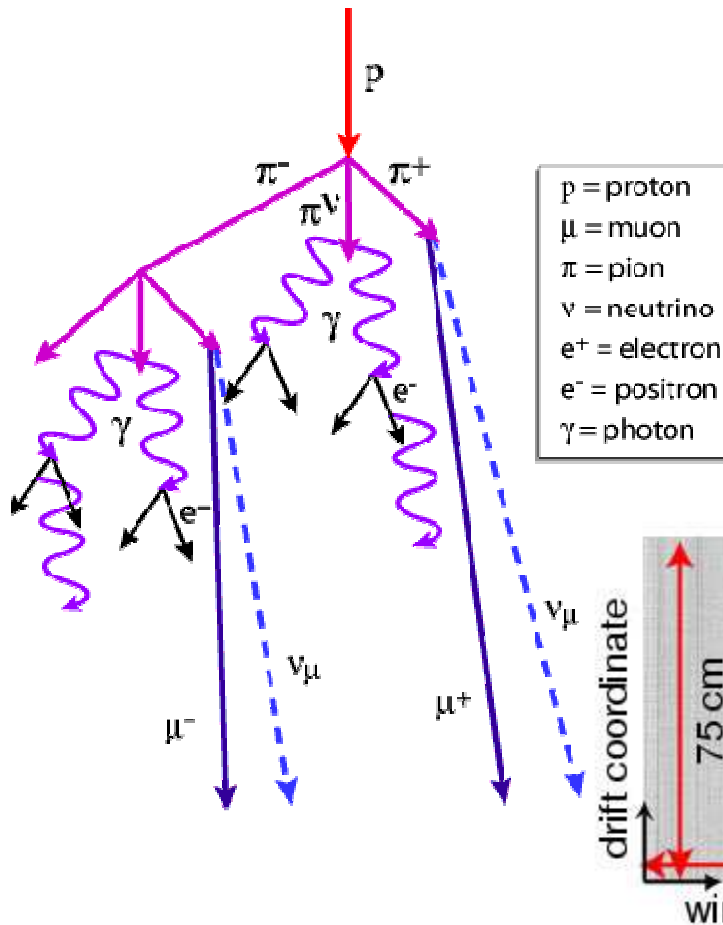


Messung der Energie: Kalorimeter

- elektromagnetisches Kalorimeter
 - Elektronen/Positronen und Photonen verursachen in Materie Schauer aus Photonen und Elektron-Positron-Paaren
 - kurze, kompakte Schauer



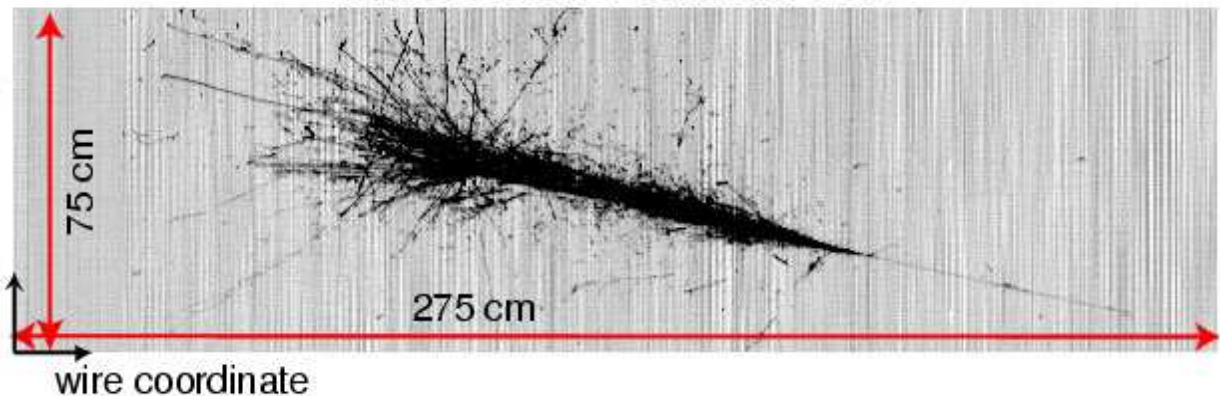
Messung der Energie: Kalorimeter



- hadronisches Kalorimeter

- Hadronen (z.B. Protonen, Pionen, Neutronen) verursachen in Materie Schauer aus weiteren Hadronen
- tiefe, ausgedehnte Schauer

Run 308 Event 7 Collection view



„Besondere“ Teilchen



Myon (1/10 Protonmasse)

- Schwerere Ausgabe des Elektrons
- wenig Wechselwirkung mit Materie
- durchdringen fast alles
- hinterlassen nur wenig Energie



Neutrinos (fast masselos)

- elektrisch neutral, schwache Wechselwirkung mit Materie
- entkommen unerkannt und machen sich durch „verschwundene“ Energie bemerkbar



Tau (~ 2 Protonmassen)

- Schwerere Ausgabe des Myons
- Viele Zerfallskanäle, Zerfallskaskaden
- Neutrinos, leichtere Leptonen und Hadronen entstehen

Tau-Zerfälle

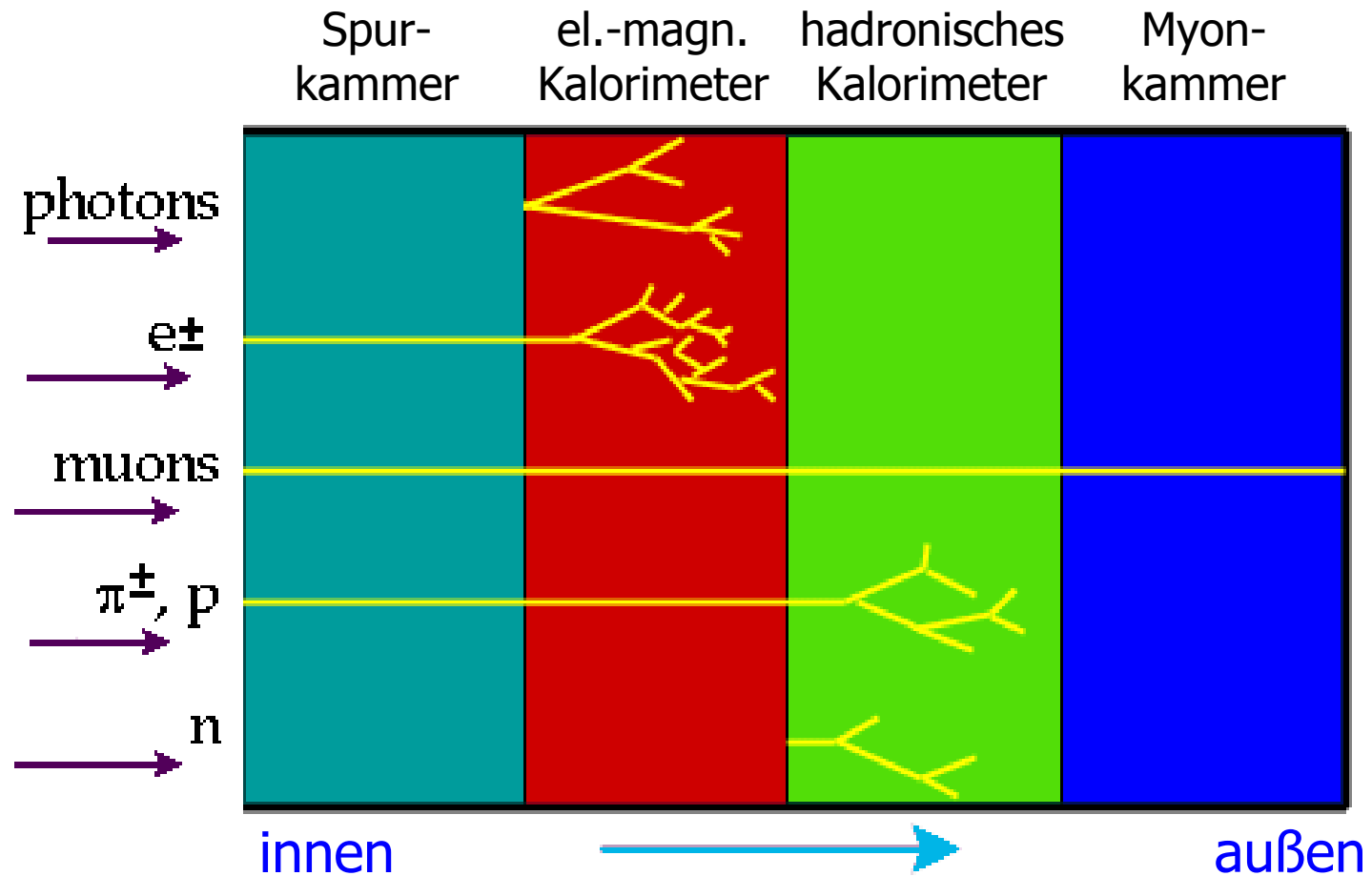


- Hadronen und Leptonen unter den Zerfallsprodukten – mit entsprechenden Schauern
- Neutrinos verraten sich durch "fehlende" Energie
- Schwierig!

Tabelle: Die Zerfallsmodi des Tau-Leptons mit den größten Verzweungsverhältnissen am Beispiel des τ^- -Zerfalls.

Zerfallsmodus	Verzweungsverhältnis	
$\pi^- \pi^0 \nu_\tau$	$24.0\% \pm 0.6\%$	1-prong
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	$17.9\% \pm 0.3\%$	1-prong
$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	$17.6\% \pm 0.3\%$	1-prong
$\pi^- \nu_\tau$	$11.6\% \pm 0.4\%$	1-prong
$\pi^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$	$5.6\% \pm 0.7\%$	3-prong
$\pi^- \pi^- \pi^+ \pi^0 \nu_\tau$	$4.4\% \pm 1.6\%$	3-prong
$\pi^- \pi^0 \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$	$3.0\% \pm 2.7\%$	1-prong

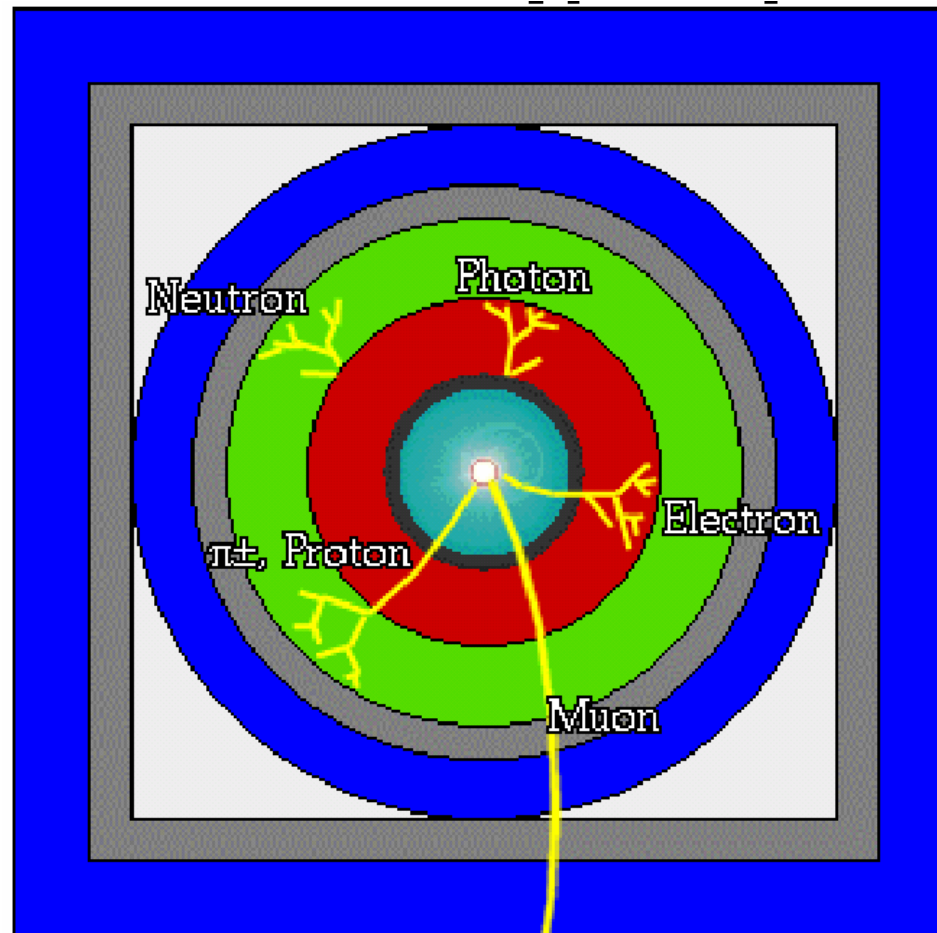
Unterscheidung der Teilchensorten



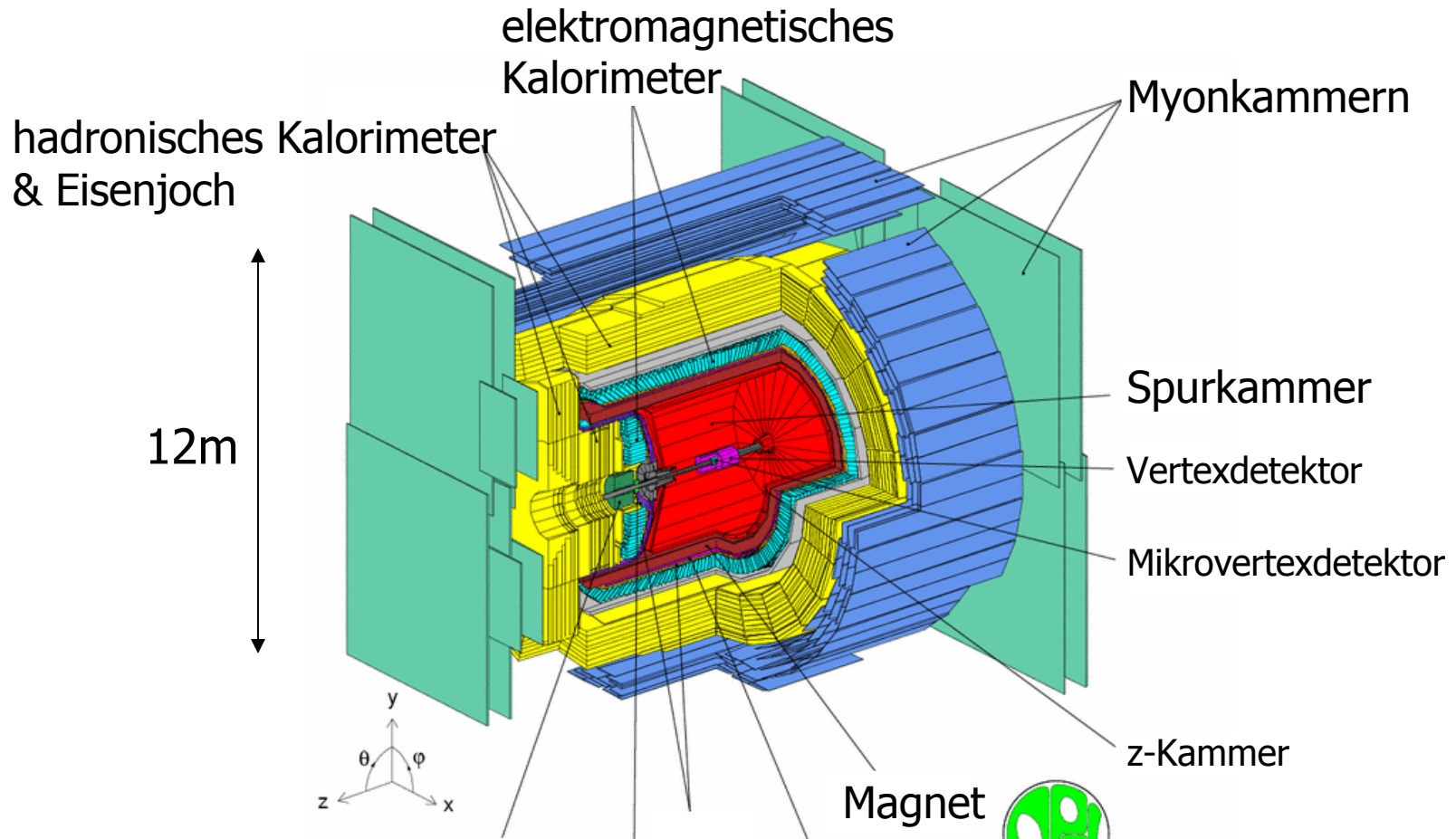
Schematischer Aufbau eines Detektors

Zwiebelschalenartiger Aufbau aus verschiedenen Komponenten

- Strahlrohr
- Spur-
kammer
- Magnet
- el.-magn.
Kalorimeter
- hadron.
Kalorimeter
- Eisenjoch
- Myon-
kammer



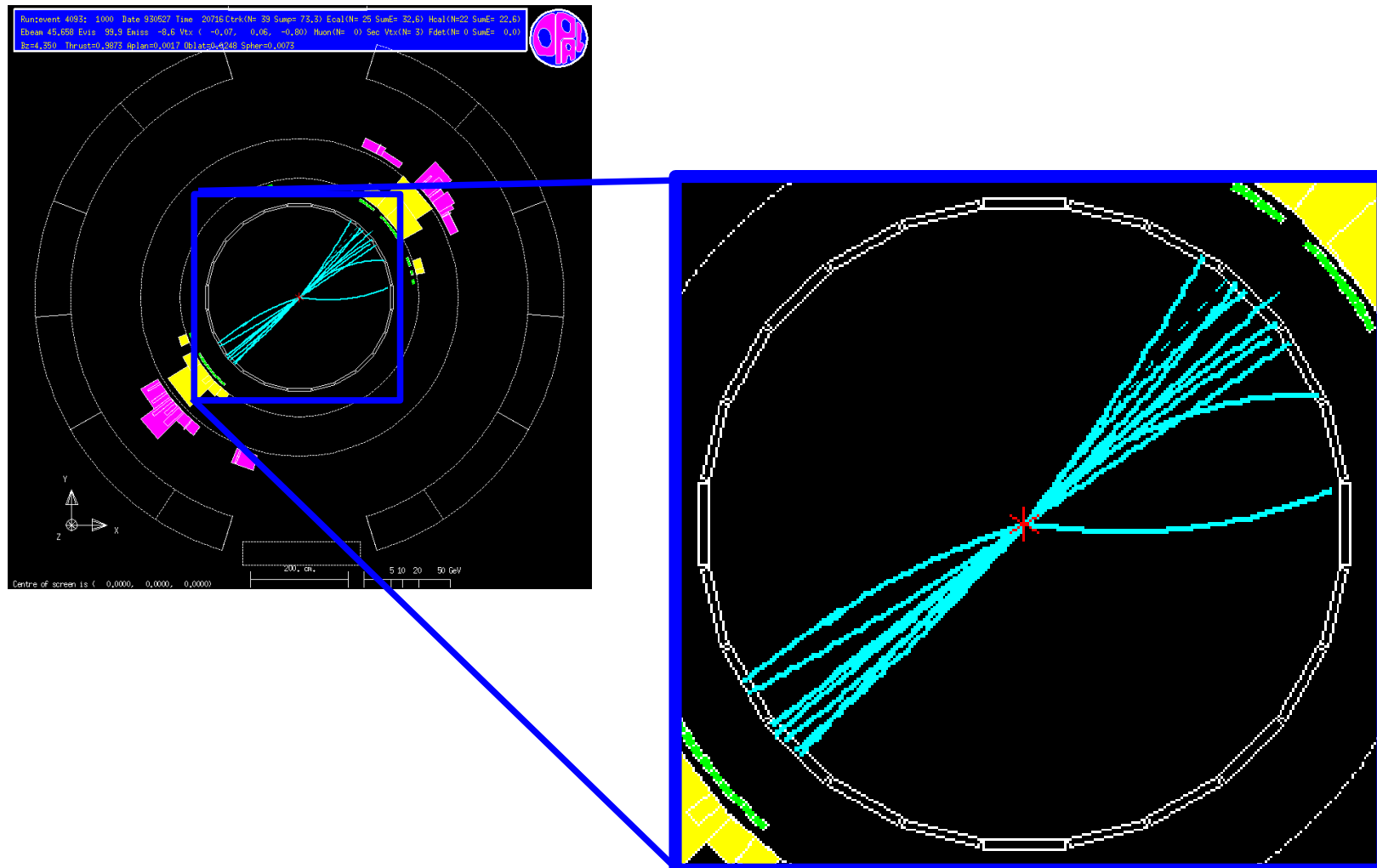
Der OPAL-Detektor



Omni Purpose Apparatus at LEP (1989-2000)



Ein Ereignis im OPAL-Detektor



Martin zur Nedden

CERN Master Class 2010
Lehrerfortbildung