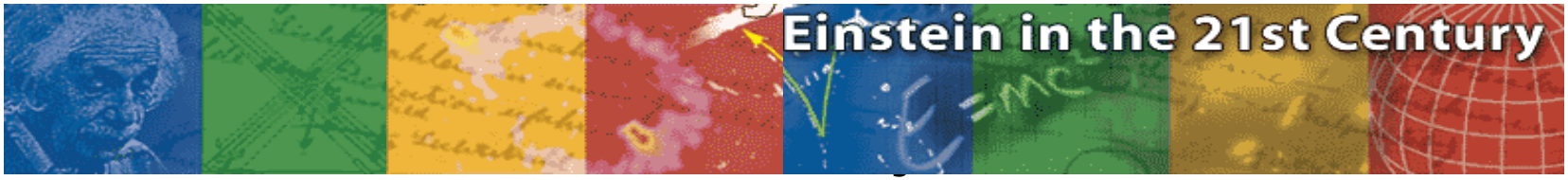
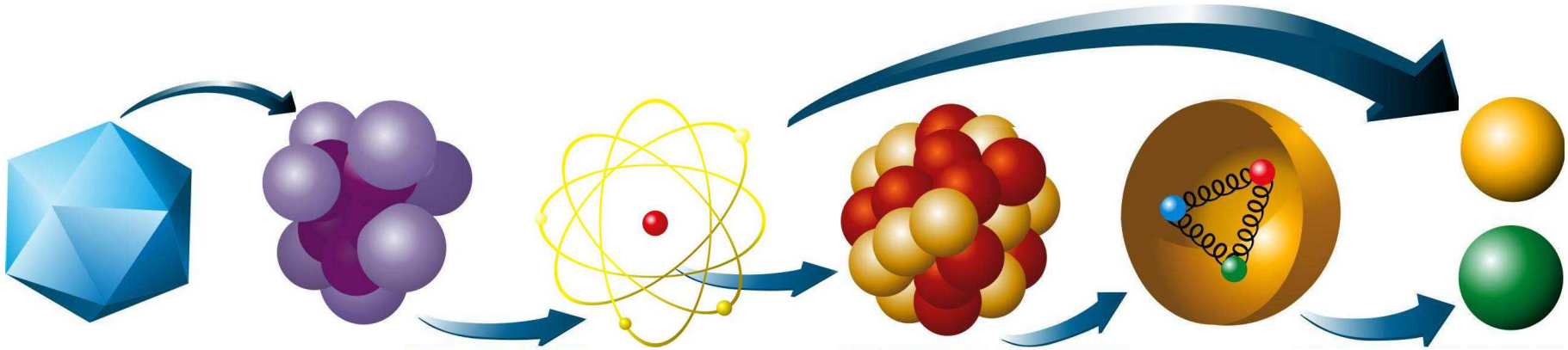
Das Unsichtbare sichtbar machen

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



Der Aufbau der Materie



1/10.000.000 | 1/10 | 1/10.000 | 1/10 | 1/1.000

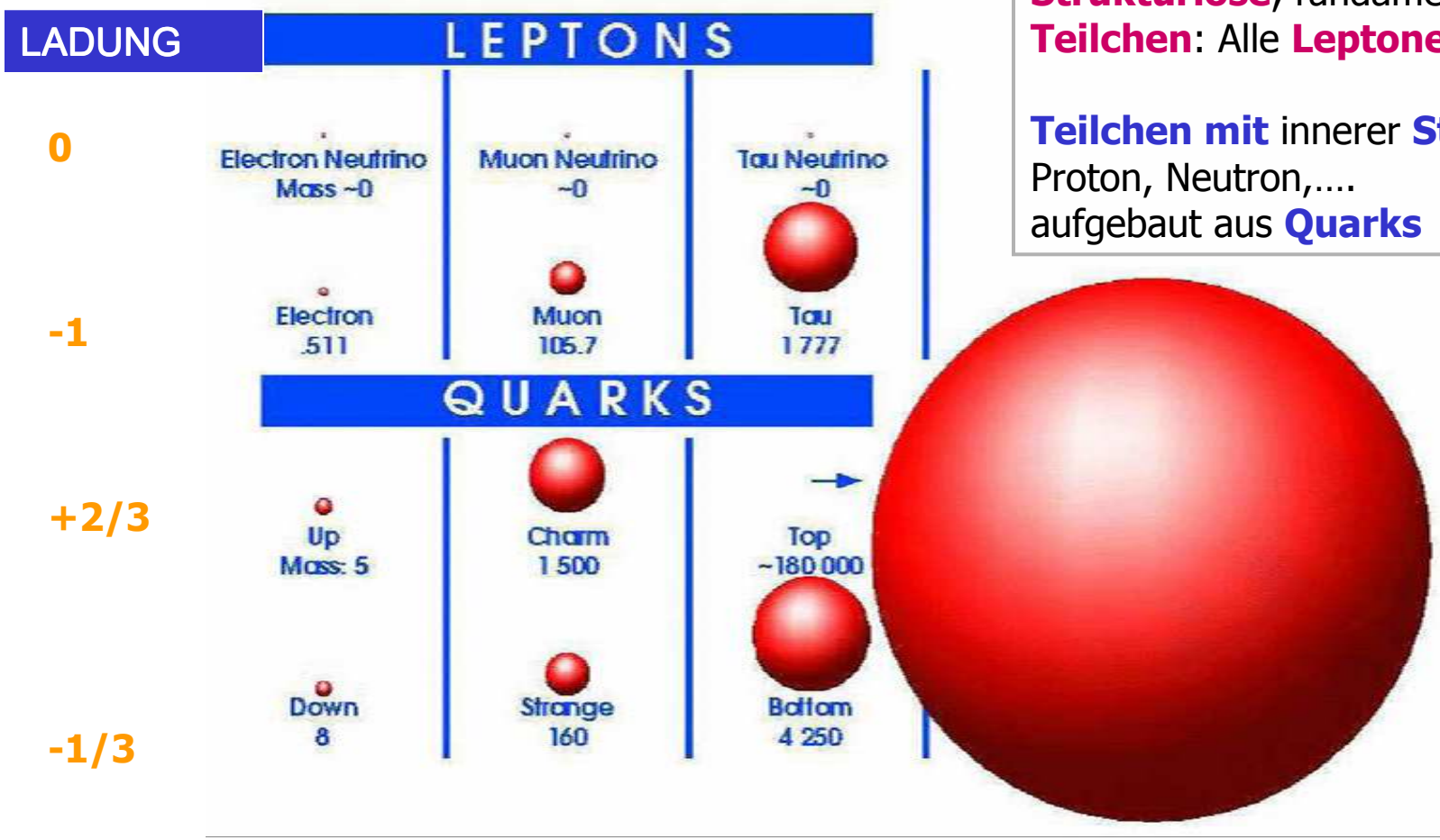
~ 0,01 m Kristall	10^{-9} m Molekül	10^{-10} m Atom	10^{-14} m Atomkern	10^{-15} m Proton	$<10^{-18}$ m **Quark**, **Elektron**

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

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

Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

Stabile Materie: up- und down-Quark, Elektronen



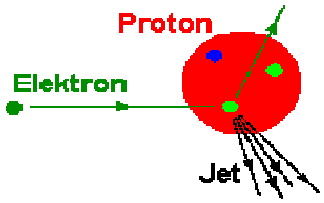
Strukturlose, fundamentale **Teilchen**: Alle **Leptonen**

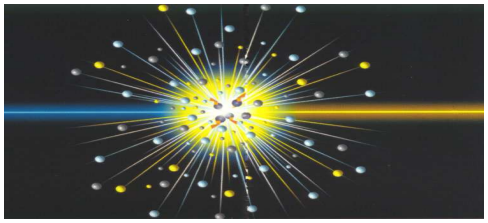
Teilchen mit innerer **Struktur**: Proton, Neutron,….
aufgebaut aus **Quarks**

Experimente mit Teilchenstrahlen

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

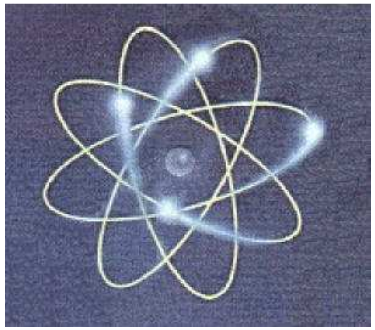
- **die Fähigkeit,**
  kleine Strukturen Δx zu erkennen
  $\Delta x \, \Delta p = \hbar$ (**Heisenberg**)
- **die Fähigkeit,**
  neue schwere Teilchen zu erzeugen
  $E = mc^2$ (**Einstein**)

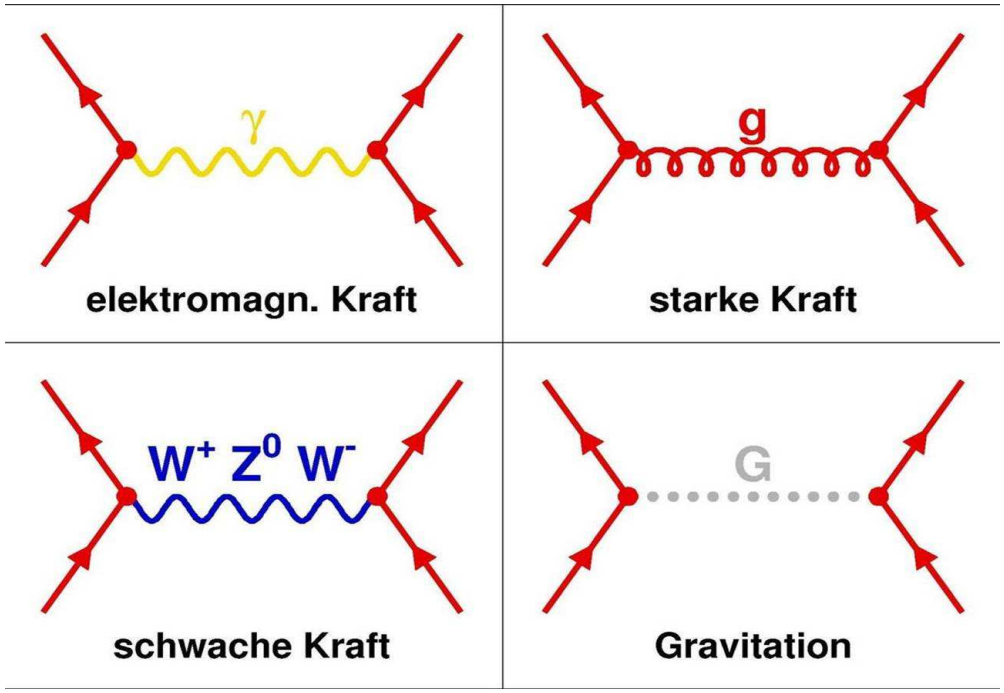


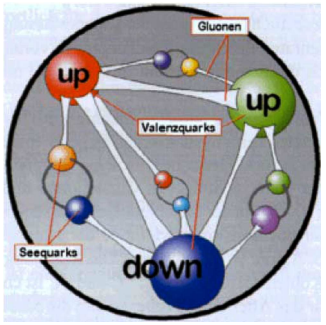


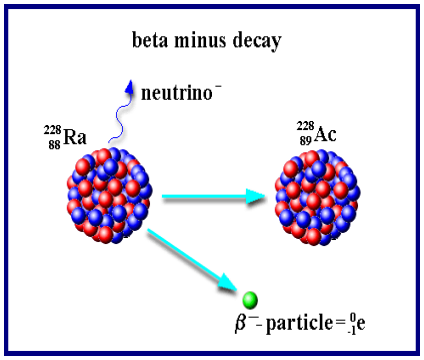
- **Streuexperimente:**
  - **Kollision von Teilchenstrahlen mit Materie**
  - **Kollision von zwei Teilchenstrahlen**

Teilchen als Kraftvermittler







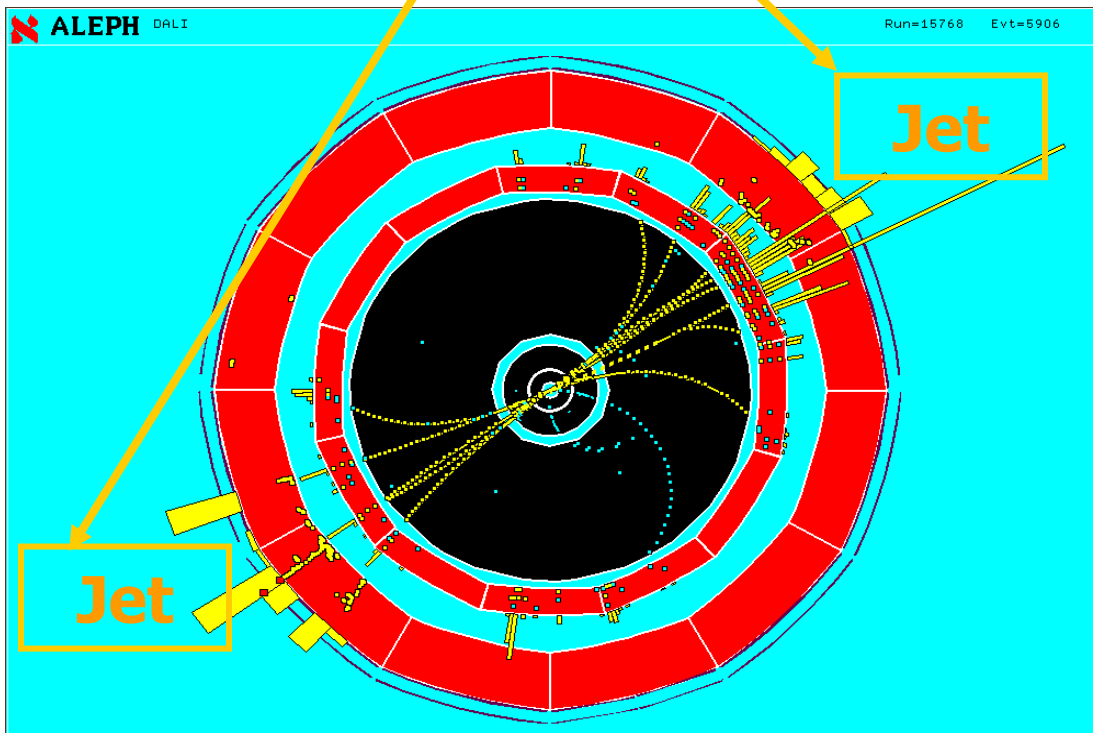


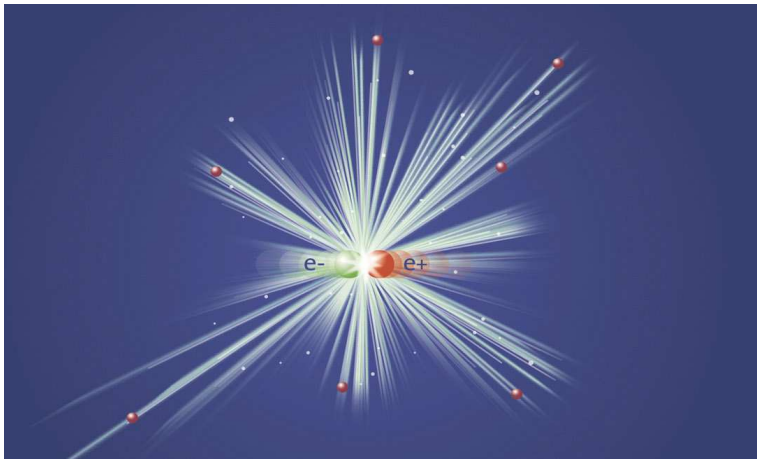
Austauschteilchen sind die Quanten der Kraftfelder

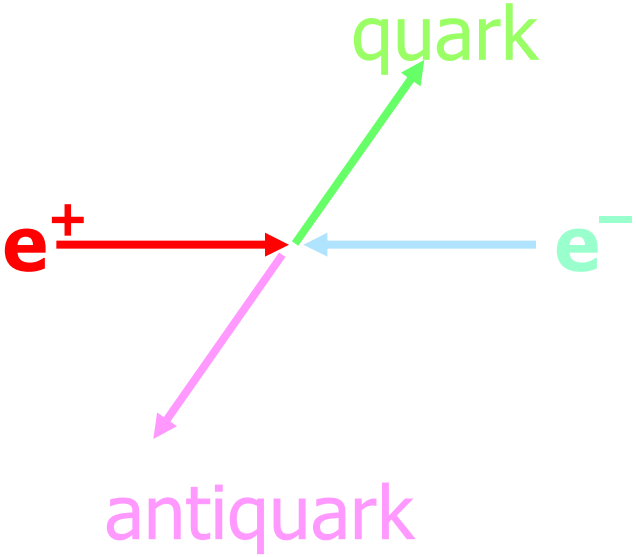
Erzeugung von Quarks und Antiquarks aus Energie

man sieht Bündel neuer Teilchen

Warum sieht man keine einzelen Quarks?

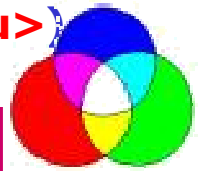






Die starke Kraft: „Quantenchromodynamik“

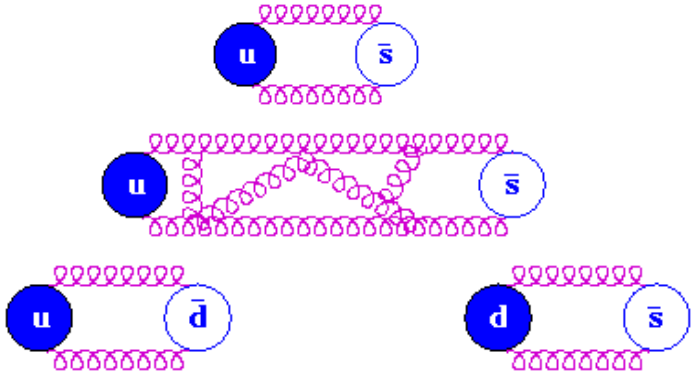
Quarks erscheinen nur im Verband (Bsp Proton = |uud> , Neutron = |ddu>)
Quarks erscheinen frei beweglich im Verband

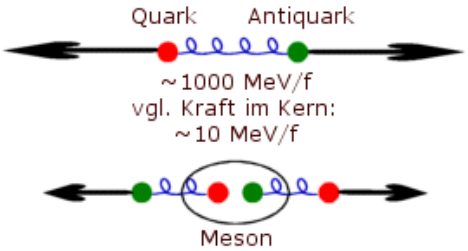


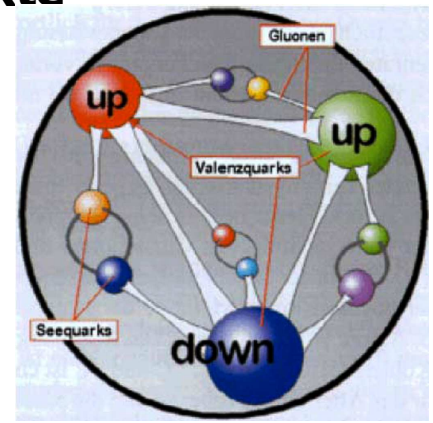
Grund:
3 Ladungen: **rot**, **grün**, **blau**

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**







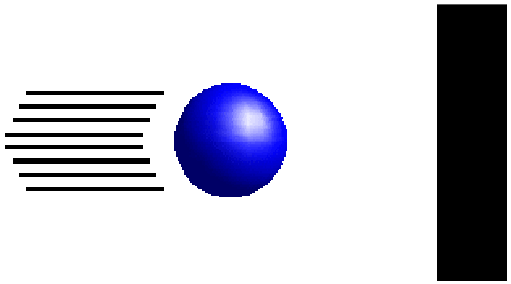
Nützliche Einheiten für Teilchen

- **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.

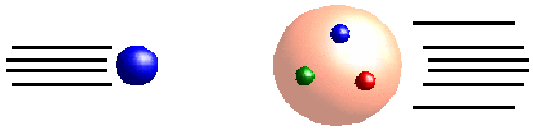


Collider – zwei kombinierte Beschleuniger:
Zwei Teilchenstrahlen werden beschleunigt und zur Kollision gebracht:
Größere Enerergien werden erreicht

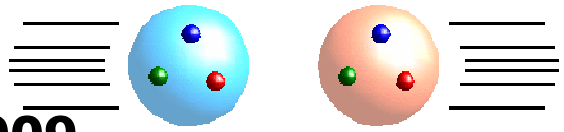
Arten von Collidern

- 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)**



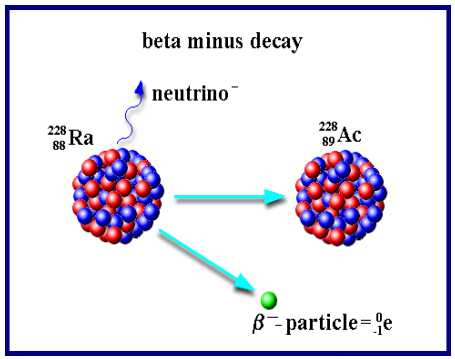
- Hadron-Hadron-**Collider:** Enteckungsmaschienen
  - TEVATRON, FERMILAB **in Chicago, bis 2009 (900 GeV pro Strahl)**
  - LHC, CERN **in Genf (Proton-Proton) seit 2009 (7000 GeV pro Strahl)**

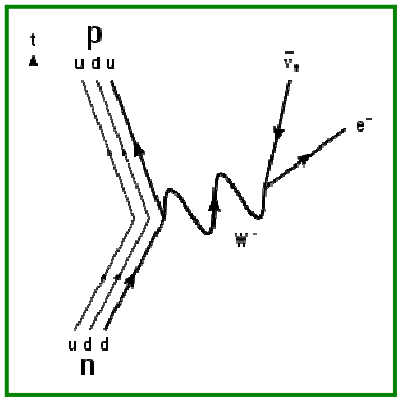


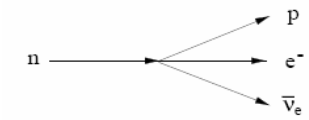
Die Schwache Wechselwirkung

1. Zerfall eines freien Neutrons/ β-Zerfall:

Schwache Wechselwirkung!

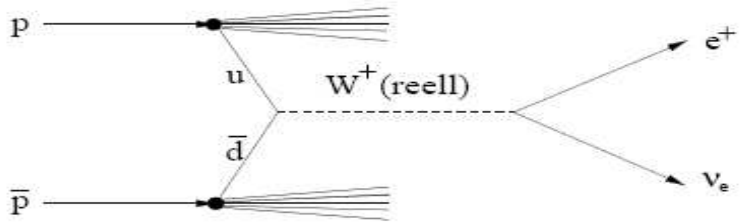






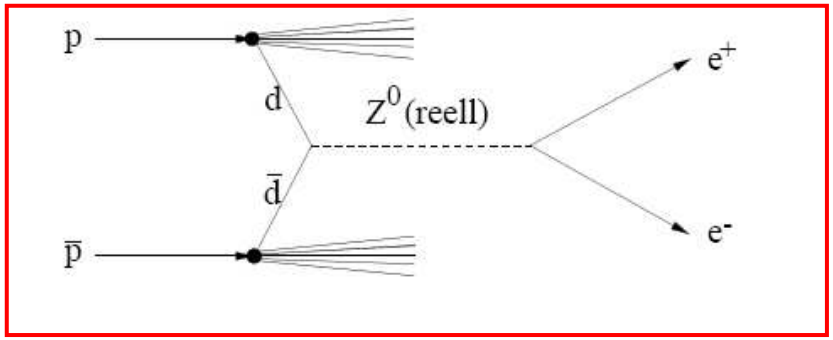
Quark-Umwandlungsprozess!

2. Nähere Untersuchung an Beschleunigern

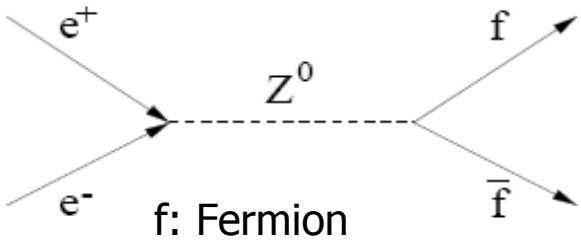


Entdeckung des Austauschteilchens!

Beobachtung von "Neutralen" Strömen:



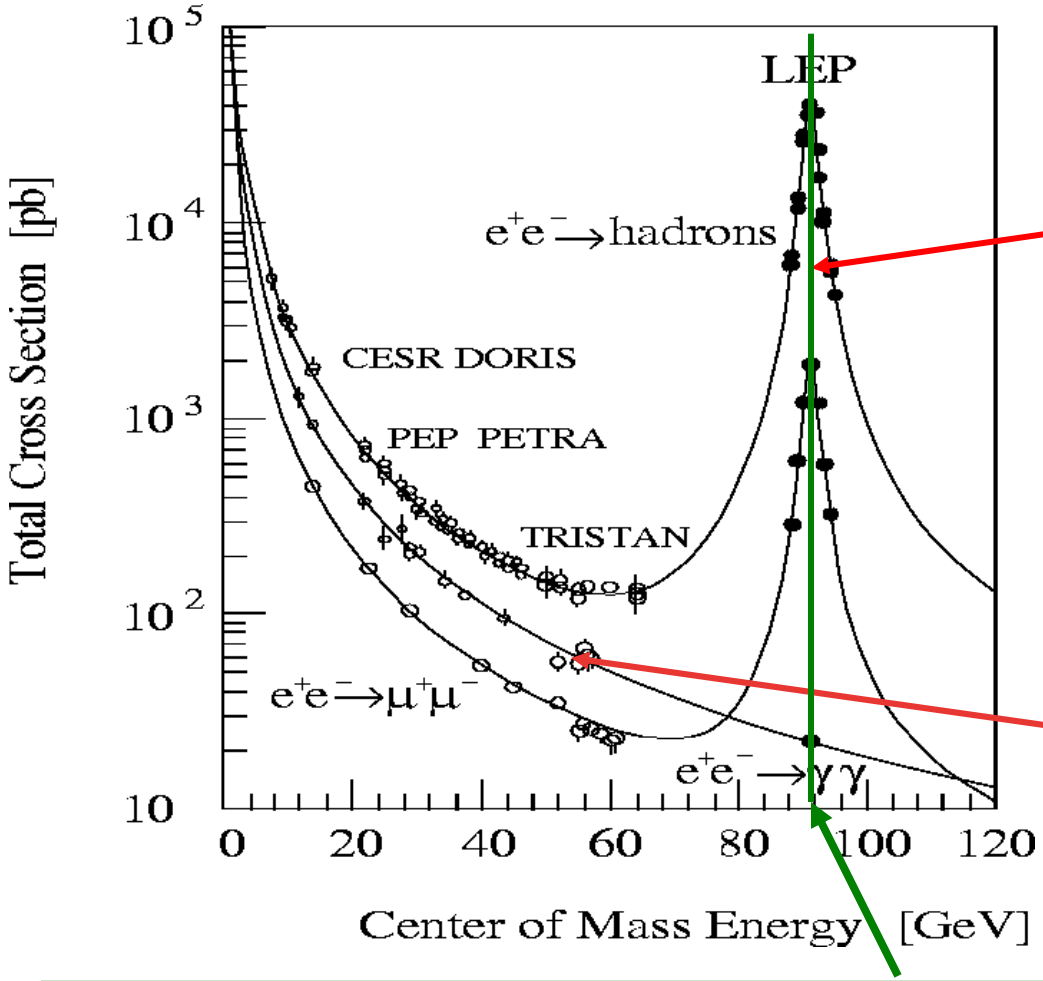
3. Genaue Untersuchung der neutralen Ströme

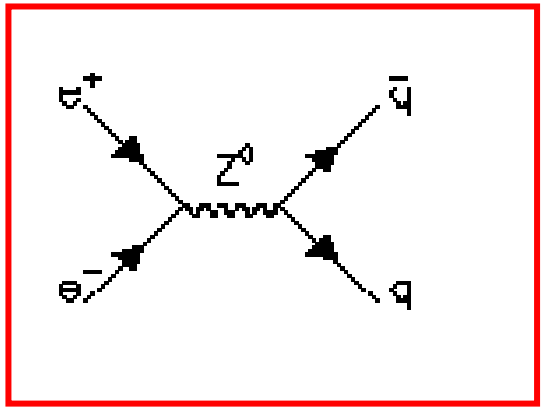


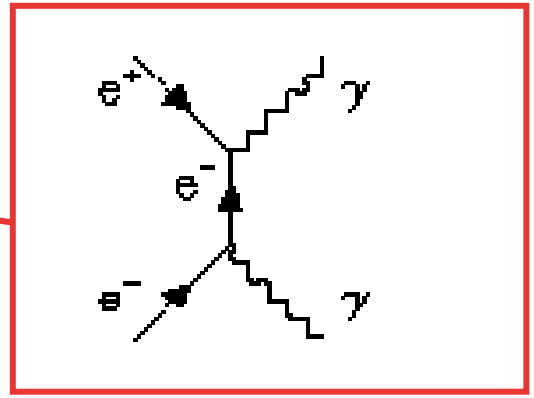
Das Z-Boson

- **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:** $\upsilon\overline{\upsilon}$
  - **unbekannte Teilchen?**

Erzeugung von Z-Bosonen am Beschleuniger

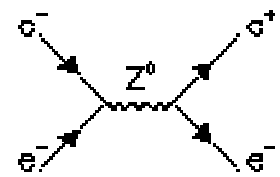


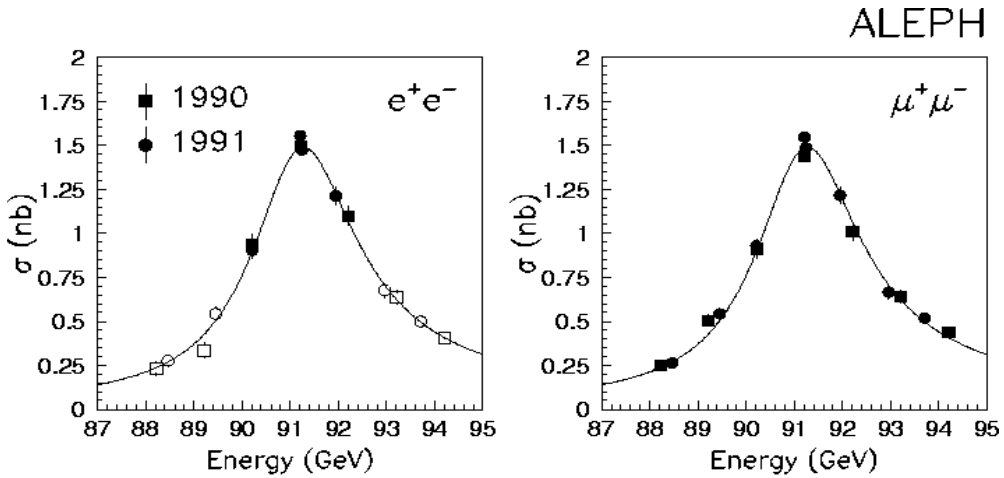


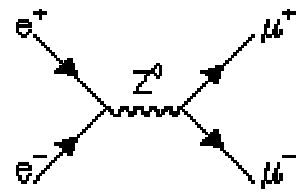


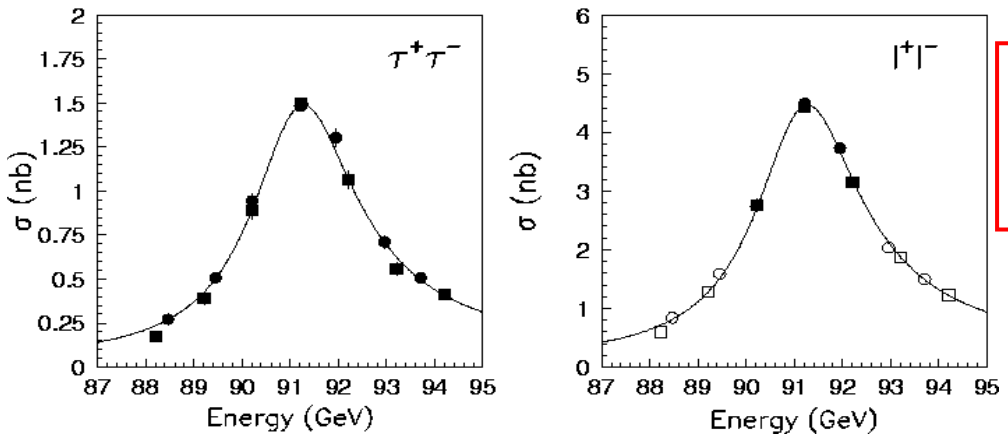
Z^0-Boson: grosse Masse, **resonatne Erzeugung**, wenn die **Energie gleich der Masse** ist

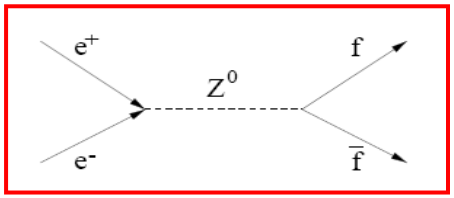
Zerfallskanäle des Z-Bosons











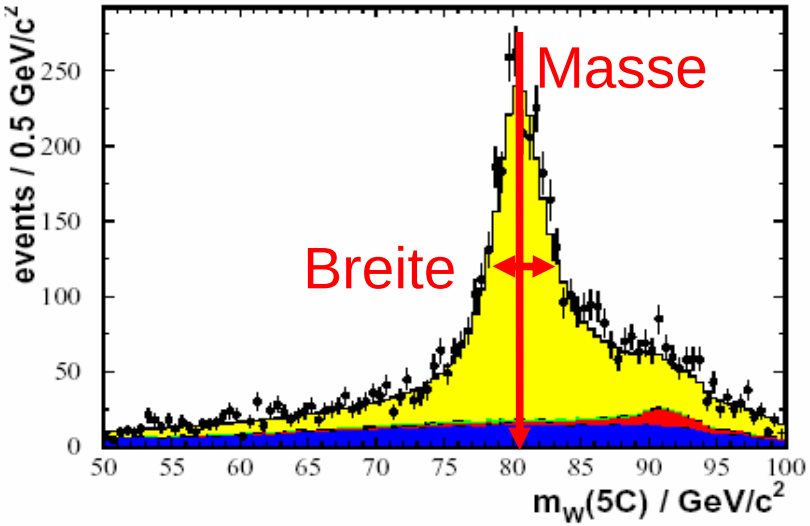
f: Fermion

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

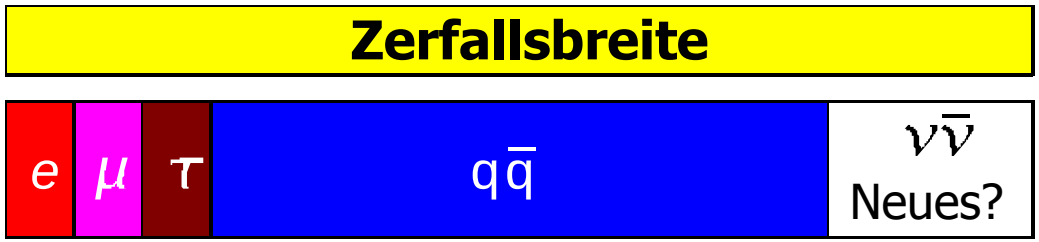
Die Zerfallsbreite

- 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
- Z-Boson:
  - **Zerfallsbreite 2.5 GeV**
  - **Lebensdauer 10^{-25} s**

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



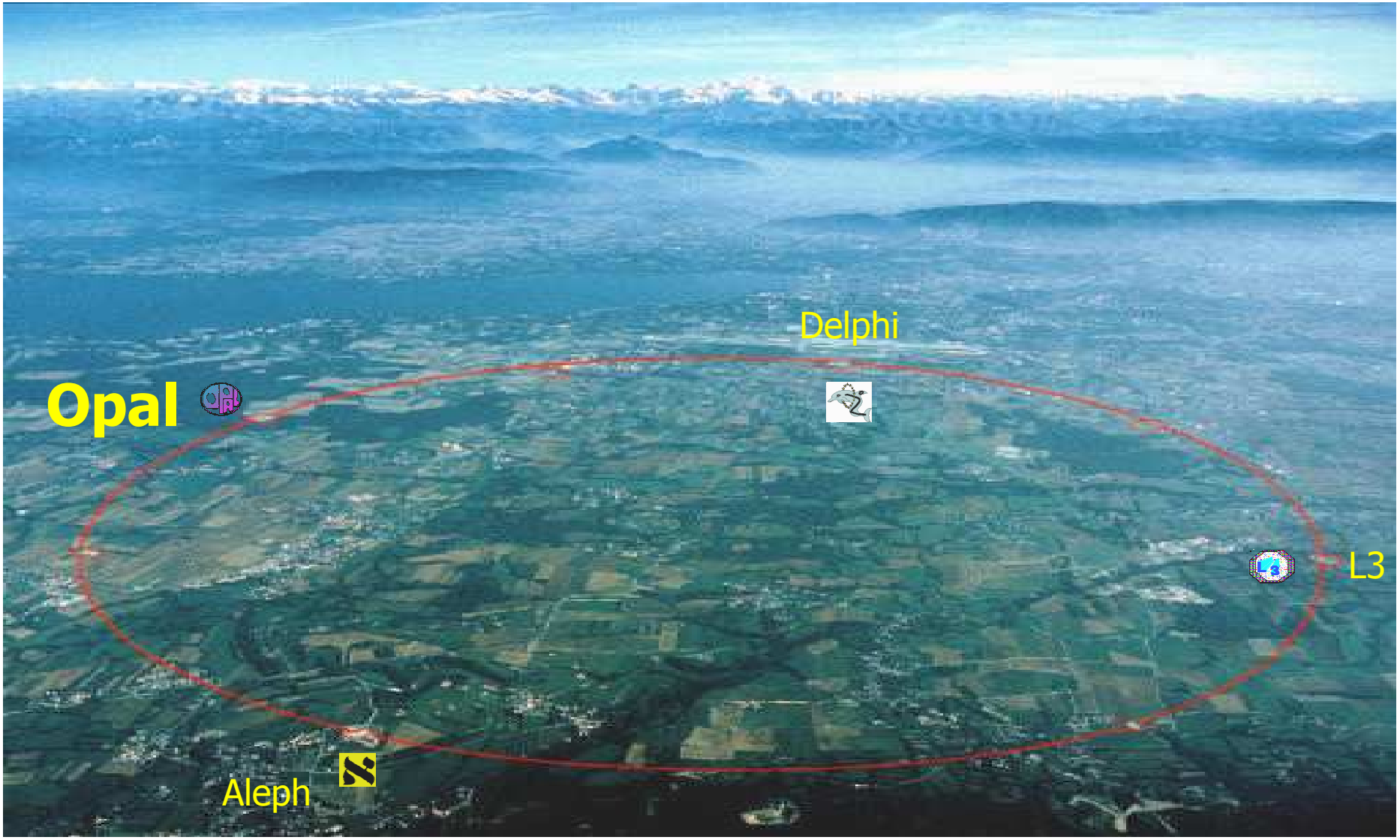
Die Zerfallsarten: Verzweigungsverhältnise



- **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**

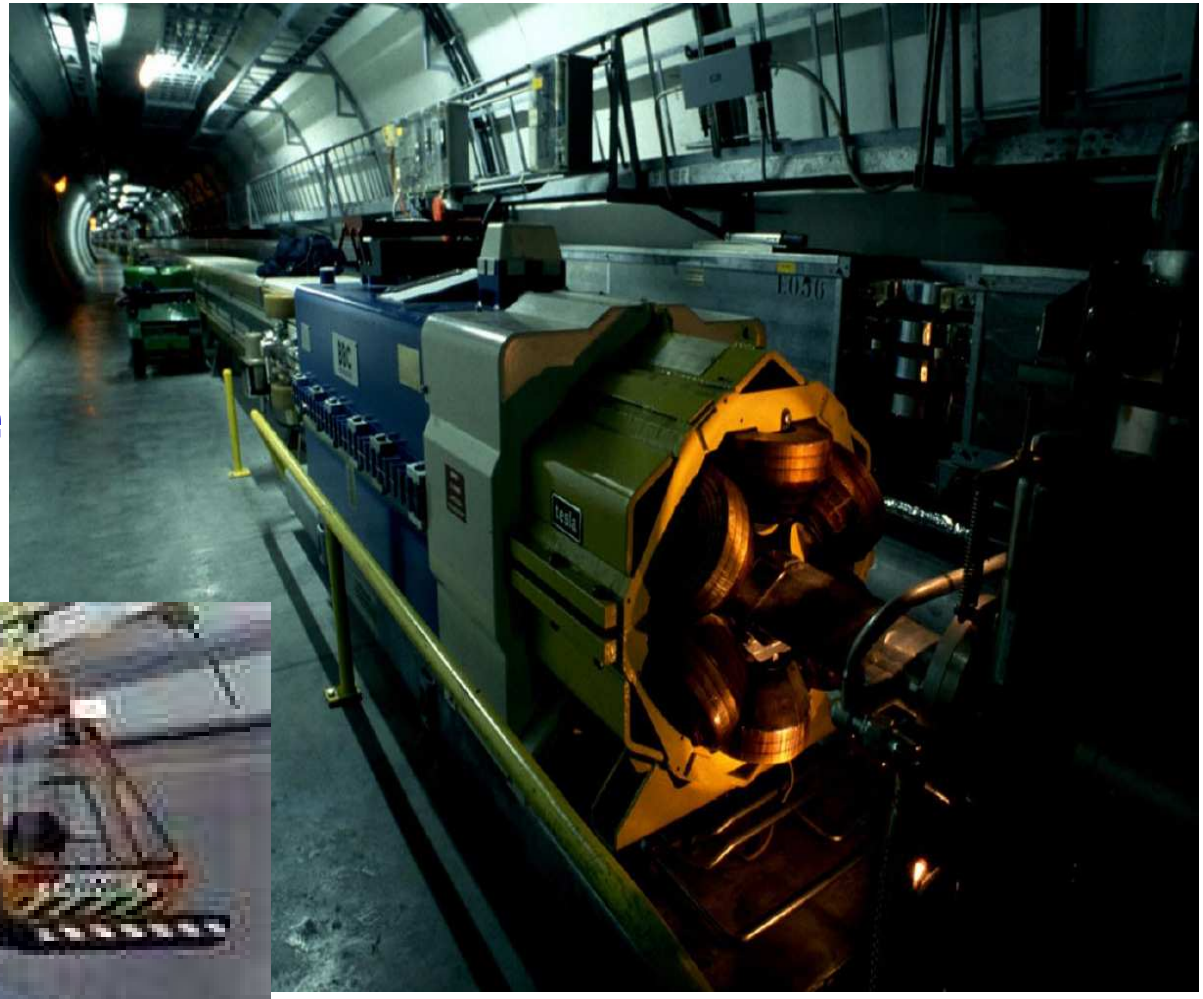
LEP: Der Large Electron Positron Collider



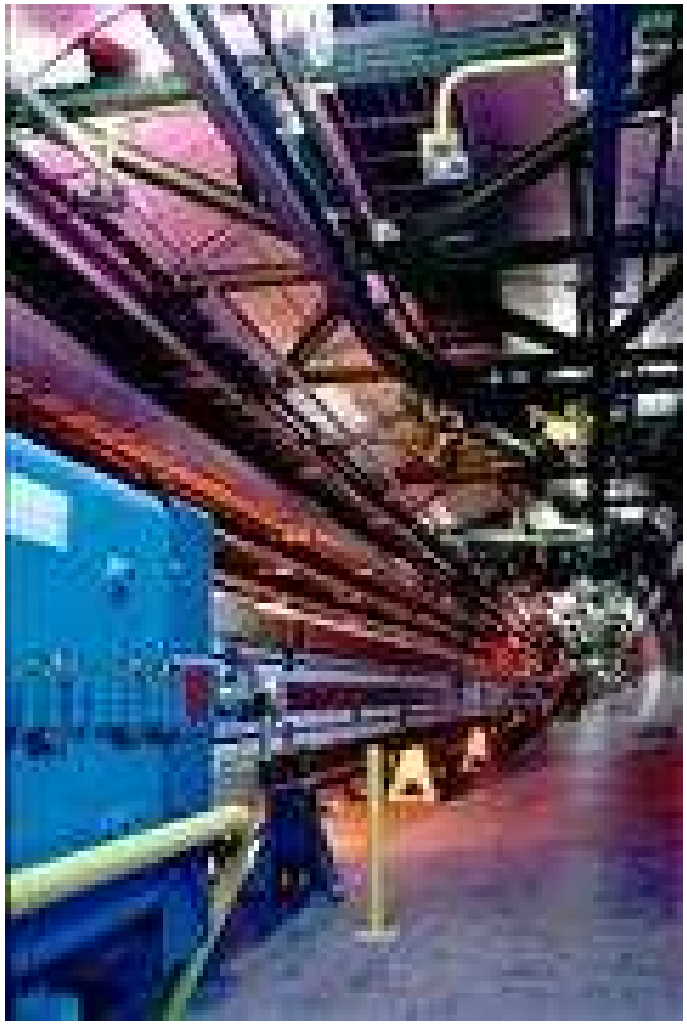
Blick in den LEP-Tunnel

LEP-Tunnel:
Umfang von 27 km

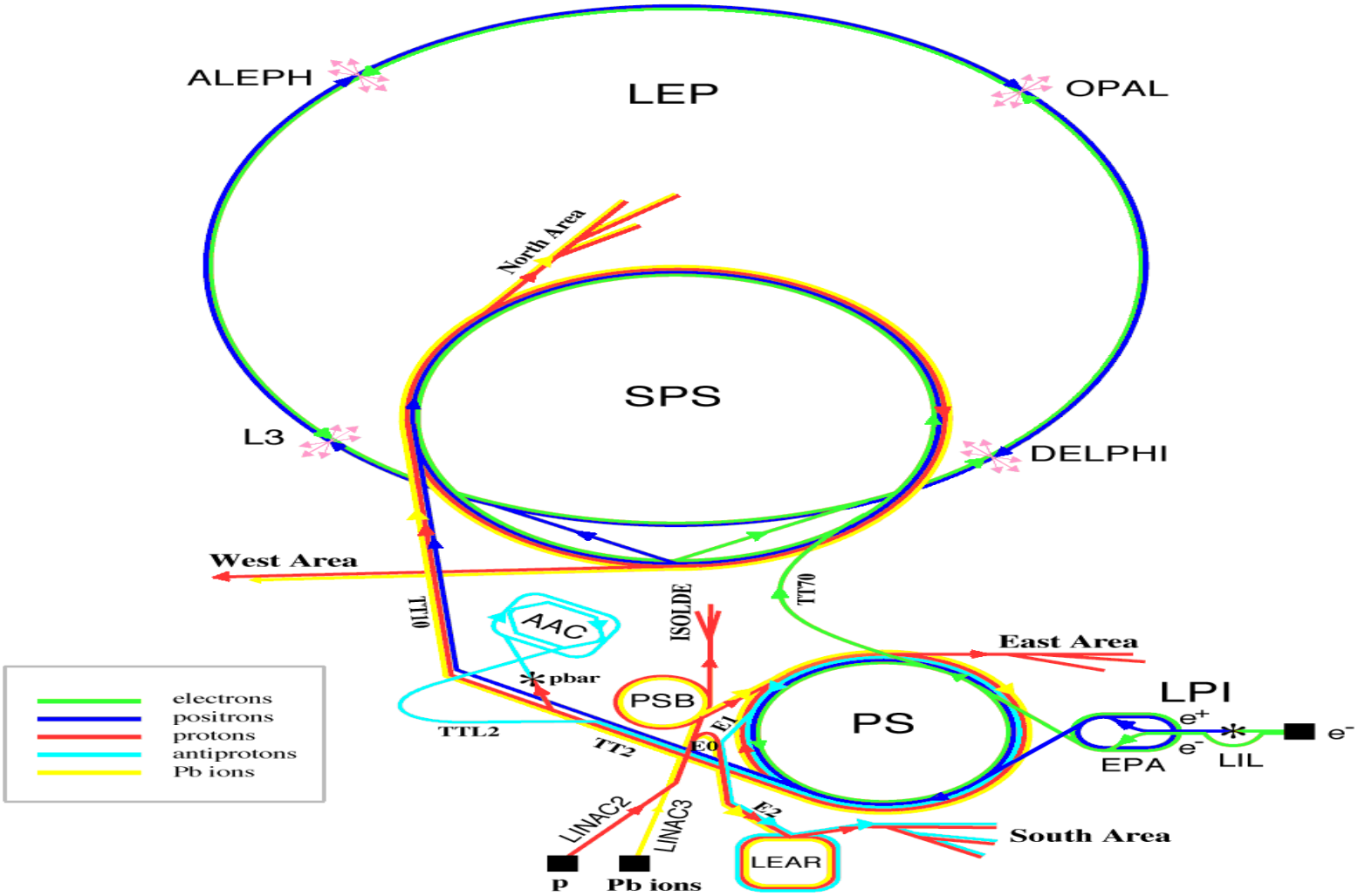
Wenige Zugänge:
lange Transportwege



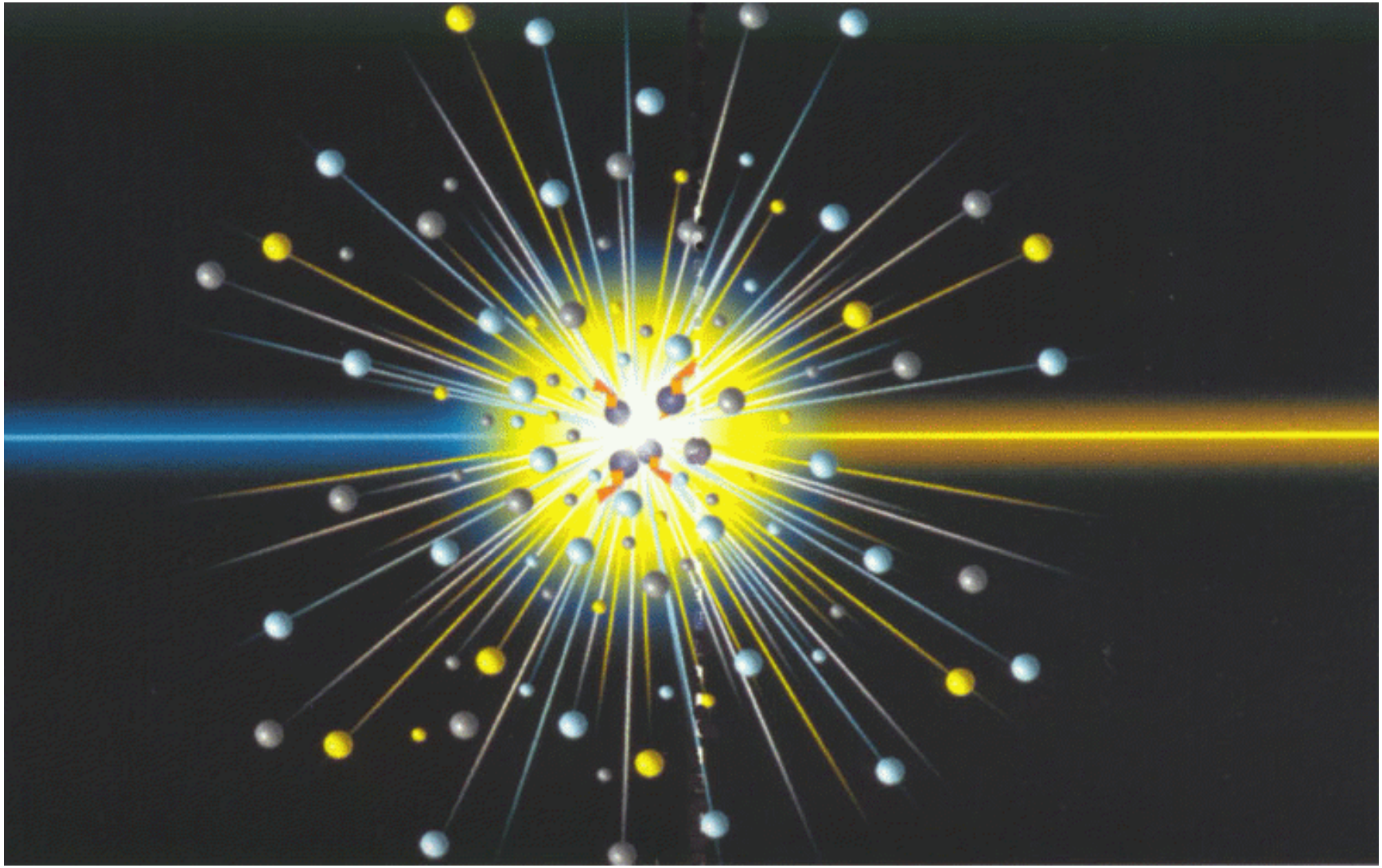
LEP: Magnete und Beschleuniger



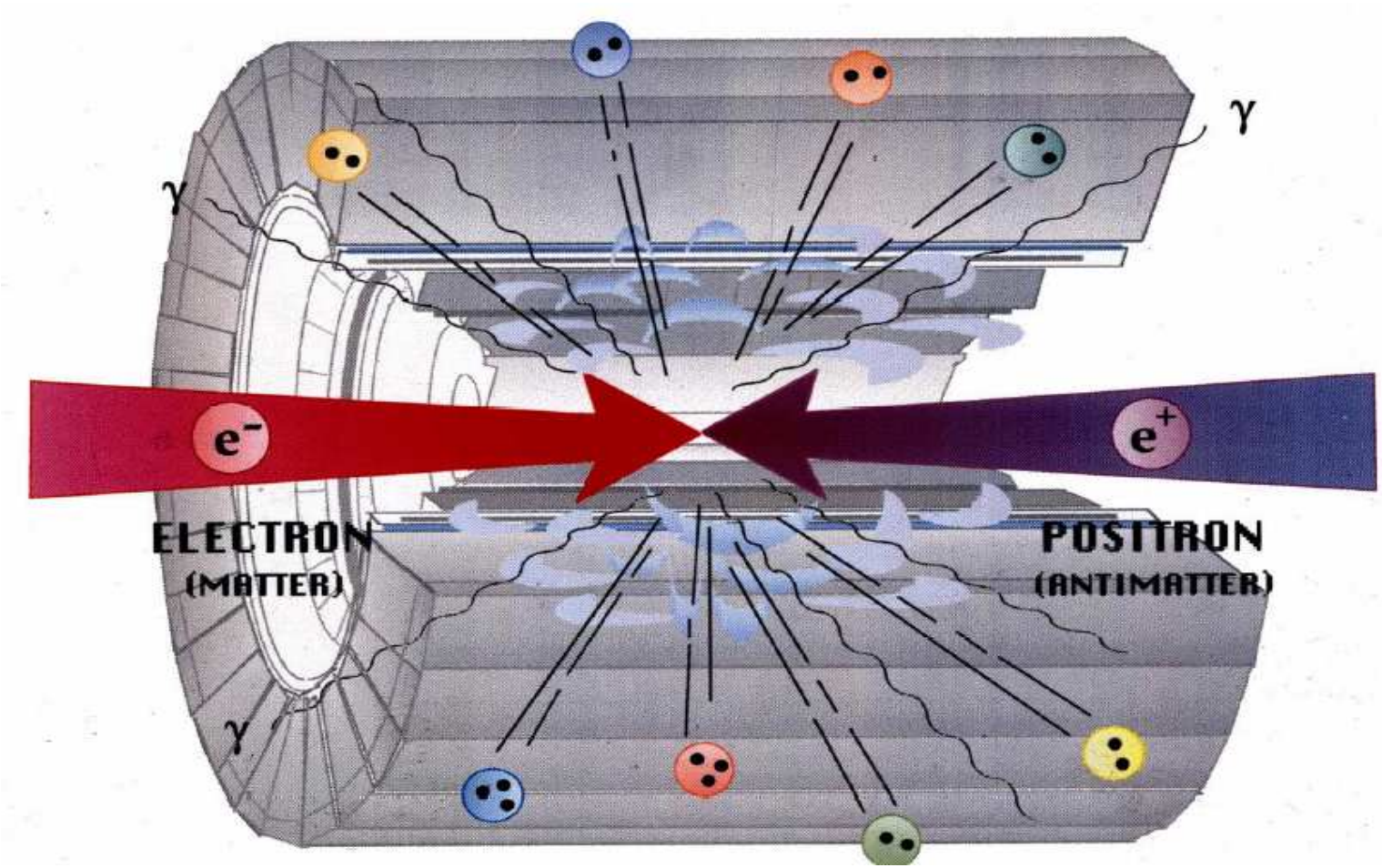
Beschleuniger-Systeme am CERN



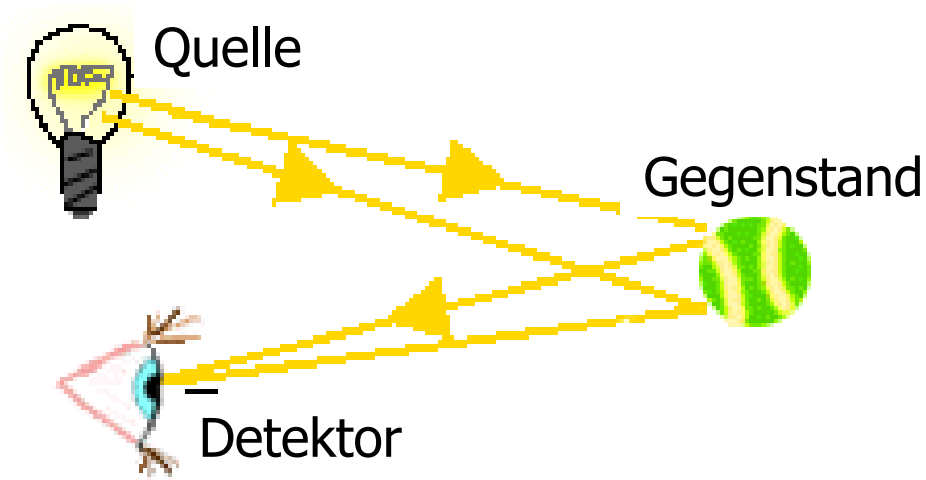
Neue Teilchen enstehen ...



... 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.**

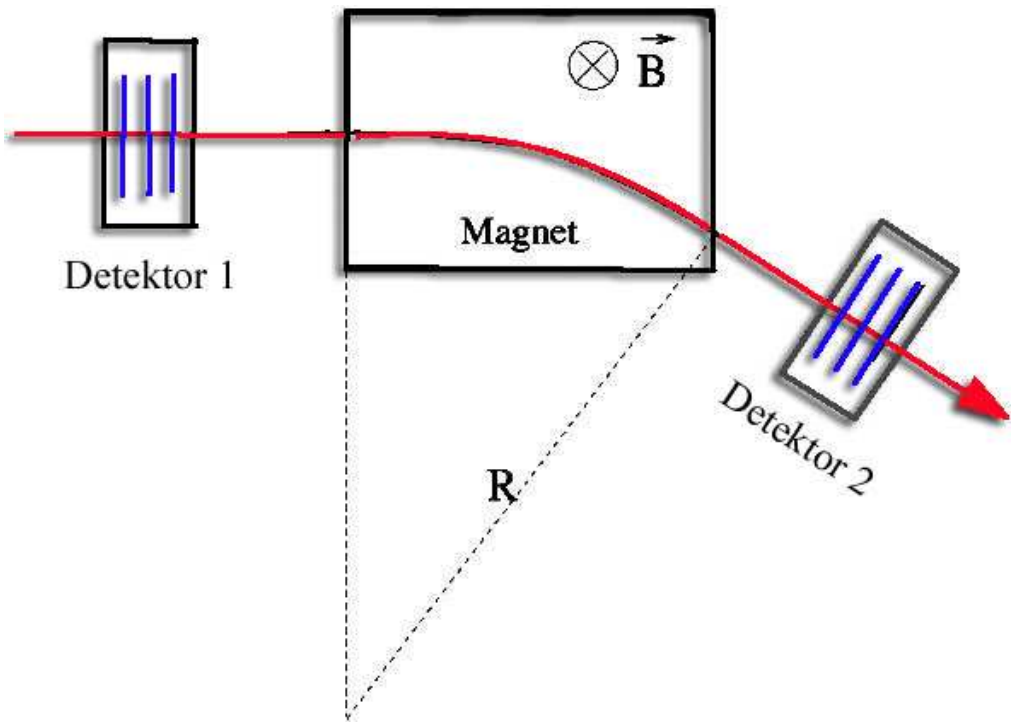
Voraussetzung für den Nachweis: Wechselwirkung der Teilchen mit Materie

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)

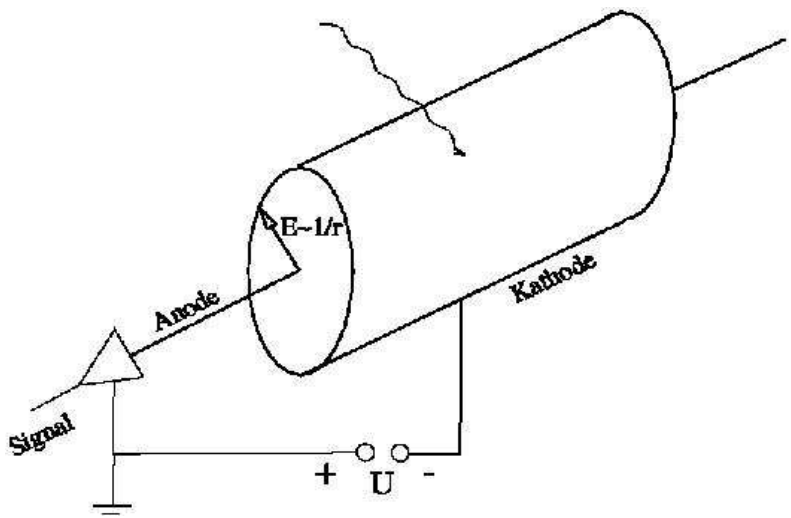
Impulsmessung: Prinzip

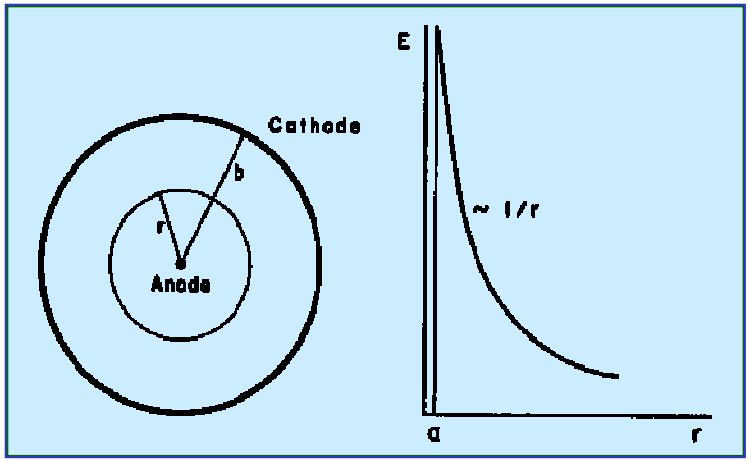
Impuls = Masse × Geschwindigkeit

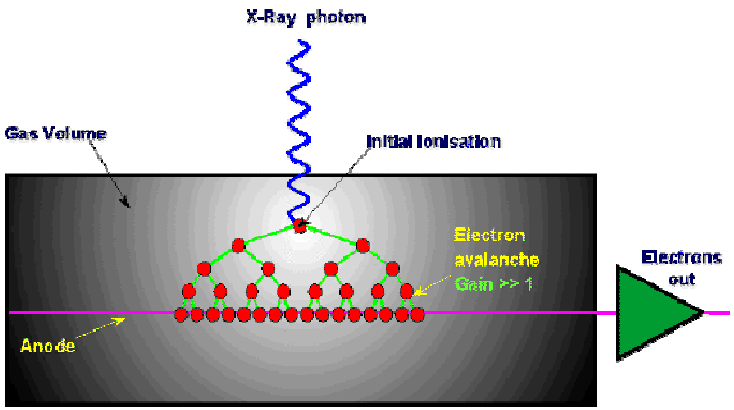


- Stärke der Krümmung → Impuls
- Richtung der Krümmung → Ladung
- Rückführung der Impulsmessung auf eine Ortsmessung
- Häufig ganze Detektoren im Magnetfeld

Ortsmessung: z.B. Geiger-Müller-Zähler

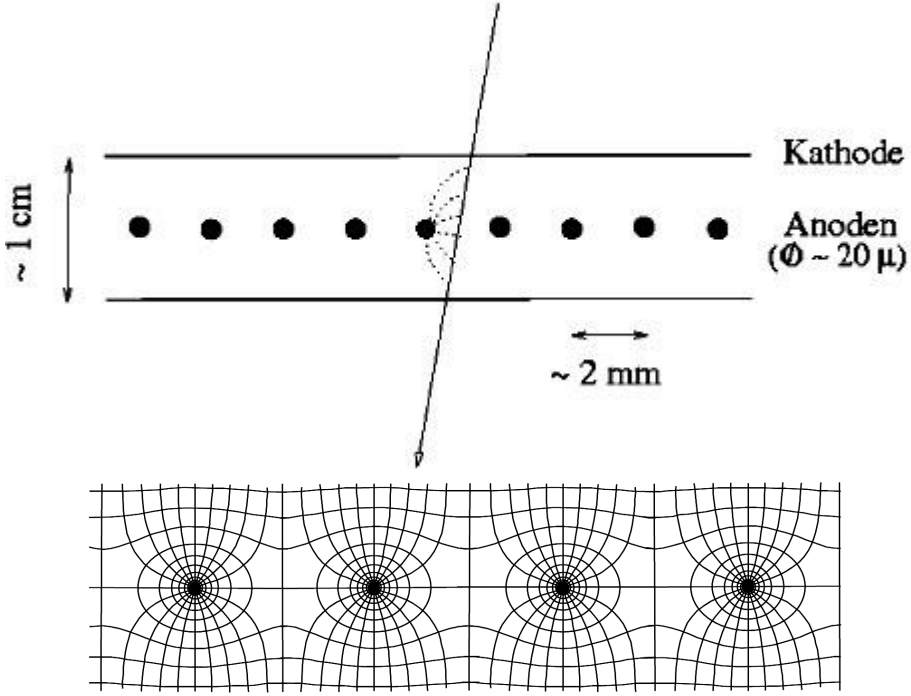






- Ionisationsladungen driften zum Anodendraht → elektrisches Signal durch Gasverstärkung
- Elektronische Auslese

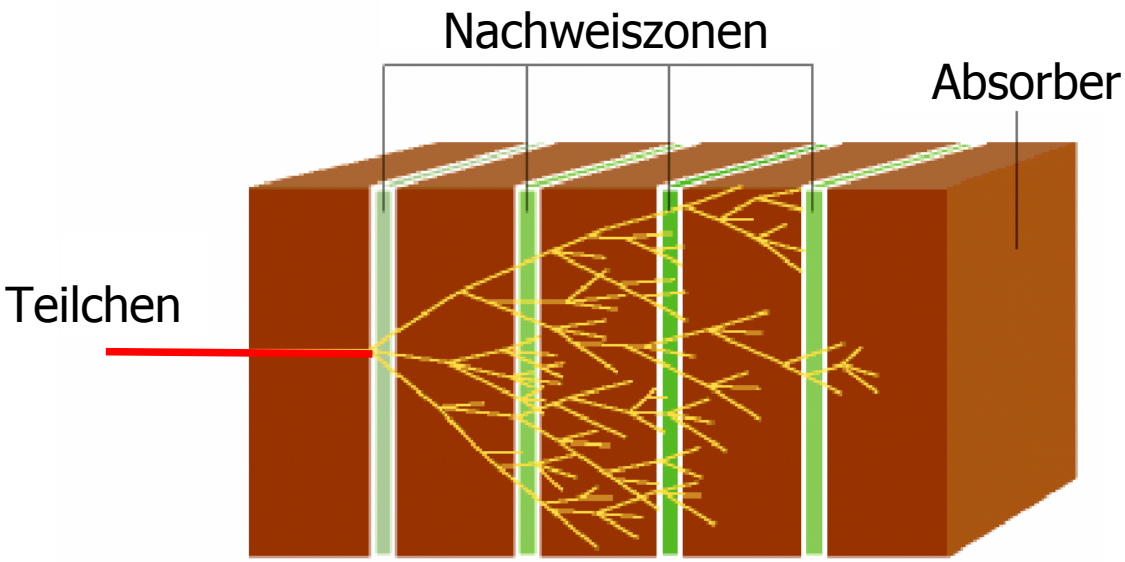
Ortsbestimmung: Spurkammern



- oft mehrlagig
- Messung von Flugrichtung und Zerfallsstrecke

Energiemessung: Prinzip

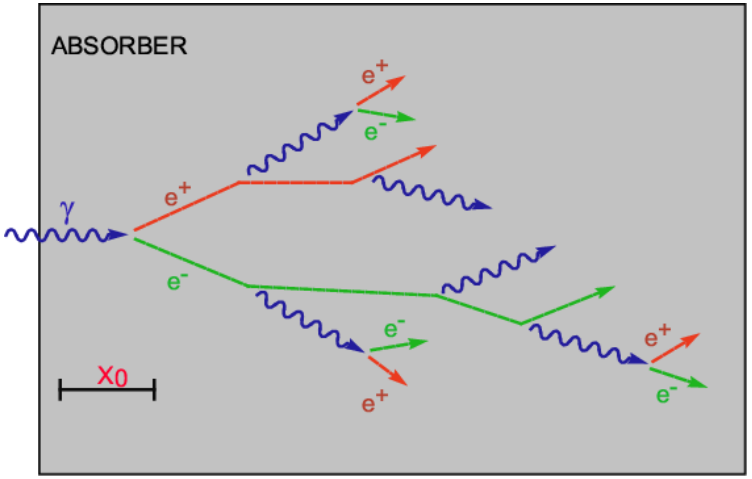
- Teilchen geben in Materie ihre Energie durch Produktion neuer Teilchen ab → Schauer
- Anzahl der Teilchen im Schauer ist proportional zur Energie
- Messung von Szintillationslicht in den Nachweiszonen

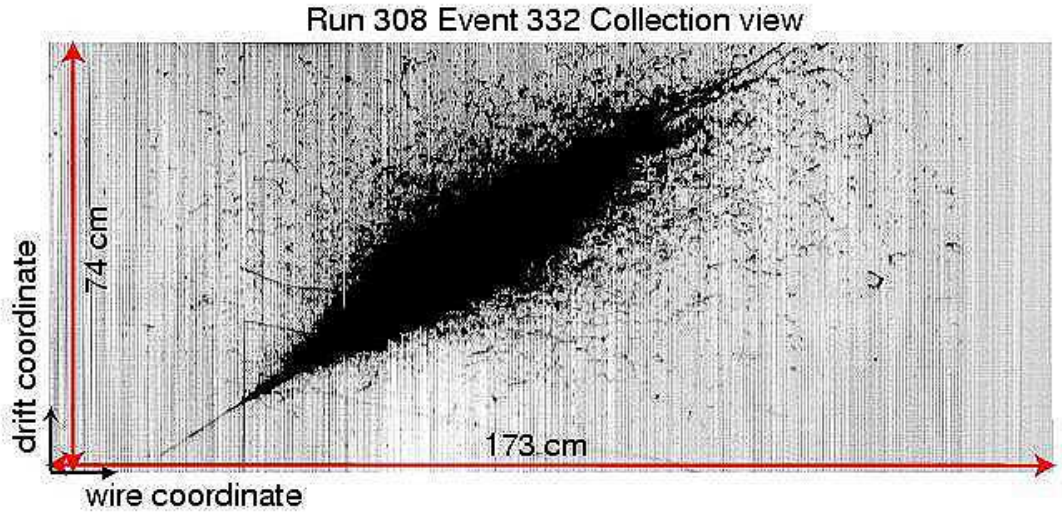


ursprüngliches Teilchen am Ende absorbiert

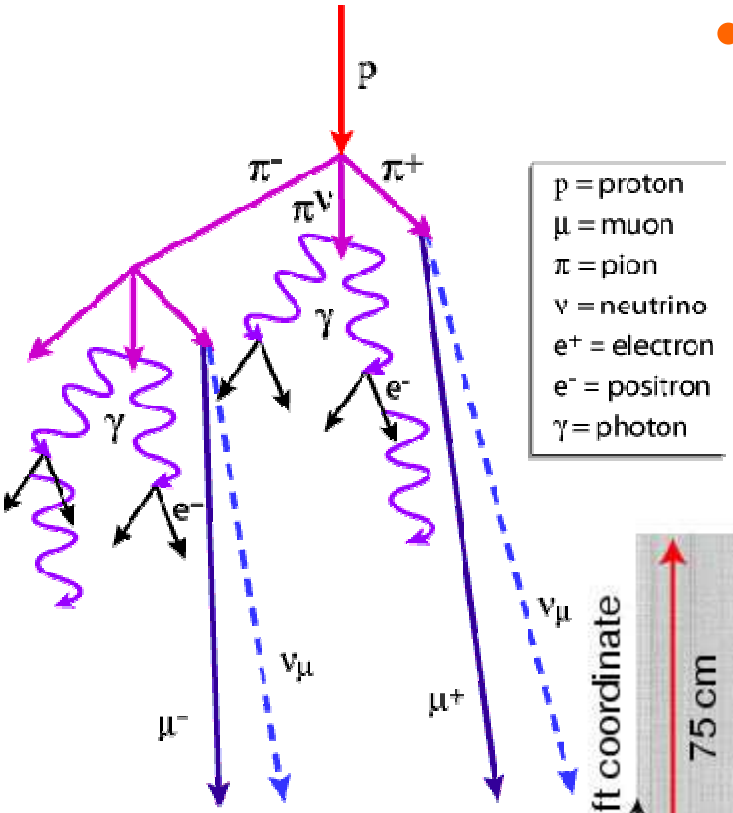
Messung der Energie: Kalorimeter

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

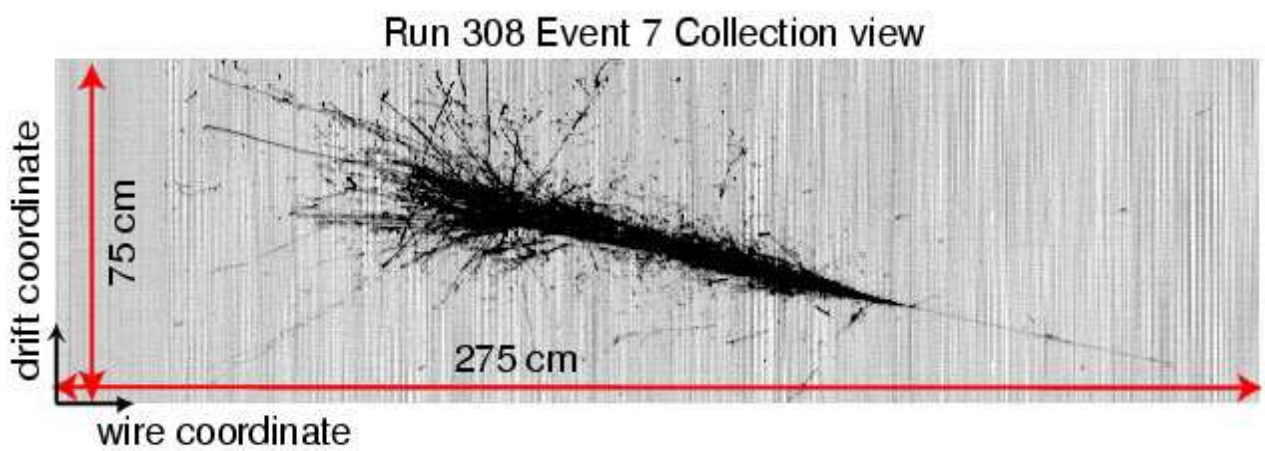




Messung der Energie: Kalorimeter



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



„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

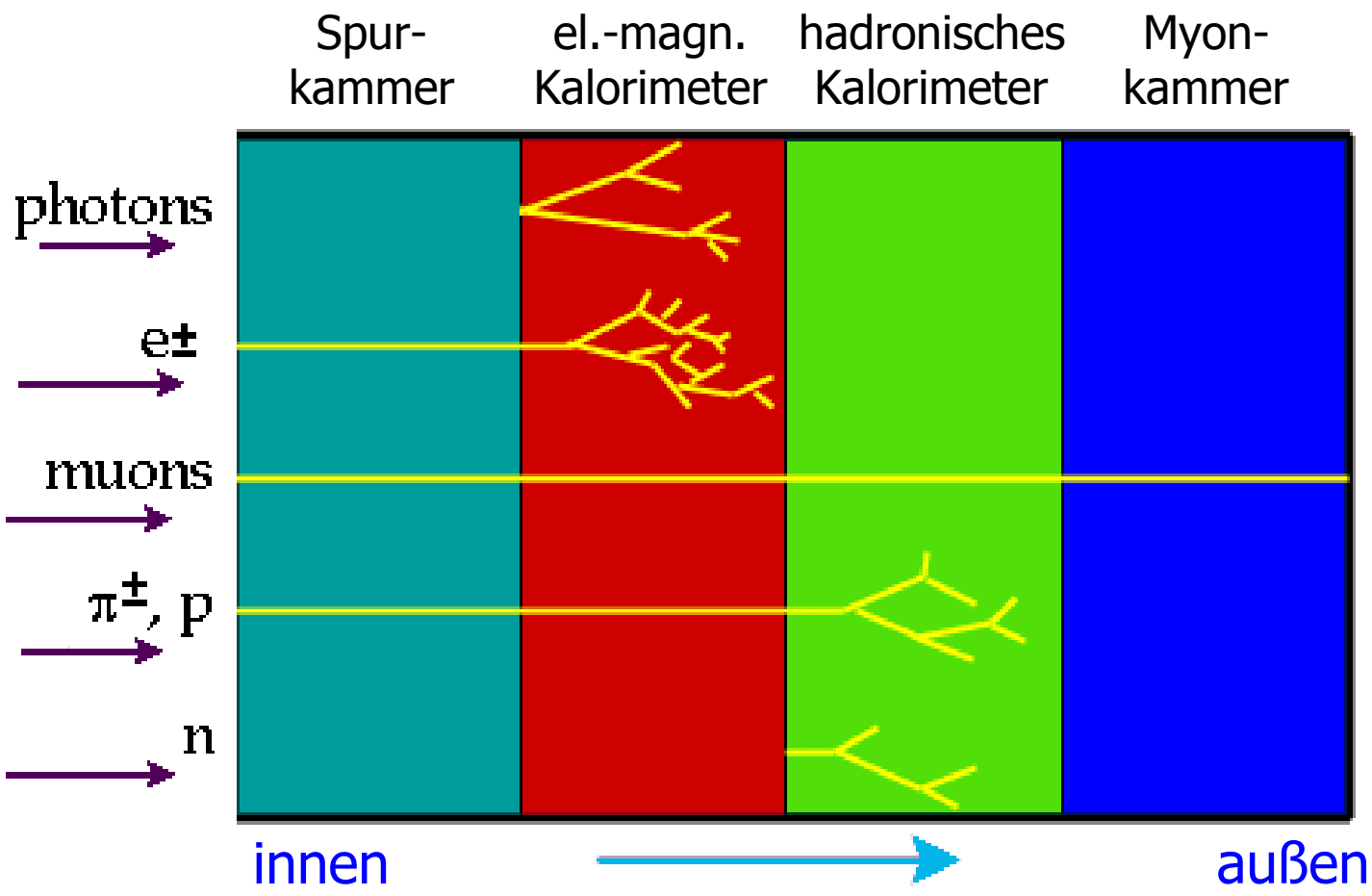
Tau-Zerfälle

- 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 Verzweigungsverhältnissen am Beispiel des τ^--Zerfalls.

Zerfallsmodus	Verzweigungsverhältnis	
$\pi^-\pi^0\nu_\tau$	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

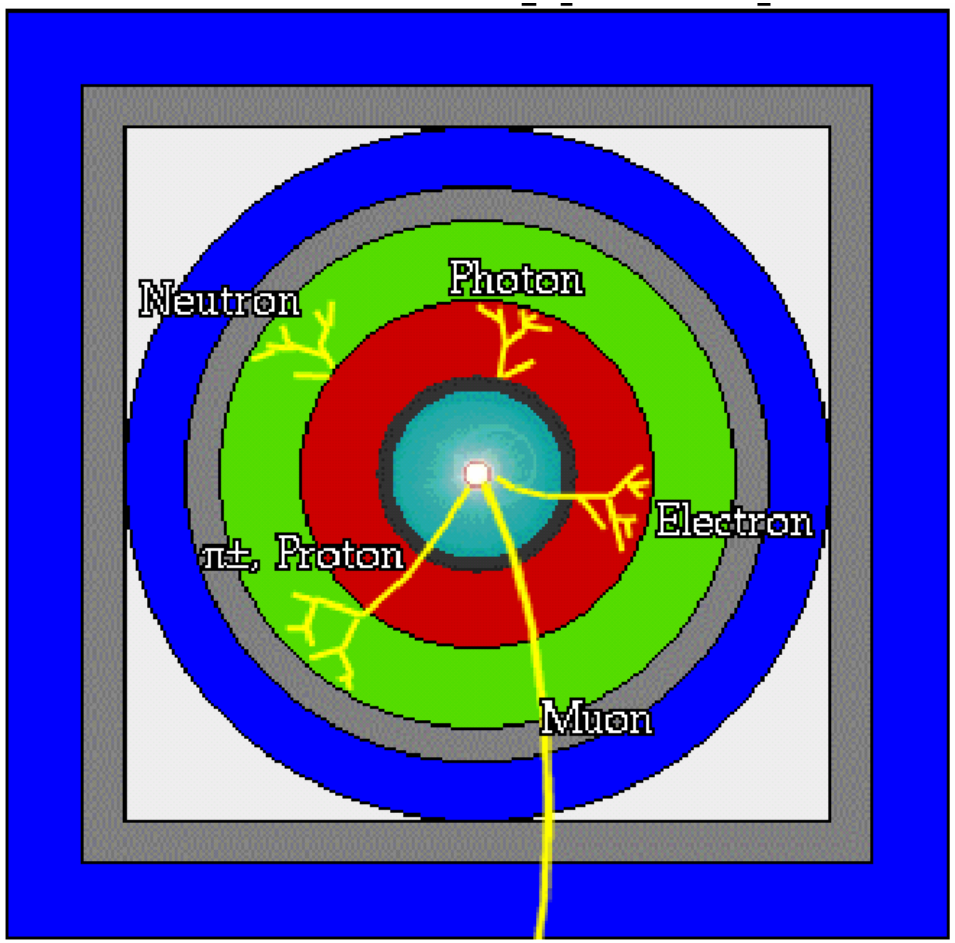
Unterscheidung der Teilchensorten



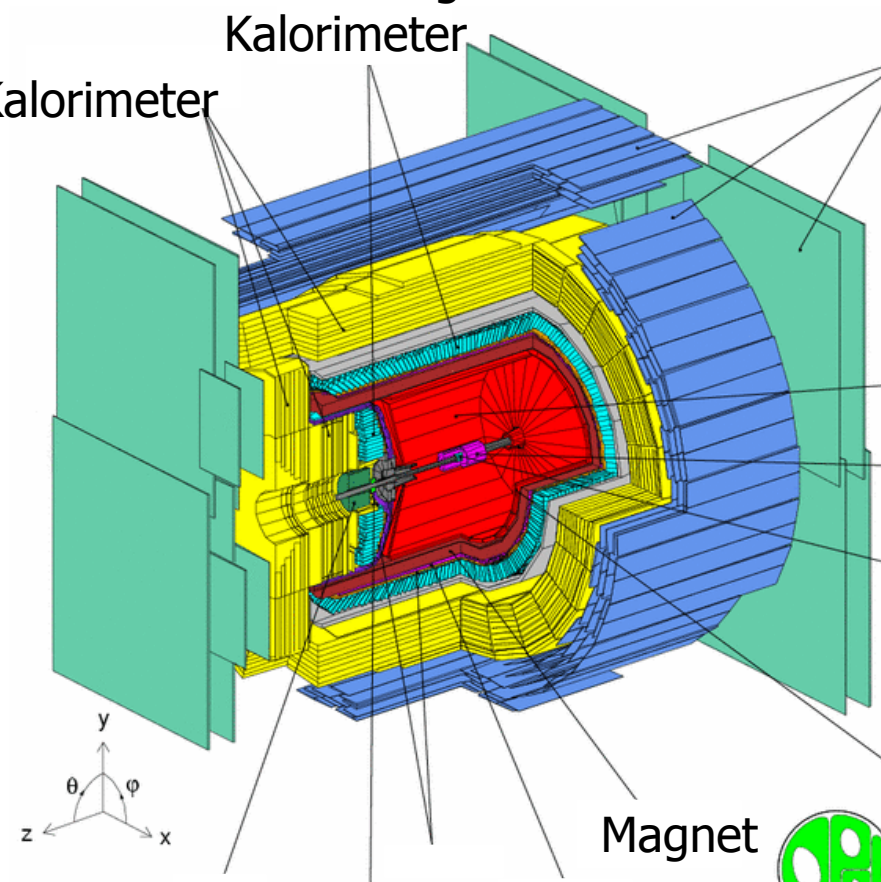
Schematischer Aufbau eines Detektors

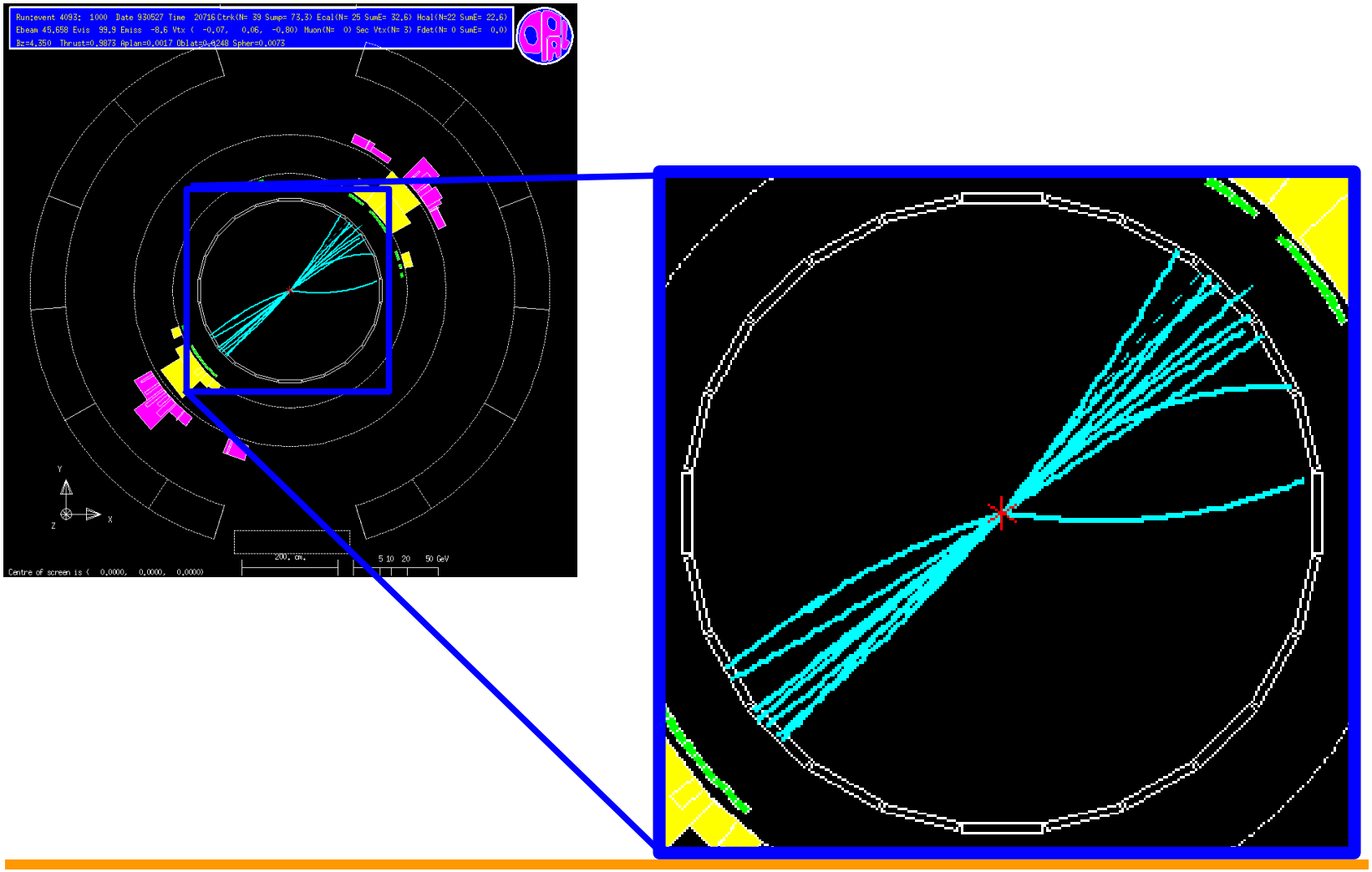
Zwiebelschalenartiger Aufbau aus verschiedenen Komponenten

- 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