



Teilchenphysik - Grundlegende Konzepte und aktuelle Experimente

Vorlesung SS04
Universität Augsburg

gehalten von

Dr. Richard Nisius

Max-Planck-Institut für Physik
Werner-Heisenberg-Institut
Föhringer Ring 6
80805 München

E-mail: nisius@mppmu.mpg.de

WWW: <http://www.mppmu.mpg.de/~nisius>



Der Gang der Dinge - oder die Themen dieser Vorlesung

1. **Einführung**
2. Beschleuniger
3. Detektoren
4. Bewegungsgleichungen und Symmetrien
5. Das Quark-Modell und die CKM-Matrix
6. CP-Verletzung im Standardmodell
7. Proton- und Photonstruktur
8. Elektroschwache Präzisionsmessungen
9. Das Higgs-Boson
10. Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen



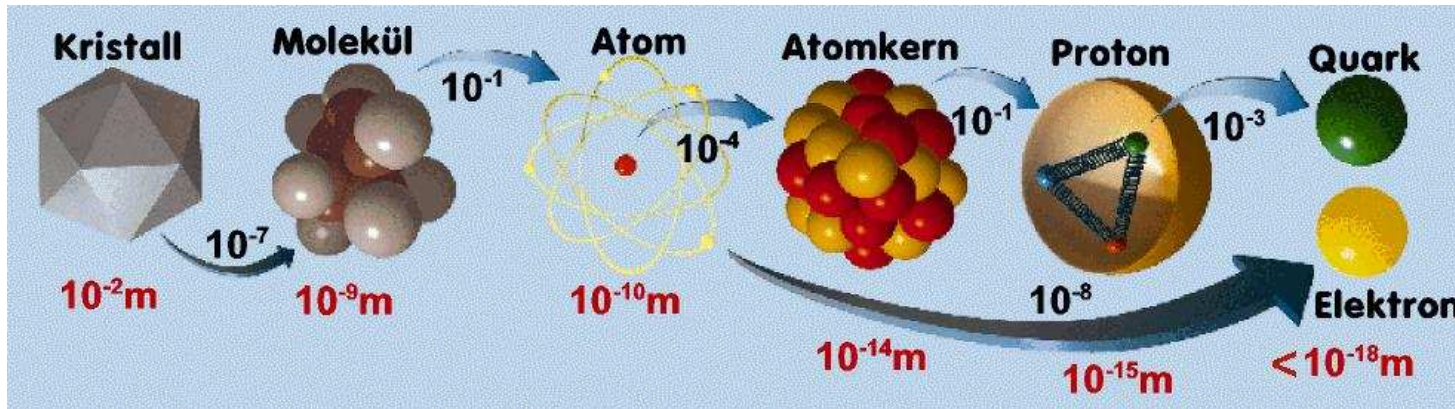
Unvollständige Literaturliste

V. Barger, J.N. Phillips	Collider Physics (Frontiers in Physics)
C. Berger	Elementarteilchenphysik (Springer)
F. Halzen, A.D. Martin	Quarks and Leptons (John Wiley & Sons)
E. Lohrmann	Hochenergiephysik (Teubner)
A. Messiah	Quantenmechanik I + II (De Gruyter)
C. Quigg	Gauge Theories of the Strong, Weak and Electromagnetic Interactions (Benjamin-Cummings)
D.H. Perkins	Introduction to High Energy Physics (Addison-Wesley)
P.J. Bryant, K. Johnsen	The Principles of Circular Accelerators and Storage Rings (Cambridge Univ. Press)
C. Grupen	Teilchendetektoren (BI Wiss. Verlag)

und viele andere mehr.



Dass ich erkenne, was die Welt, im Innersten zusammenhält



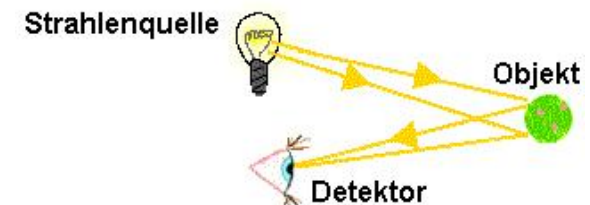
Die zwei Hauptfragen der Elementarteilchenphysik sind:

- 1) **Welches sind die kleinsten Bausteine der Natur, und was sind ihre Eigenschaften?**
- 2) **Was sind die fundamentalen Wechselwirkungen dieser Bausteine?**

Daraus ergibt sich die Frage:

- **Wie kann man kleinste Strukturen und ihre Wechselwirkungen sehen, d.h. in irgendeiner Form messen.**

Wir brauchen einen Ersatz für:





Vom Hausbeschleuniger zum Kreisbeschleuniger



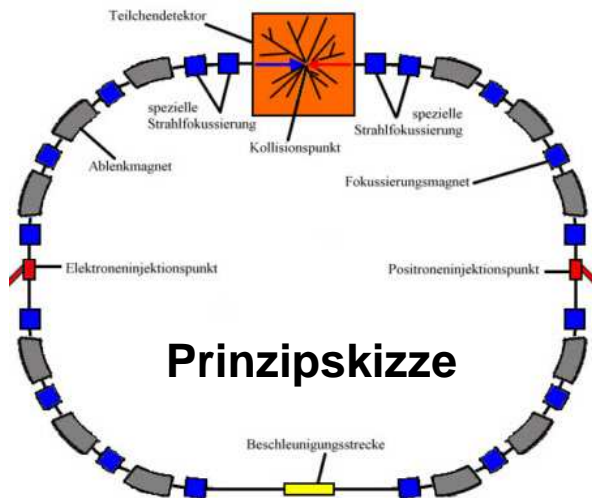
Funktionsprinzip

Energiezufuhr durch elektrisches Feld und Ablenkung durch Magnetfeld $\vec{F} = Q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$

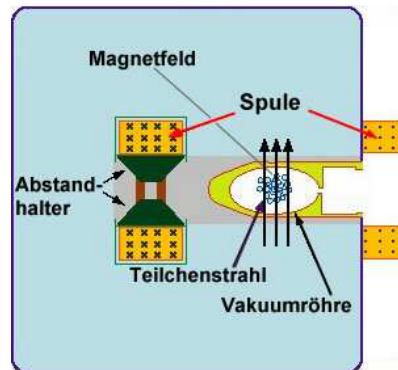
Leistungsmerkmale

Beschleunigtes Objekt:	Elektron
Spannung:	20 kV
Auflösungsvermögen:	10 000 fm

Im Prinzip nicht schlecht, aber ein bißchen mehr sollte es schon sein!



Ablenkung

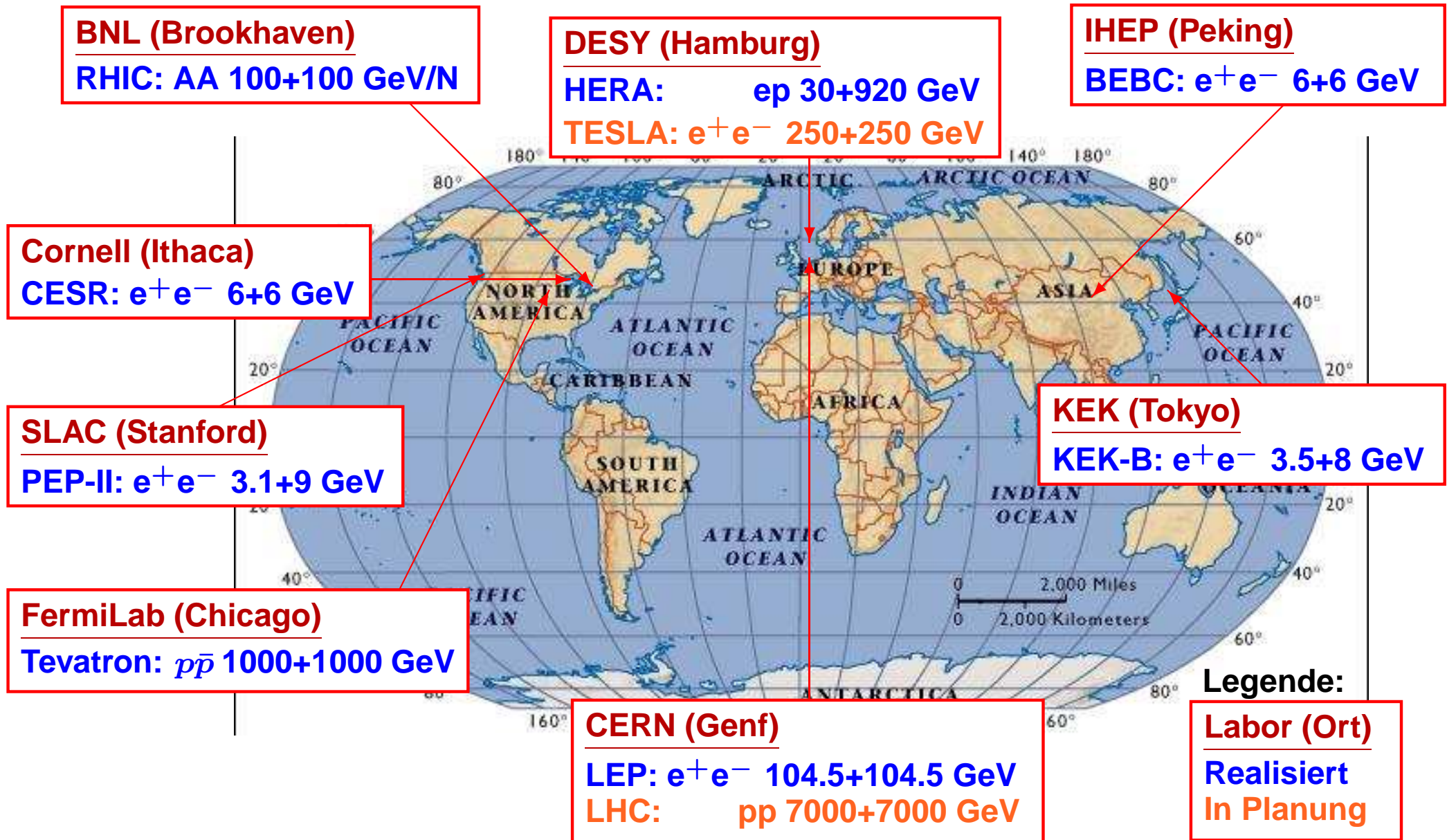


Beschleunigung





Auszug aus der Welt der Beschleuniger





Der Energiebegriff

- Energie hat viele Formen, die ineinander umgewandelt werden können.

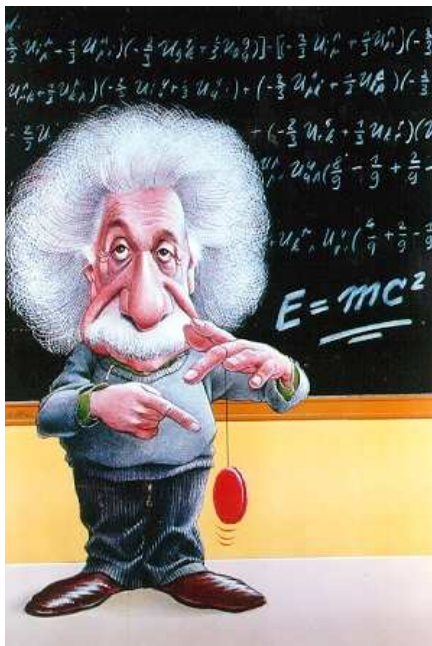
Beispiele sind:

Die Bewegungsenergie (z.B. Wind zum Segeln).

Die Lage- oder potentielle Energie (z.B. Skilift).

Die Wärme (z.B. Aufheizen der Brems Scheiben beim Abbremsen).

- Eine im Alltag nicht so gebräuchliche Form der Energie ist die Masse.



$$E = mc^2$$

m = Masse, c = Lichtgeschwindigkeit = 1

Masse und Energie sind äquivalent (proportional)!
Energie lässt sich in Teilchen / Masse umwandeln
und umgekehrt!

- Massen von Teilchen werden in eV gemessen,
z.B. $m_e = 0.511$ MeV und $m_p = 0.938$ GeV.



Sehen als Streuprozess

Es gibt zwei Arten von Experimenten

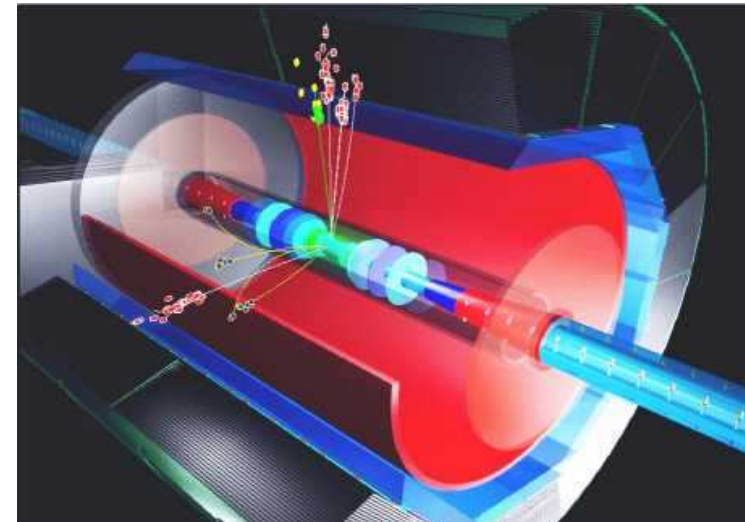


und

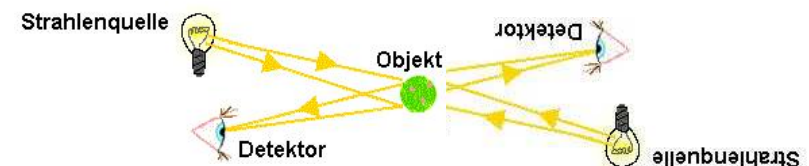


Ein Colliding-Beam Detektor

Viele Reaktionsprodukte mit unterschiedlichen Eigenschaften.
⇒ Zwiebelschalentechnik mit verschiedenen Schalen zur Impuls- oder Energie-Messung von geladenen und neutralen Teilchen.



Das Prinzip bleibt gleich



Erst die Rekonstruktion aller Reaktionsprodukte gibt Aufschluß über die Reaktion.



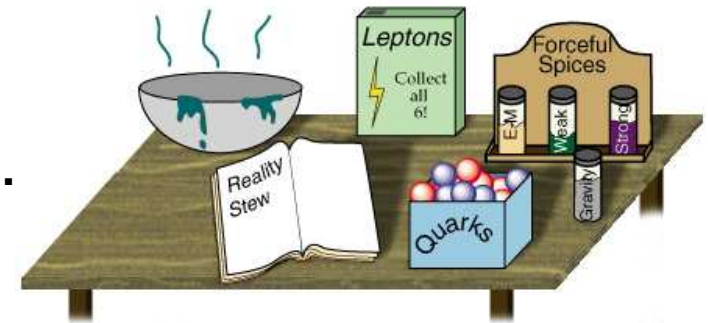
Was wir heraus gefunden haben

Es war ein langer Weg von den vier Elementen...



400 v.Chr.

...bis zum heutigen (2000++) Bild des...



...Kochrezepts der Natur.

Der Stand der Dinge

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
Leptons	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III

- Es gibt drei Familien von Leptonen und Quarks.
- Sie sind Fermionen (Spin = 1/2), und nur die erste Familie bildet stabile Materie.
- Zu jedem dieser Teilchen gibt es ein Antiteilchen mit umgekehrten Ladungen aber sonst identischen Eigenschaften.
- Die Massen sind sehr verschieden und niemand weiß warum. Die Massen reichen von etwa 0 für Neutrinos bis 175 GeV (Atom mit $A = 183$) für das top Quark.
- Die Wechselwirkungen der Fermionen werden durch den Austausch von Bosonen (Spin = 1,2) beschrieben.



Die fundamentalen Wechselwirkungen

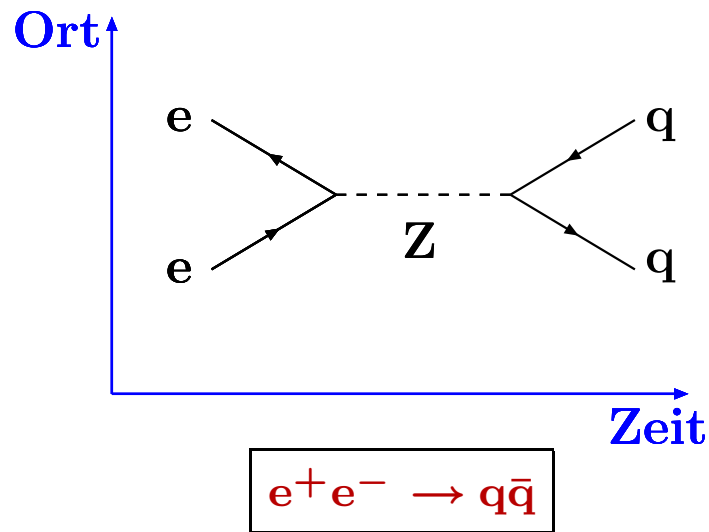
Wechselwirkung	Beispiel	Boson	Masse [GeV/c ²]	Elektrische Ladung [e]	rel. Stärke (Reichweite)
Gravitation	Erdanziehung	Graviton G ?	0	0	10 ⁻³⁸ (∞)
schwach	Kernzerfall	Z W [±]	91.2 80.4	0 ±1	10 ⁻⁵ (10 ⁻³ fm)
elektromagnetisch	Coulombanziehung	Photon γ	0	0	10 ⁻² (∞)
stark	Quark-Einschluss	Gluon g	0	0	1 (1 fm)

Diagramm zur Einbettung in das Standardmodell:
 - Ein blauer Pfeil zeigt von der Beschriftung 'Standardmodell' nach oben zu den Zeilen 'elektromagnetisch' und 'schwach'.
 - Ein grüner Pfeil zeigt von der Beschriftung 'Standardmodell' nach unten zu der Zeile 'stark'.
 - Ein brauner Pfeil zeigt von der Beschriftung 'elektro-schwach' nach unten zu den Zeilen 'schwach' und 'elektromagnetisch'.
 - Ein schwarzer Pfeil zeigt von der Beschriftung '??' nach oben zu der Zeile 'Gravitation'.

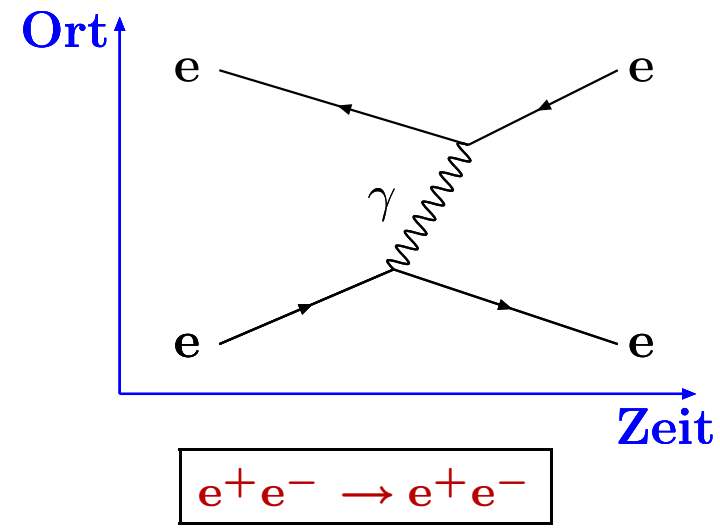


Feynman Diagramme und die vier fundamentalen Vertizes

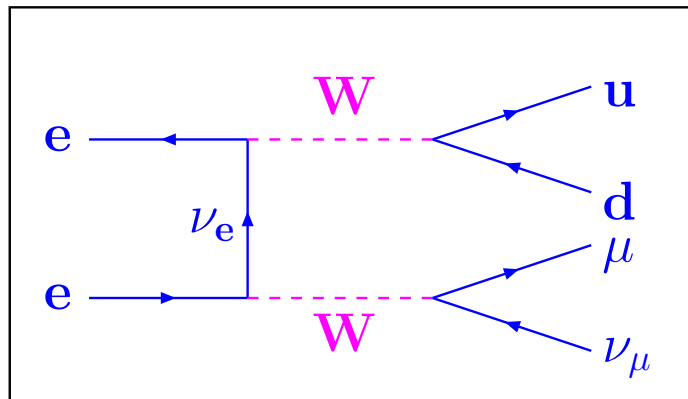
Paarvernichtung und Paarerzeugung



Emission und Absorption



Ein komplizierterer Fall



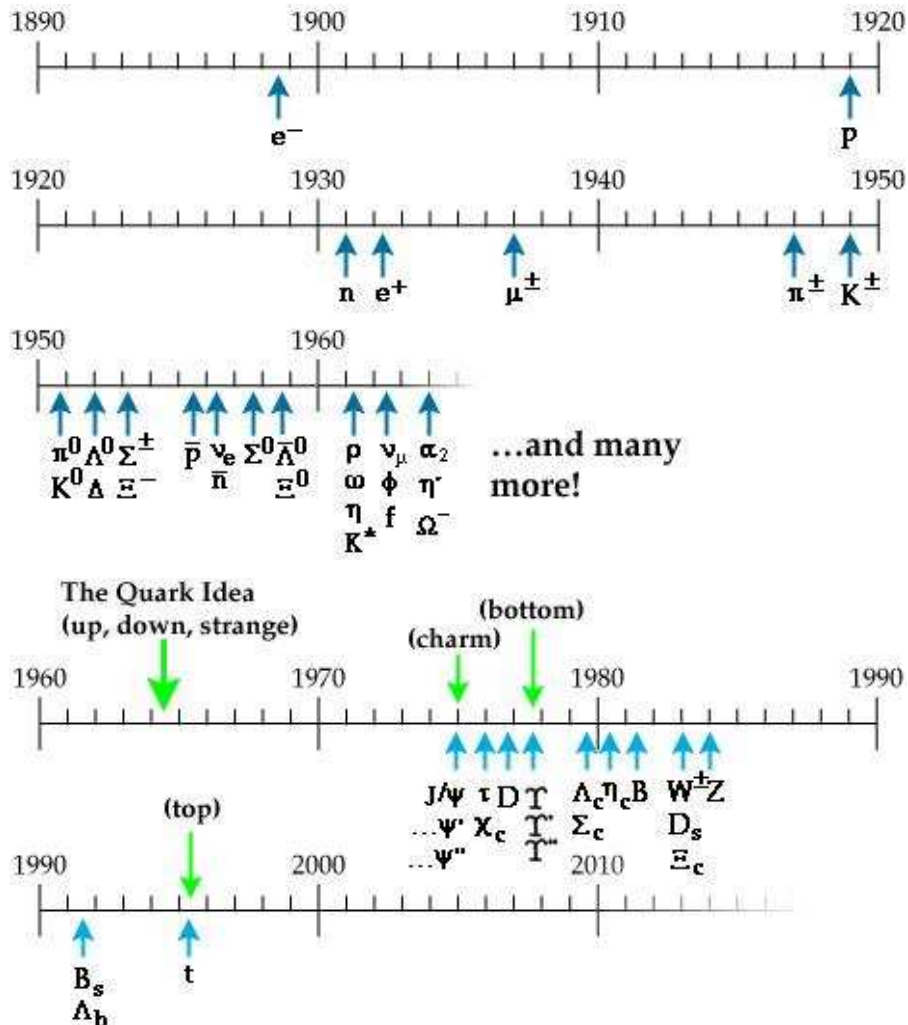
Ein Quiz: Wer darf wo mitspielen?

Kraft \ Wer	e μ τ	ν _{e,μ,τ}	q
Gravitation	✓	✓	✓
el.mag.	✓	—	✓
schwach	✓	✓	✓
stark	—	—	✓



Chronologie der Ereignisse

Entdeckungen der Teilchen



Theoretische Entwicklungen

- 1900: M. Planck - Strahlungs-Quantisierung
- 1925: W. Pauli - Ausschlussprinzip
- 1927: W. Heisenberg - Unbestimmtheitsrelation
- 1928: P. Dirac - Dirac-Gleichung
- 1930: W. Pauli - Postulat des Neutrinos
- 1931: P. Dirac - Postulat des Positrons
- 1933-34: E. Fermi - Theorie des β -Zerfalls
- 1933-34: H. Yukawa - Erklärung der Kernkraft durch den Austausch von Teilchen
- 1954: C.N. Yang und R. Mills - Eich-Theorien
- 1957-59: J. Schwinger, S. Bludman und S. Glashow - W-Bosonen als Mittler der schwachen WW
- 1964: M. Gell-Mann und G. Zweig - Quark Idee
- 1965: O.W. Greenberg, M.Y. Han, und Y. Nambu - Einführung der Quark-Farbladungen
- 1967: S. Weinberg und A. Salam - Elektroschwache Theorie und Postulat des Z-Bosons
- 1973: H. Fritzsch und M. Gell-Mann - QCD



Elektron und Positron

Das erste Antiteilchen, Anderson (1932)

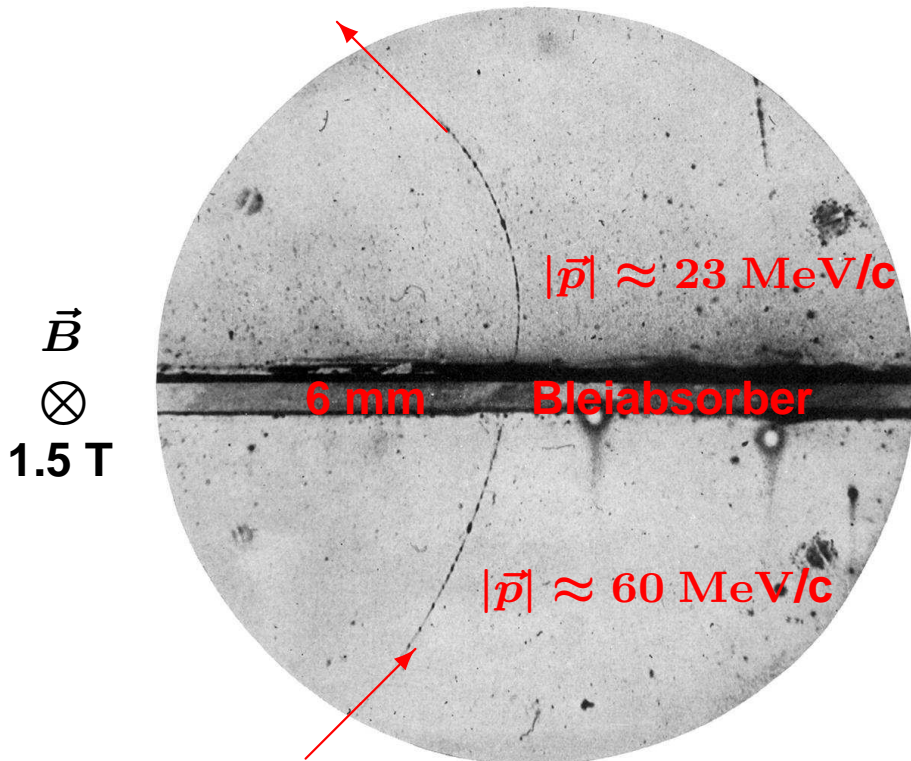


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho=2.1\times 10^5$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho=7.5\times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \Rightarrow r = \frac{|\vec{p}|}{|q\vec{B}|}$$

15 Kandidaten aus 1300 Photos

Ein alter Bekannter - das Elektron

Name	e^-
Ladung	$-1 e$
Masse	0.511 MeV
Spin	$1/2 \hbar$
Lebensdauer	∞

Warum es kein Proton sein kann

Spurlänge $l > 5$ cm

$$p \approx 0.13(0.05) m \cdot e \cdot 1.5T = 60(23) \frac{\text{MeV}}{c}$$

$$E_e = \sqrt{p^2 + m^2} \approx 23 \text{ MeV}$$

$$E_p = \frac{p^2}{2m_p} \approx \frac{23^2}{2000} \text{ MeV} = 0.26 \text{ MeV}$$

Die Reichweite für p ist nur 5 mm



Das Myon

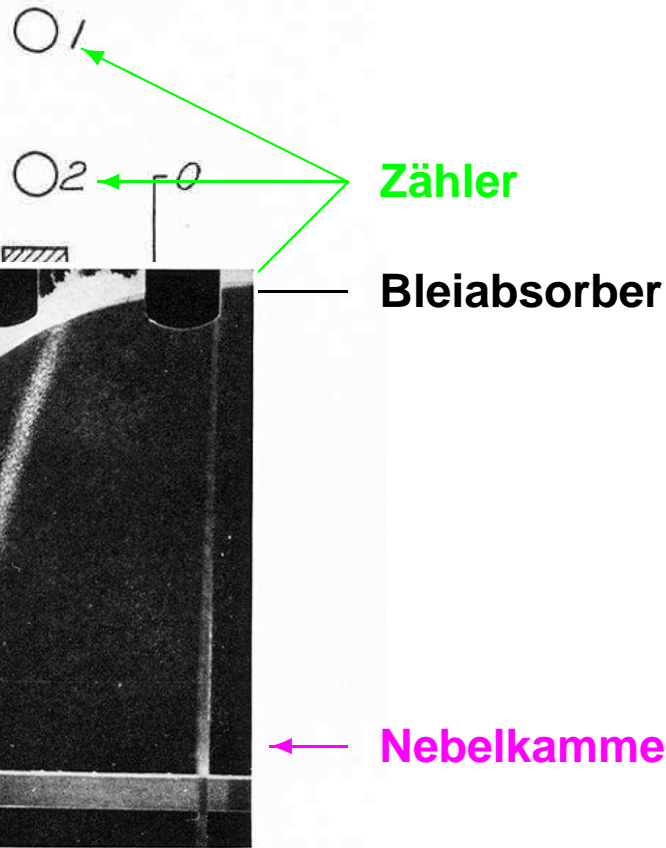


FIG. 3. Track B.



FIG. 1. Geometrical arrangement of apparatus.

Stevenson und Street (1937)

Eigenschaften

Name	μ^-
Ladung	$-1 e$
Masse	105.6 MeV
Spin	$1/2 \hbar$
Lebensdauer	$2.2 \cdot 10^{-6} s$

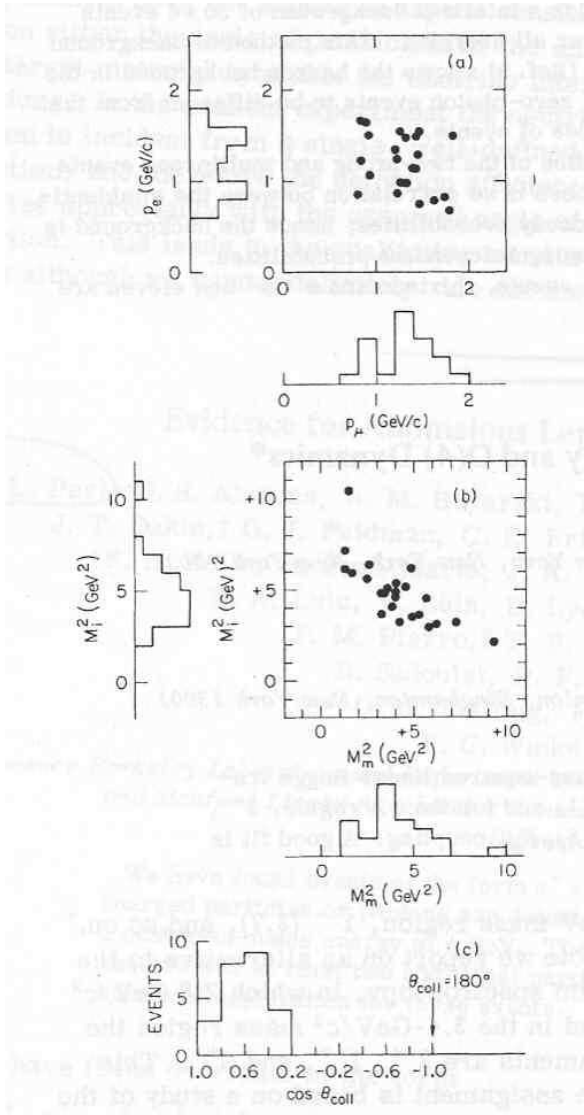
Warum es kein Proton sein kann

- Spurlänge ≈ 7 cm
- Aus Krümmung im B-Feld folgt p und daraus $E_p \approx 0.44$ MeV.
- Die Reichweite für p ist nur 1 cm.
- Aus Blasendichte folgt dann m $\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{v^2} \Rightarrow m \approx 130 m_e$

1 Kandidat aus 1000 Photos!



Das Tau



$$|\vec{p}_\mu| \leftrightarrow |\vec{p}_e|$$

$$\Rightarrow |\vec{p}_\mu| \neq |\vec{p}_e|$$

$$M_{\text{miss}}^2 \leftrightarrow M_{\tau\tau}^2$$

$$\Rightarrow \geq 2 \text{ zusätzliche Teilchen}$$

$$\cos(\theta) = -\frac{\vec{p}_e \cdot \vec{p}_\mu}{|\vec{p}_e| |\vec{p}_\mu|}$$

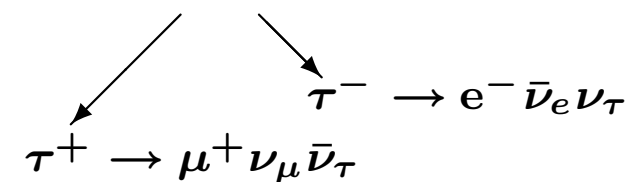
$$\Rightarrow \cos(\theta) \neq -1$$

Perl et al. (1975)

Eigenschaften

Name	τ^-
Ladung	$-1 e$
Masse	1777 MeV
Spin	$1/2 \hbar$
Lebensdauer	$2.91 \cdot 10^{-13} s$

SPEAR Ring (SLAC), $\sqrt{s_{ee}} = 4.8 \text{ GeV}$
 Mark I Detektor, Suche nach:
 $e^+e^- \rightarrow \mu^- e^+ (\mu^+ e^-) + \geq 2 \text{ Teilchen}$
 Prozess: $e^+e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$



24 Ereignisse mit 4.7 ± 1.2 Untergrund



Das Elektron-Neutrino - die Kinematik

- Der Zweikörper-Zerfall: $0 \rightarrow 1 + 2$ mit:
$$\begin{pmatrix} E_0 \\ \vec{p}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_2 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix}$$
- Falls das Teilchen 0 in Ruhe ist folgt: $|\vec{p}_0| \equiv 0$, $E_0 = m_0 \equiv \sqrt{s}$ und $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0$
- Mit: $E_i^2 = m_i^2 + \vec{p}_i^2$ und $|\vec{p}_i| \equiv p$ ergibt sich:

$$s = (E_1 + E_2)^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2p^2 + 2E_1 E_2$$

$$0 = - \{ [s - (m_1^2 + m_2^2)] - 2p^2 \}^2 + 4(p^2 + m_1^2)(p^2 + m_2^2)$$

$$0 = - [s - (m_1^2 + m_2^2)]^2 + 4p^2 [s - (m_1^2 + m_2^2)] - 4p^4 + 4p^4 + 4p^2 (m_1^2 + m_2^2) + (m_1^2 m_2^2)$$

$$4p^2 s = s^2 - 2s(m_1^2 + m_2^2) + 4(m_1^2 - m_2^2)^2$$

– Also:

$$|\vec{p}| = \frac{S_{12}}{2\sqrt{s}}$$

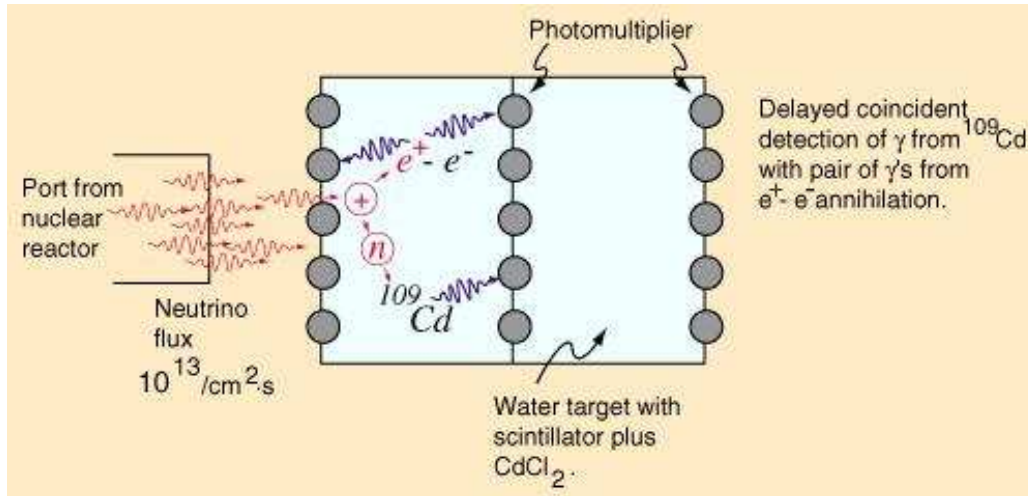
mit:

$$S_{12} = \sqrt{[s - (m_1 + m_2)^2][s - (m_1 - m_2)^2]}$$

Im Zweikörper-Zerfall haben die auslaufenden Teilchen eine feste Energie!



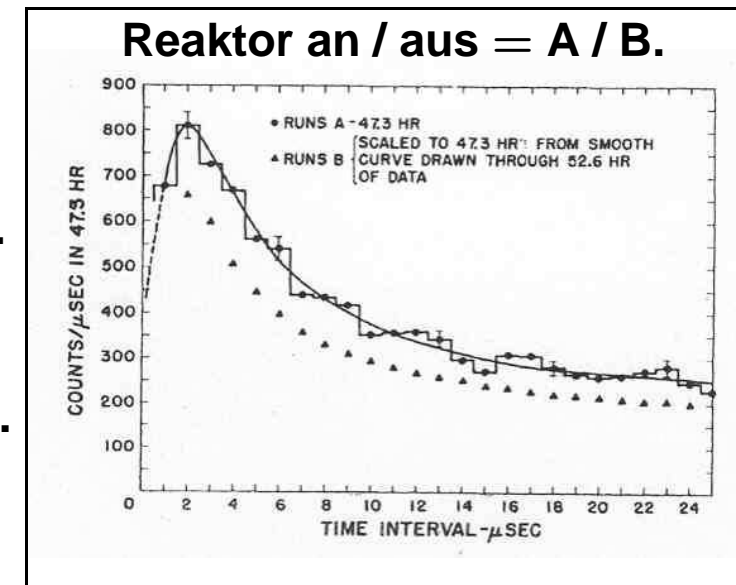
Das Elektron-Neutrino - das Experiment



Eigenschaften

Name	ν_e
Ladung	0
Masse	$< 3 \text{ eV}$
Spin	$1/2 \hbar$
Lebensdauer	∞

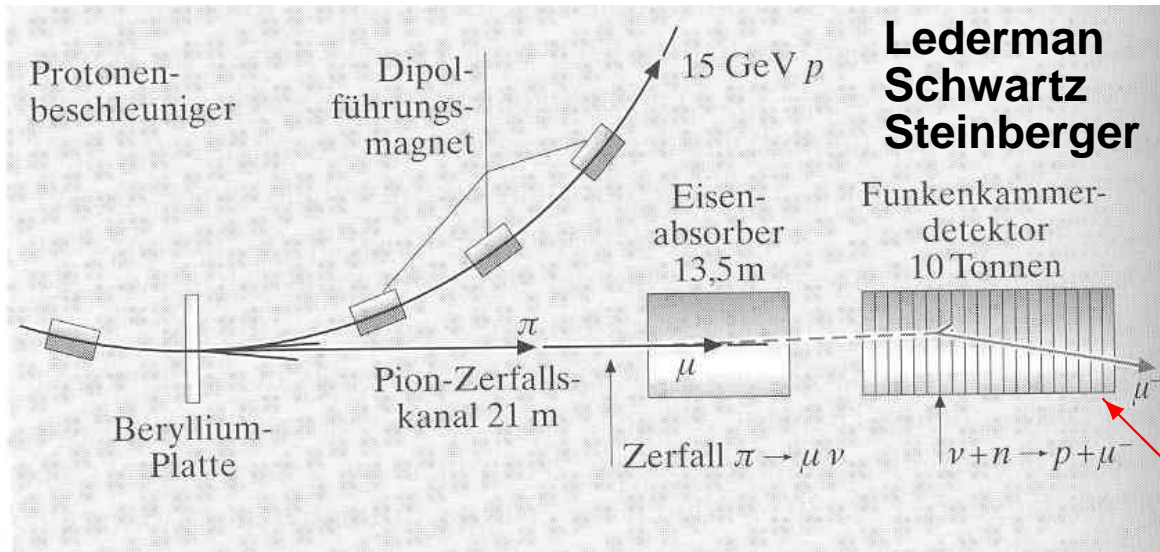
- Savannah River Reaktor, Cowan und Reines (1956)
 - Messung von $\bar{\nu}_e p \rightarrow e^+ n$. Die Ereignissrate war 36/h.
 - Nachweis durch verzögerte Koinzidenz zweier Teilreaktionen.
- 1) Abbremsen von e^+ und Annihilation: $e^+ e^- \rightarrow 2\gamma$.
 \Rightarrow Promptes Signal mit $E = (1.5 - 8) \text{ MeV}$.
 - 2) Diffusion von n und $n + {}^{108}\text{Cd} \rightarrow {}^{109}\text{Cd}^* \rightarrow {}^{109}\text{Cd} + \gamma's$.
 \Rightarrow Signal nach $\Delta t = (0.75 - 25.75) \mu\text{s}$ mit einer Energie von $E = (3 - 10) \text{ MeV}$.





Das Myon-Neutrino

Das Experiment - Danby et al. (1962)



Eigenschaften

Name	ν_μ
Ladung	0
Masse	$< 190 \text{ keV}$
Spin	$1/2 \hbar$
Lebensdauer	∞

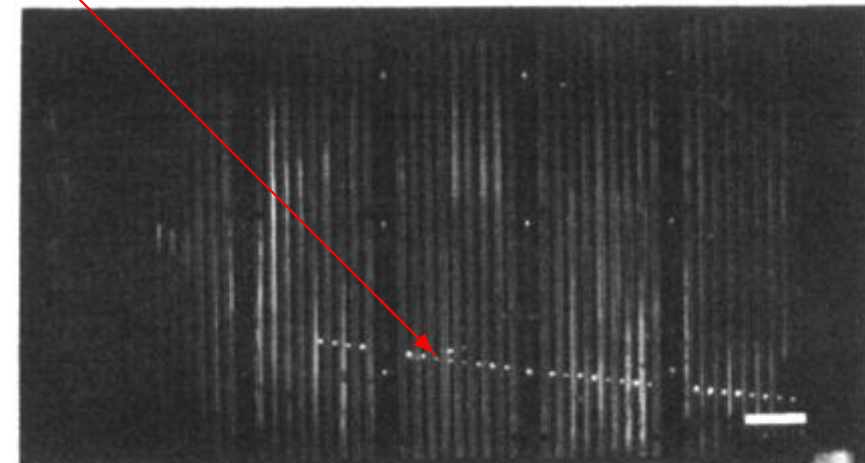
- Brookhaven Alternating-Gradient-Synchrotron (AGS)
15 GeV Protonen auf Be target, ν_μ aus $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$.
- Absorption aller Hadronen und der meisten Myonen.
- Nachweis durch die Reaktion: $\nu_\mu n \rightarrow \mu^- p + X$.

Das Ergebnis

- **29 / 6** Ereignisse mit $p(\mu^- / e^-) \geq 300 \text{ MeV}$.

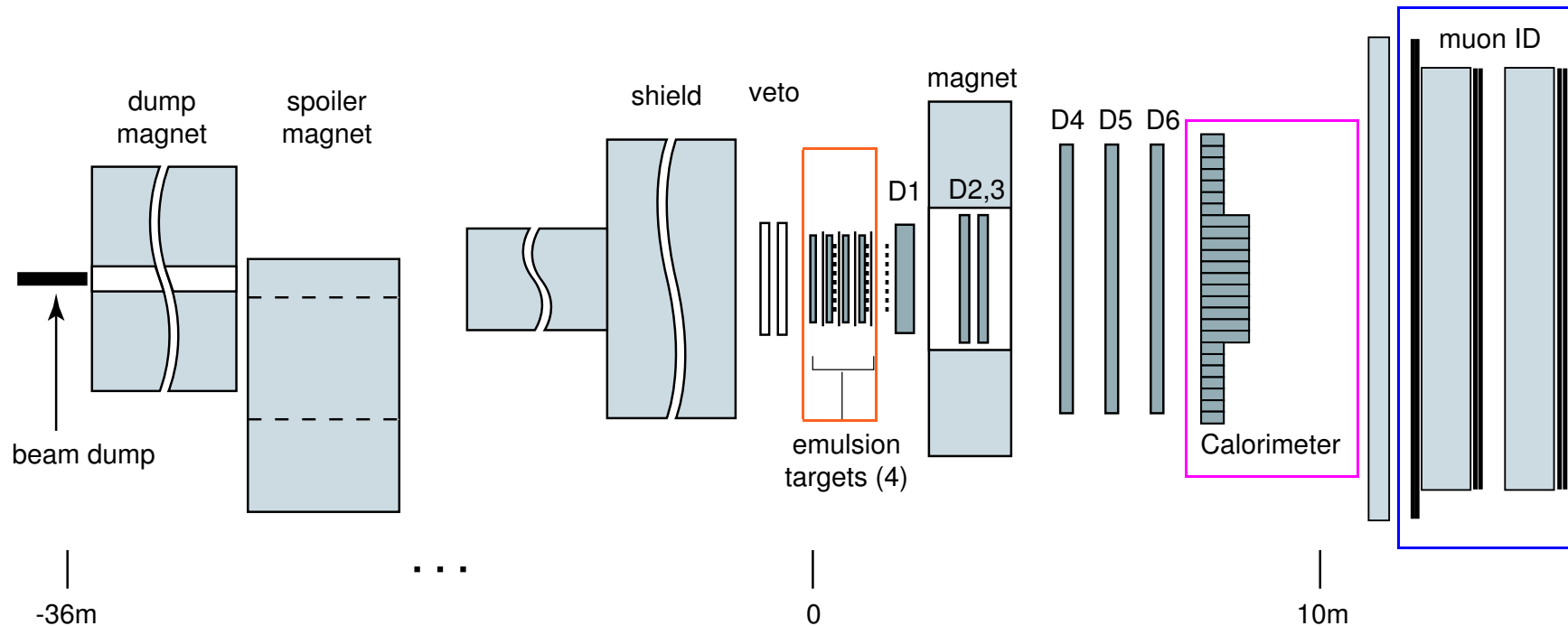
Daraus folgt: ν_μ und ν_e sind verschiedene Teilchen.

Bild aus der Funkkammer





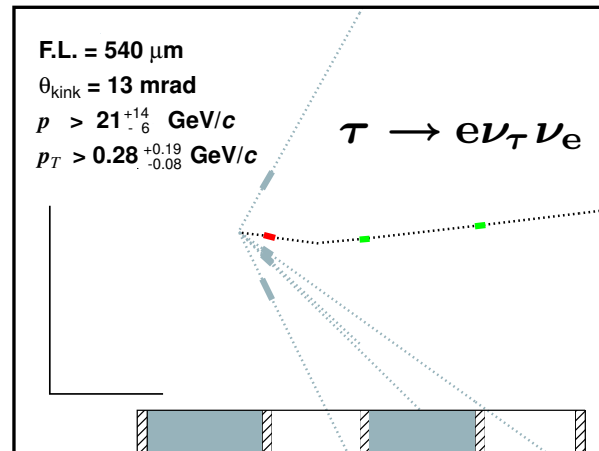
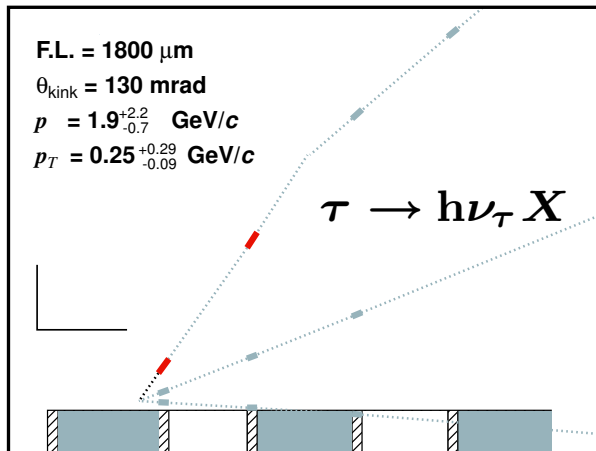
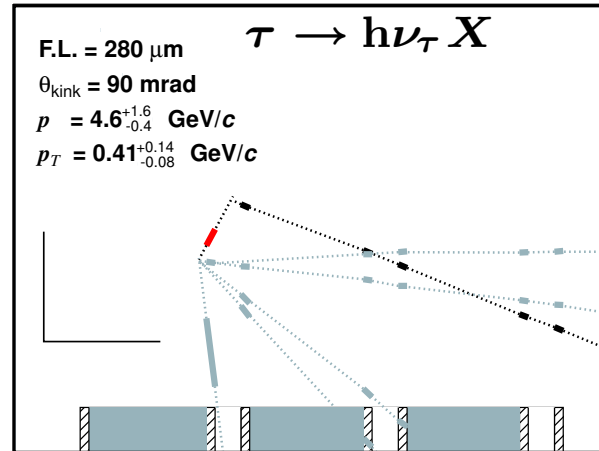
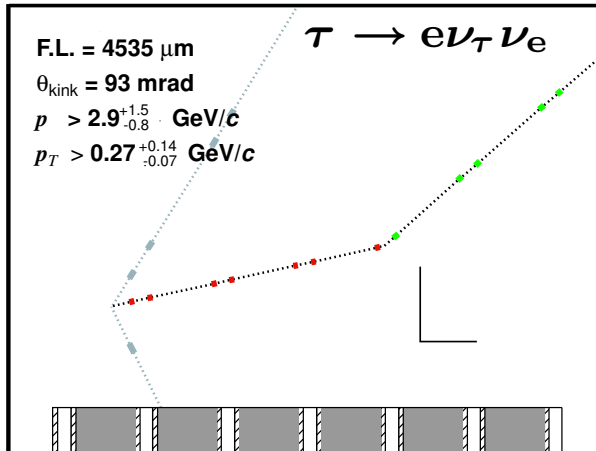
Das Tau-Neutrino - das Experiment



- Fermilab, DONUT = Direct Observation of NU Tau.
- 800 GeV Protonen auf Be target, Produktion der ν_τ in D_s Zerfällen.
- Reaktion: $D_s^- \rightarrow \tau^- \bar{\nu}_\tau$ und $\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$.
- Nachweis des ν_τ durch die Reaktion: $\nu_\tau \rightarrow \tau^- + X$ in **Emulsionstargets**, ($c\tau_\tau \approx 2$ mm).
- Signatur: Ereignisse mit einem τ^- als einzigem Lepton am Produktionsvertex und Rekonstruktion des τ^- Zerfalls. Identifizierung von Zerfallselektronen im **Kalorimeter** und von Zerfallsmuonen in den **Myonkammern**.



Das Tau-Neutrino - das Resultat



Eigenschaften

Name	ν_τ
Ladung	0
Masse	$< 18.2 \text{ MeV}$
Spin	$1/2 \hbar$
Lebensdauer	∞

0.1 mm
 1 mm

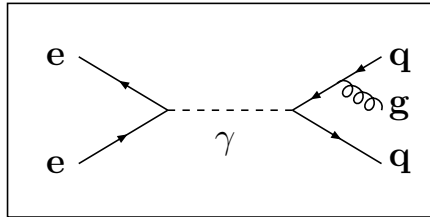
203 Ereignisse, $94 \pm 17 (\mu)$, $61 \pm 14 (e)$, 4 (τ), der Rest ohne Leptonen am Vertex, $\epsilon_\tau \approx 50 \%$.

4 Ereignisse bei einem erwarteten Untergrund von 0.34 Ereignissen.



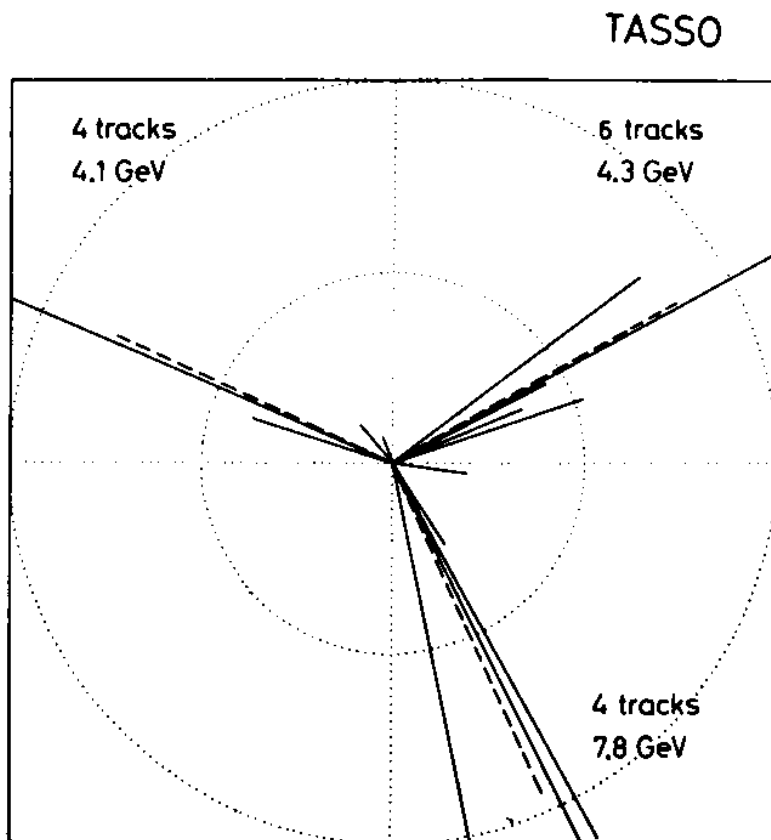
Das Gluon - das Boson der starken Wechselwirkung

Die Reaktion



Eigenschaften

Name	g
Ladung	0
Masse	0
Spin	$1 \hbar$



Die Entdeckung

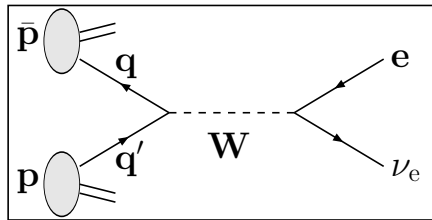
- PETRA, $\sqrt{s_{ee}} = (17 - 35) \text{ GeV}$
- JADE, MARK-J, PLUTO, TASSO (1979)
- 3-Jet Topologie in $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$

Manifestation der Gluonen der QCD.



Das W-Boson - ein Boson der schwachen Wechselwirkung

Die Reaktion



Die Vorhersage

$$M_W = (82 \pm 2.4) \text{ GeV}$$

Eigenschaften

Name	W
Ladung	1 e
Masse	$(80.449 \pm 0.034) \text{ GeV}$
Spin	1 \hbar
Zerfallsbreite	$(2.136 \pm 0.069) \text{ GeV}$

Die Entdeckung

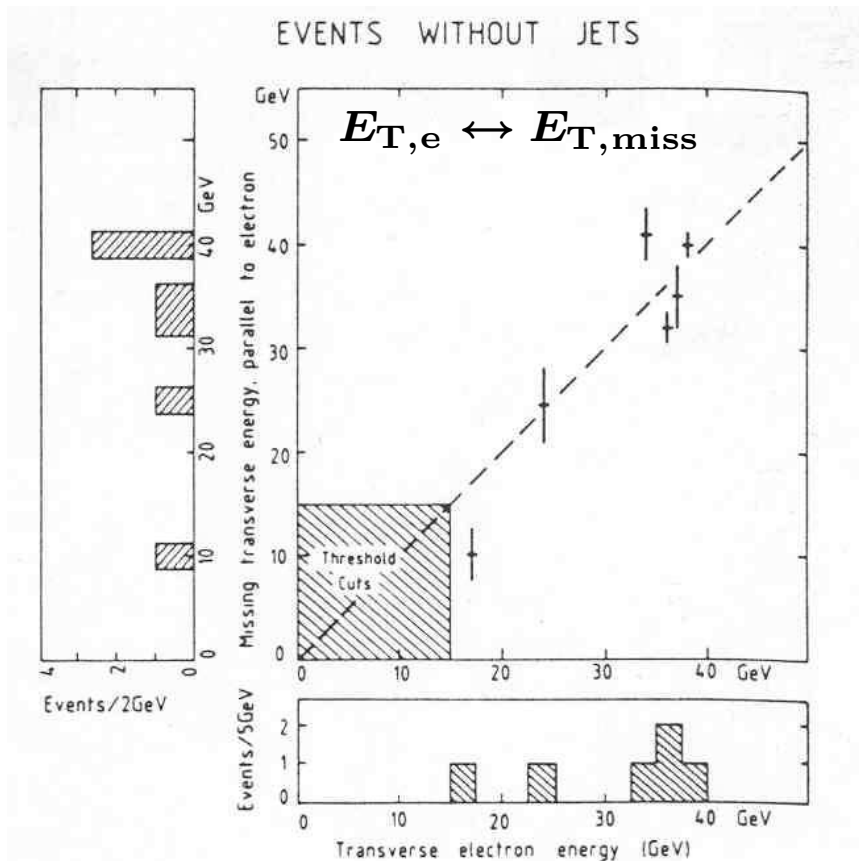
CERN-SPS, $\sqrt{s_{p\bar{p}}} = 540 \text{ GeV}$

UA1(1983), $\mathcal{L}_{\text{int}} = 0.018 \text{ pb}^{-1}$

$p\bar{p} \rightarrow W X$

\downarrow
 $W \rightarrow e \nu_e$

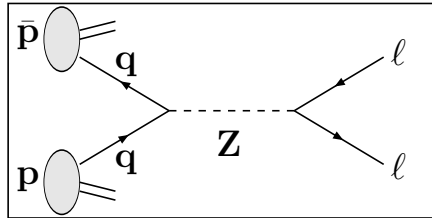
6 Ereignisse $\Rightarrow M_W = 81 \pm 5 \text{ GeV}$





Das Z-Boson - ein Boson der schwachen Wechselwirkung

Die Reaktion

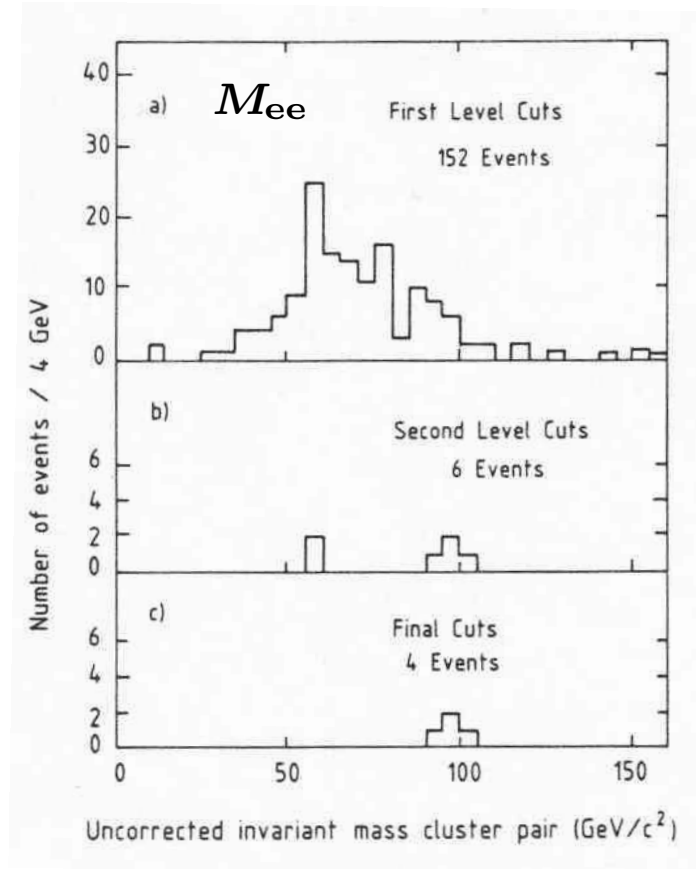


Die Vorhersage

$$M_Z = (94 \pm 2.5) \text{ GeV}$$

Eigenschaften

Name	Z
Ladung	0
Masse	(91.1875 ± 0.0021) GeV
Spin	1 ħ
Zerfallsbreite	(2.4952 ± 0.0023) GeV



Die Entdeckung

CERN-SPS, $\sqrt{s_{p\bar{p}}} = 540 \text{ GeV}$

UA1(1984), $\mathcal{L}_{\text{int}} = 0.055 \text{ pb}^{-1}$

$p\bar{p} \rightarrow Z X$

$Z \rightarrow e^+e^- (\mu^+\mu^-)$

$4e^+e^-$ und $1\mu^+\mu^-$, $M_Z = (95.2 \pm 2.5) \text{ GeV}$



Zusammenfassung

- Die Teilchenphysik beschäftigt sich mit den elementaren Konstituenten der Materie und ihren fundamentalen Wechselwirkungen.
- Wegen $E = mc^2$ können Masse und kinetische Energie ineinander umgewandelt werden.
- Erkenntnisse werden aus Versuchen mit kosmischer Strahlung und Beschleunigern gewonnen.
- Das Auflösungsvermögen ist durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation $\Delta x \Delta p \approx \hbar$ gegeben, Faustformel: $\Delta x \Delta p = 0.2 \text{ fm GeV}$.
- Aus heutiger Sicht gibt es zwölf elementare Konstituenten - sechs Leptonen $(\nu_e, e), (\nu_\mu, \mu), (\nu_\tau, \tau)$ und sechs Quarks $(u, d), (c, s), (t, b)$.
- Wir kennen drei fundamentale Wechselwirkungen (elektro-schwach, stark und Gravitation). Hierbei ist die elektro-schwache Wechselwirkung bereits die Vereinigung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung. Das Standardmodell ist dann die Vereinigung der elektro-schwachen und der starken Wechselwirkung.
- Die Einbindung der Gravitation in dieses Wechselwirkungsbild ist bis heute nicht gelungen.