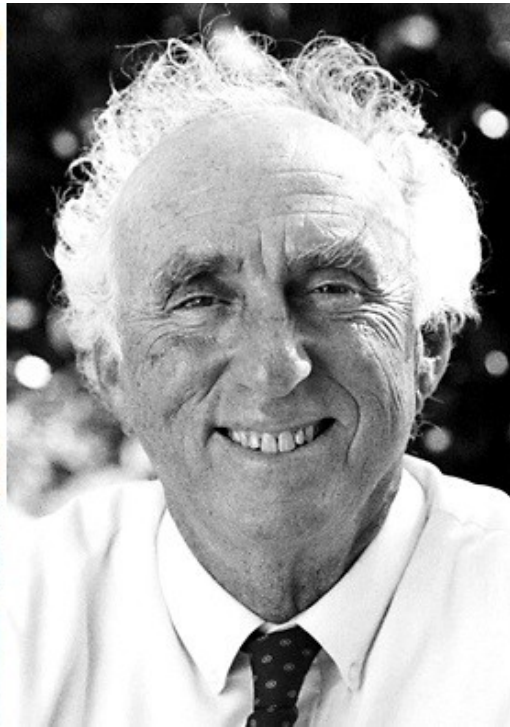
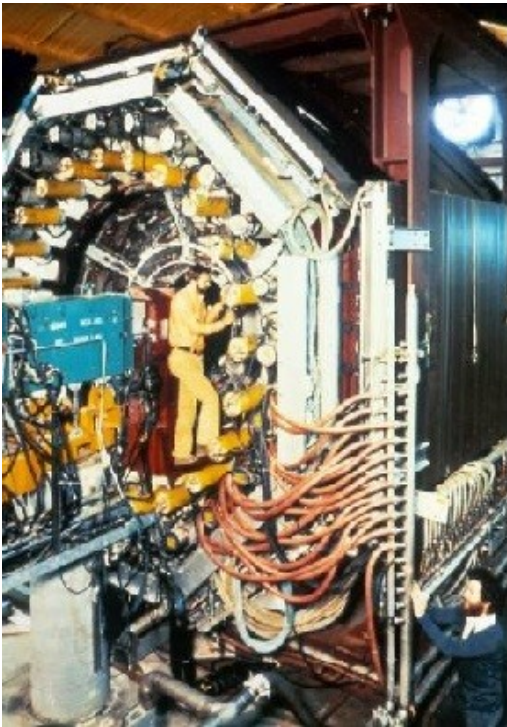


Entdeckung des τ -Leptons („Das Dritte“)



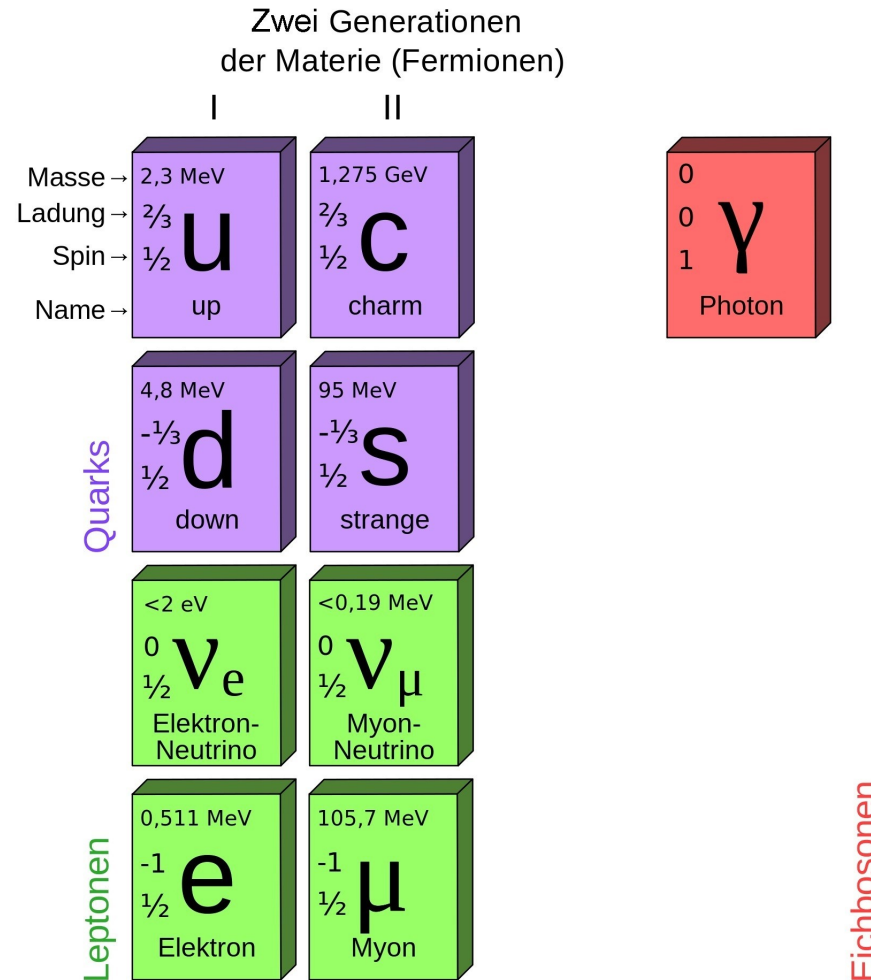
Referat von Stephan Goerttler, Datum: 12.12.2014

Seminar „Schlüsselexperimente der Teilchenphysik“

Inhalt

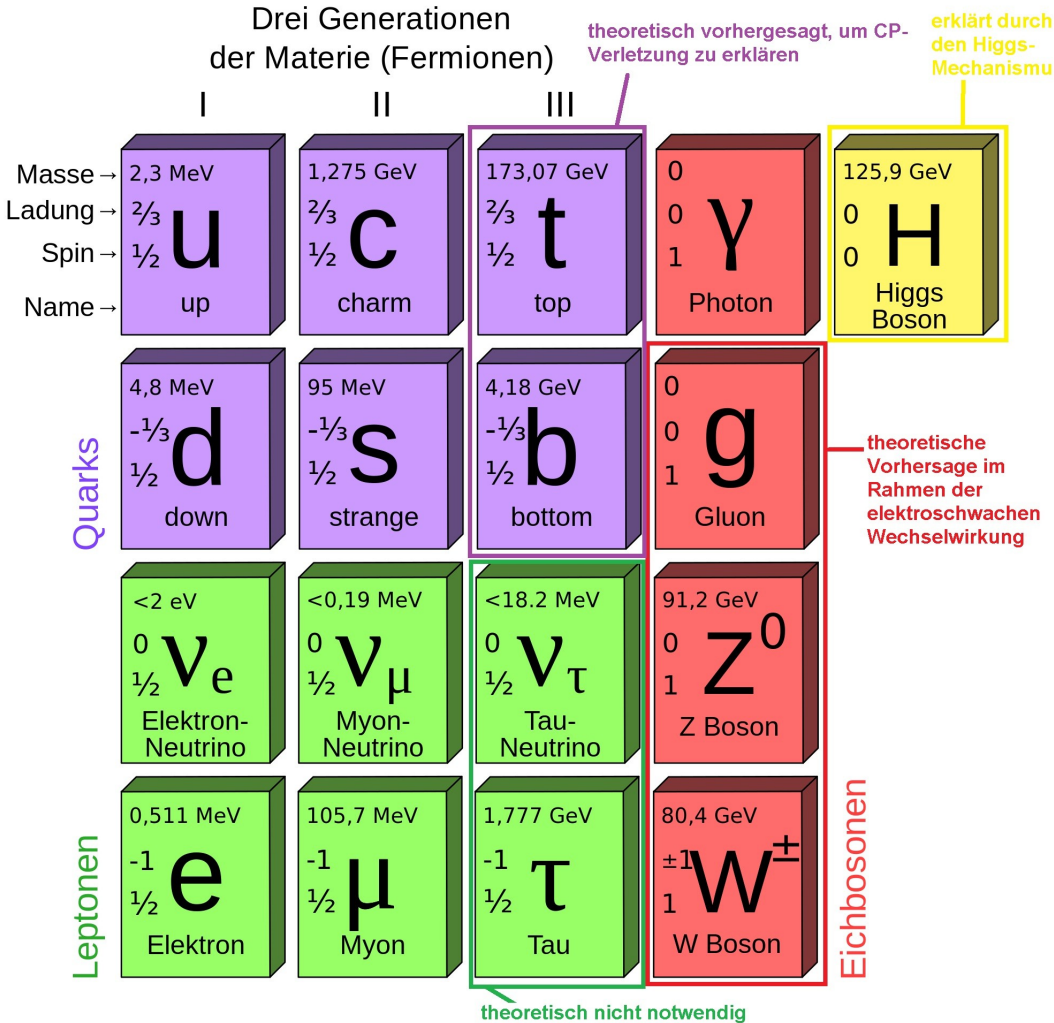
- I. Theoretische Grundlagen des τ -Lepton Zerfalls
- II. Das Schlüsselexperiment 1975
- III. Nachfolgende Experimente
- IV. Situation heute

Standardmodell der Teilchenphysik 1975

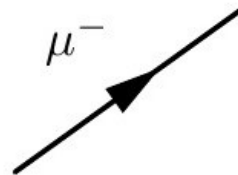


Standardmodell der Teilchenphysik

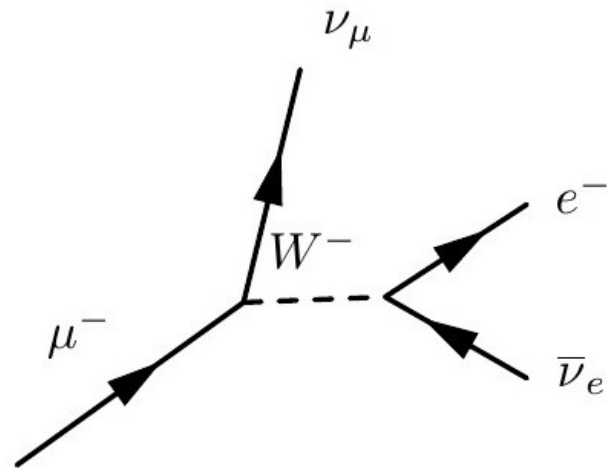
1975



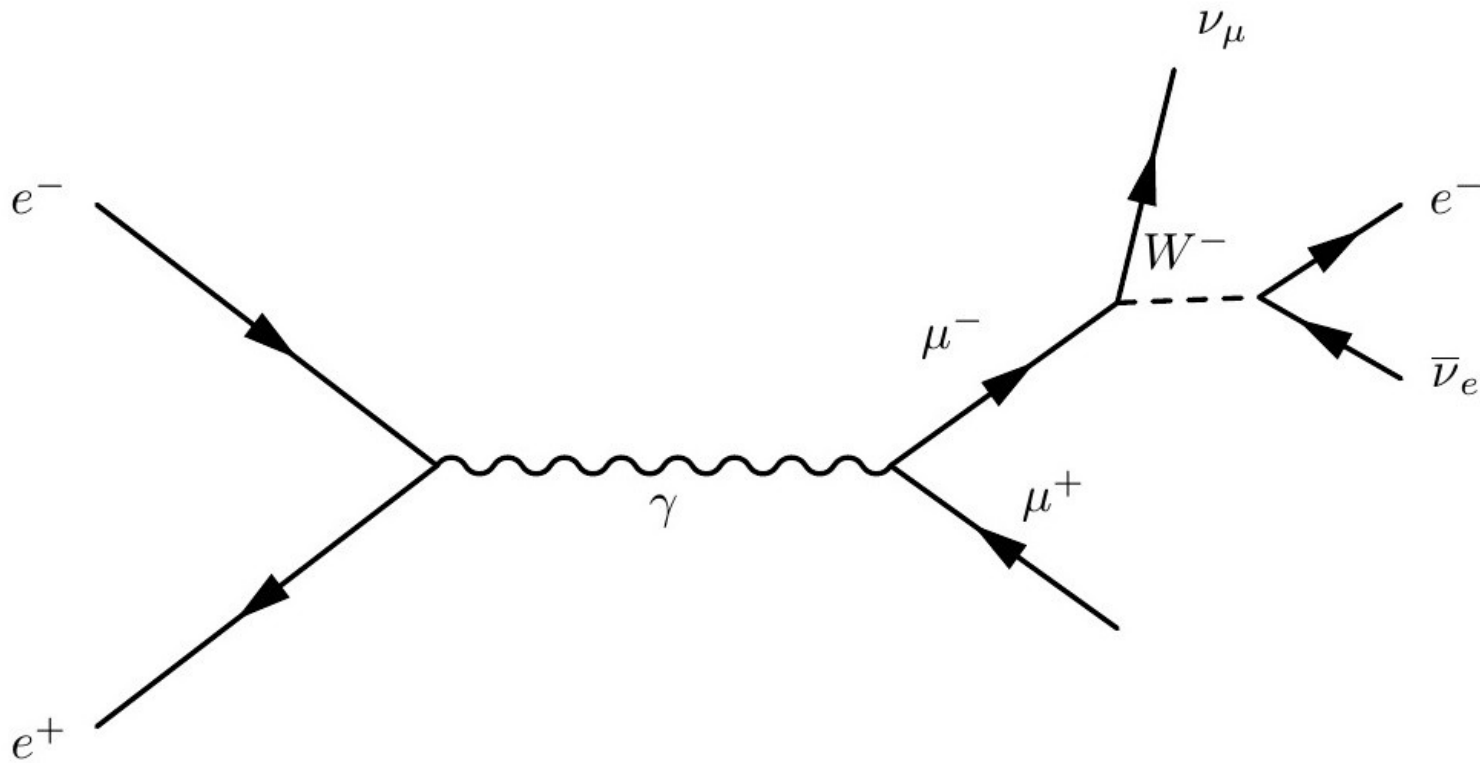
Myonzerfall



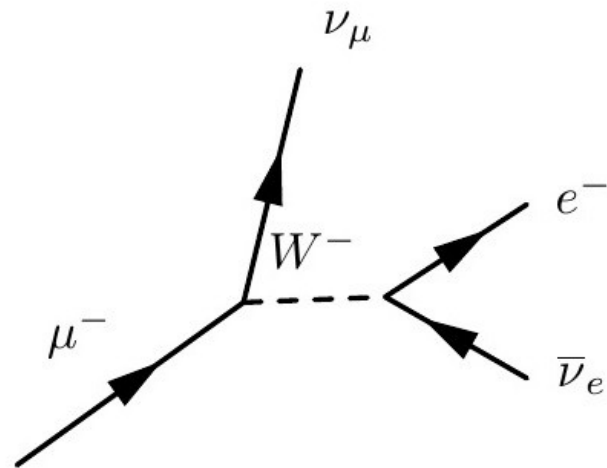
Myonzerfall



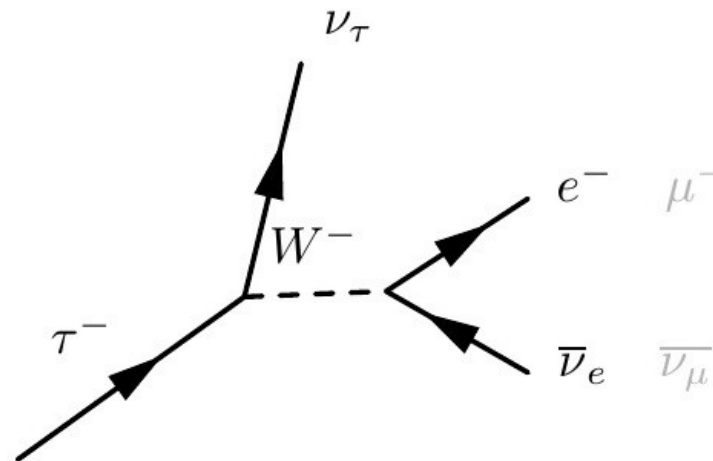
Myonzerfall bei e^+e^- -Annihilation



Myonenzерfall

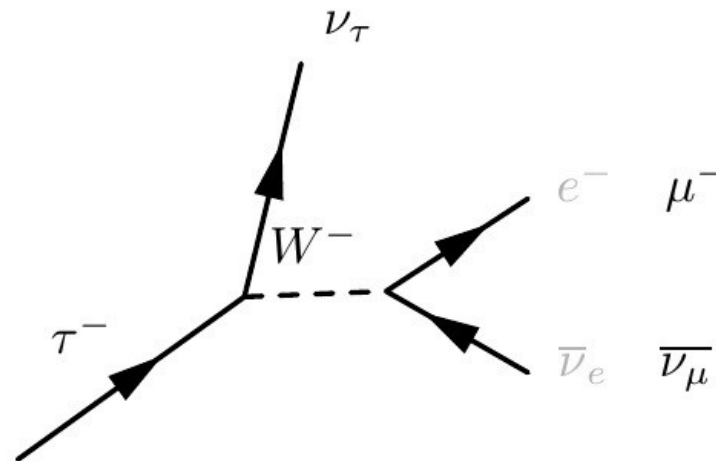


Möglicher Zerfall eines schweren Leptons



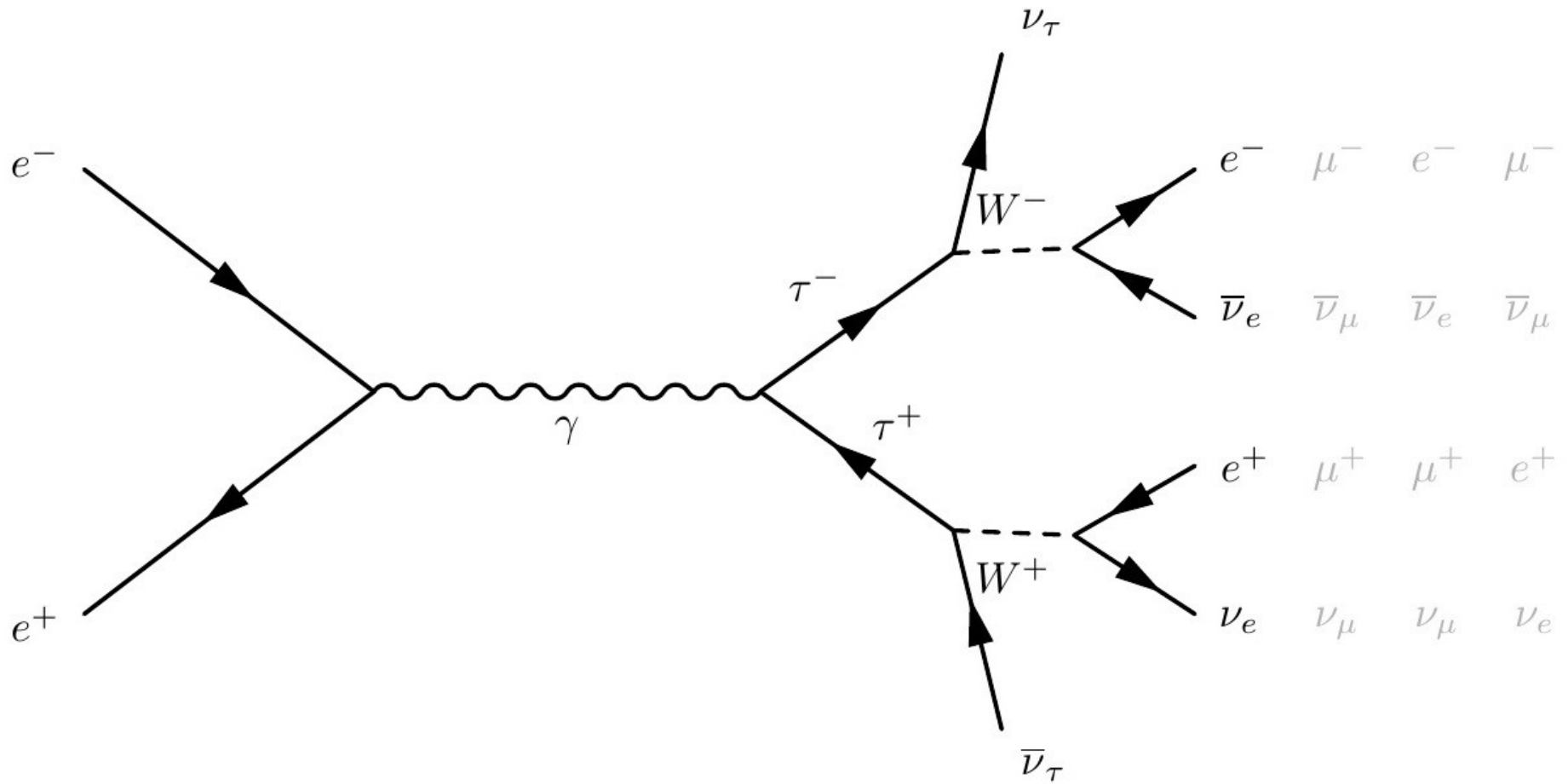
→ durch Analogie
begründet

Möglicher Zerfall eines schweren Leptons

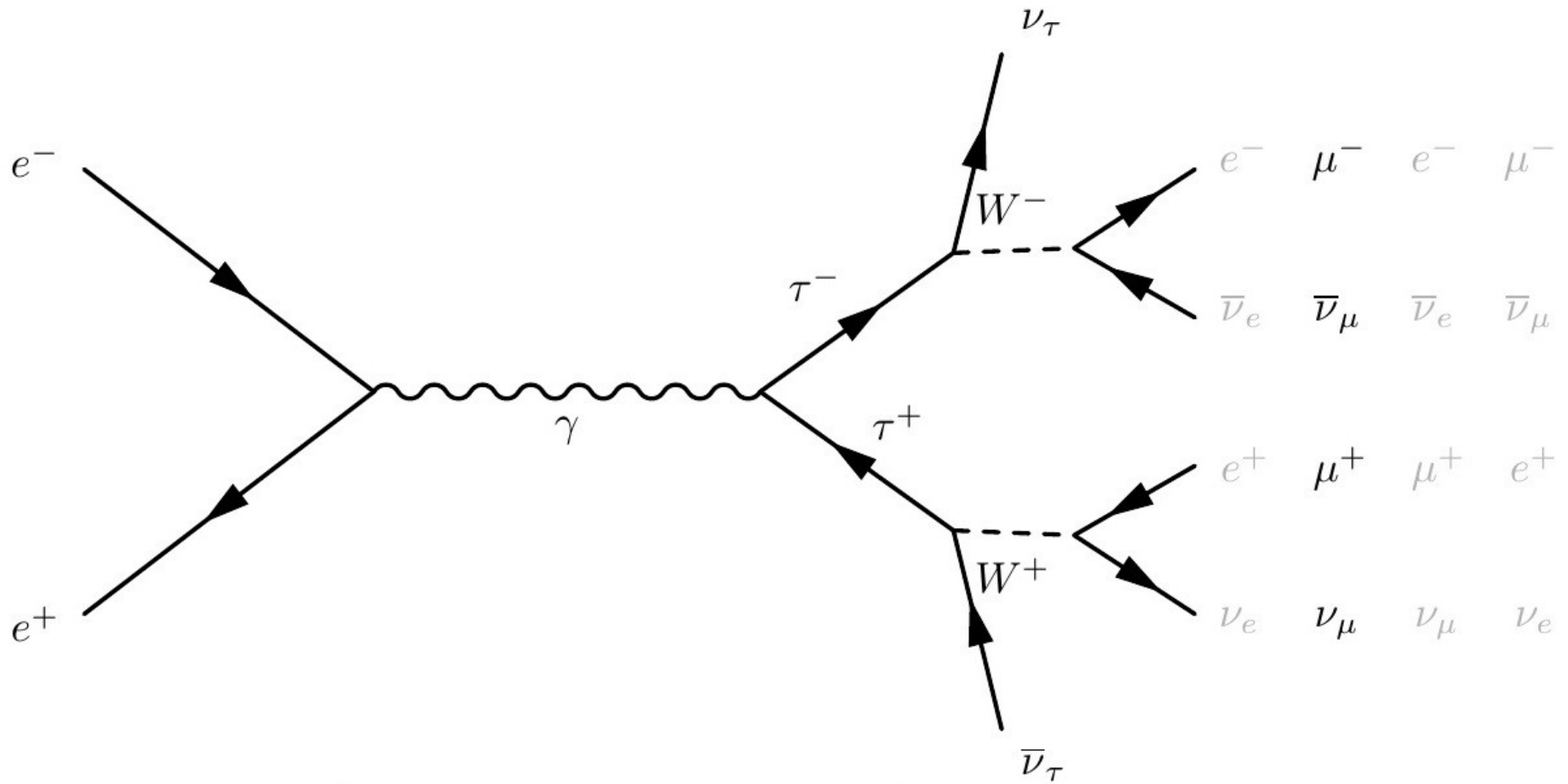


→ durch Analogie
begründet

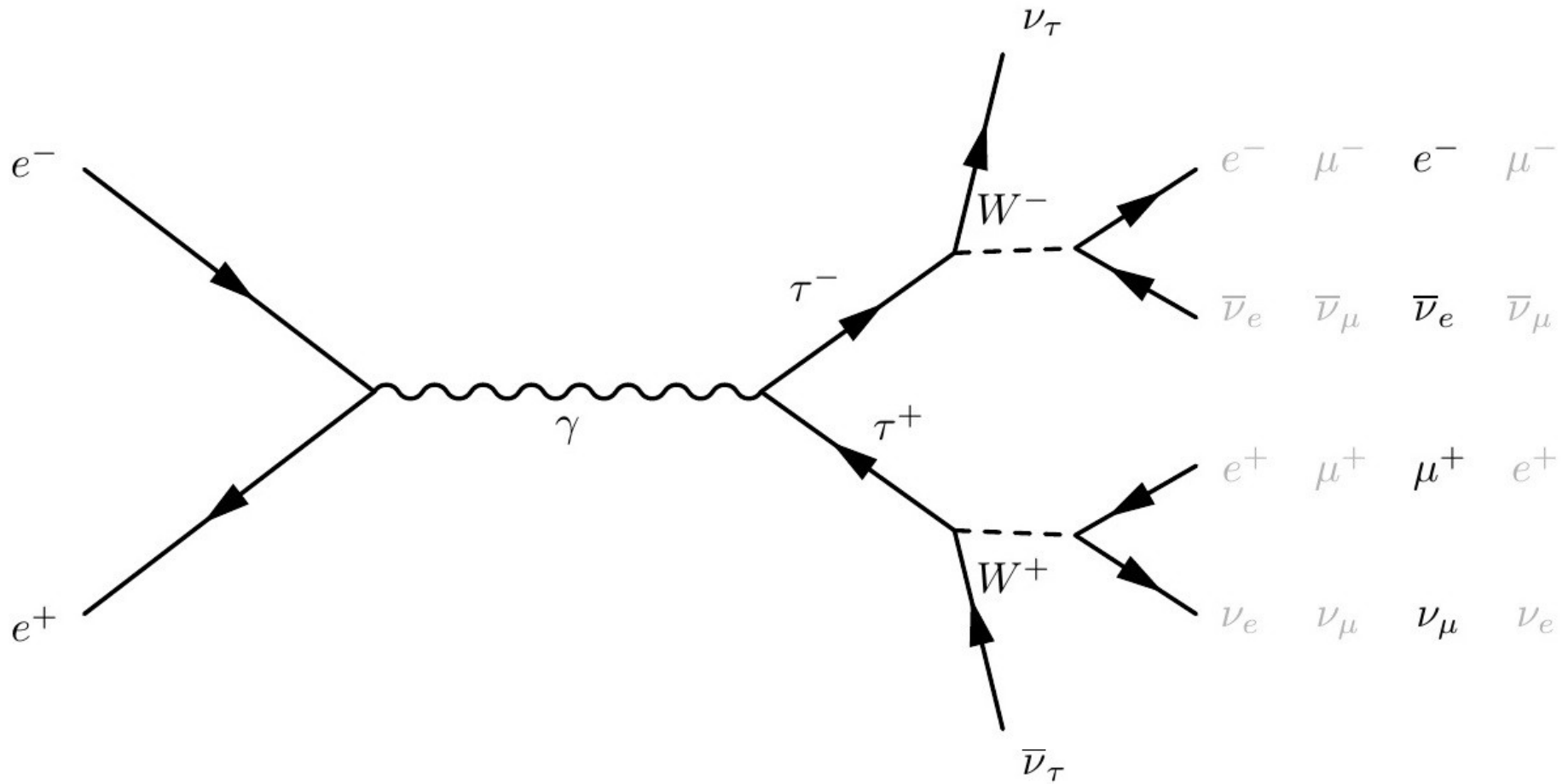
τ -Zerfall bei e^+e^- -Annihilation



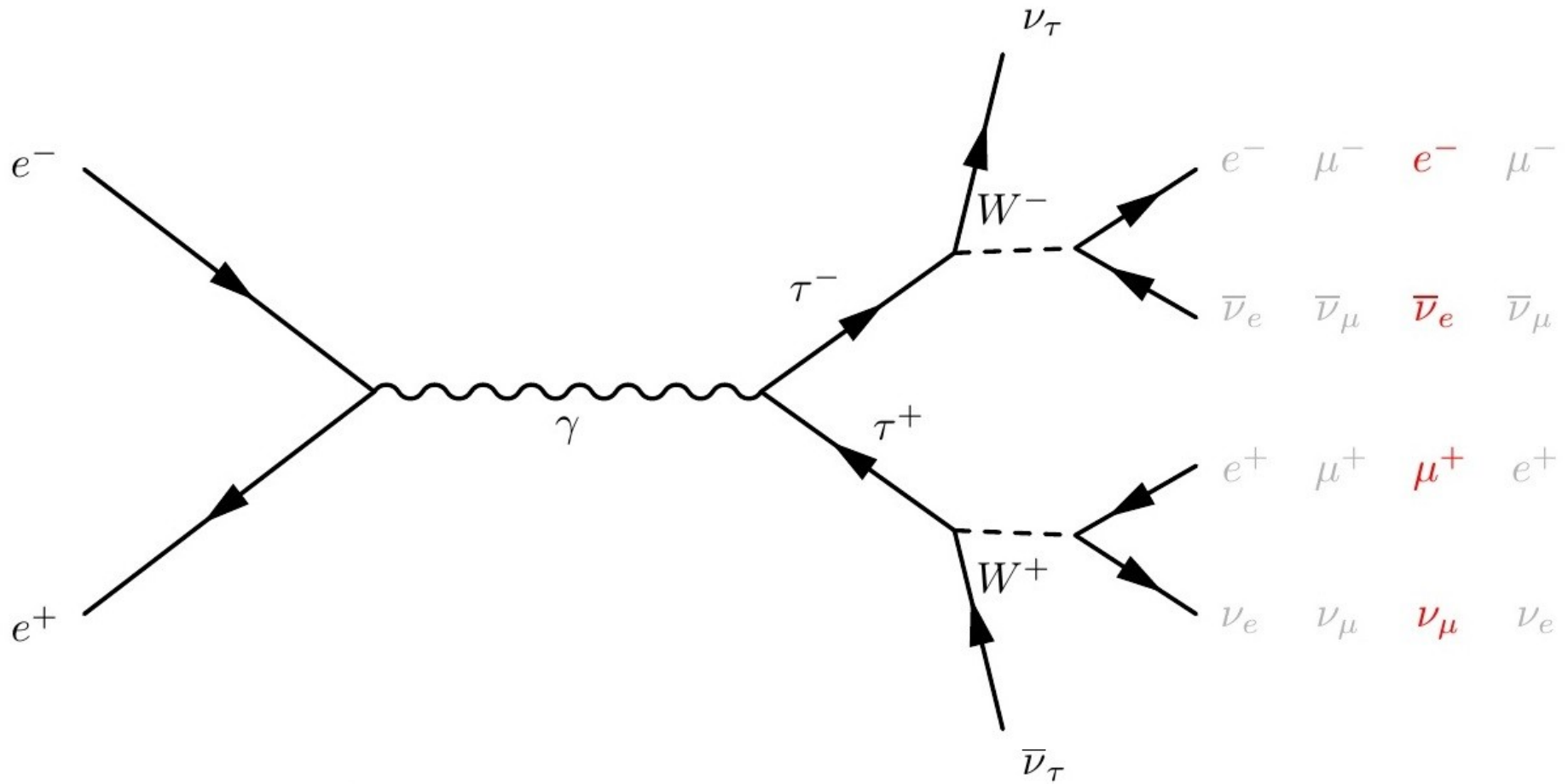
τ -Zerfall bei e^+e^- -Annihilation



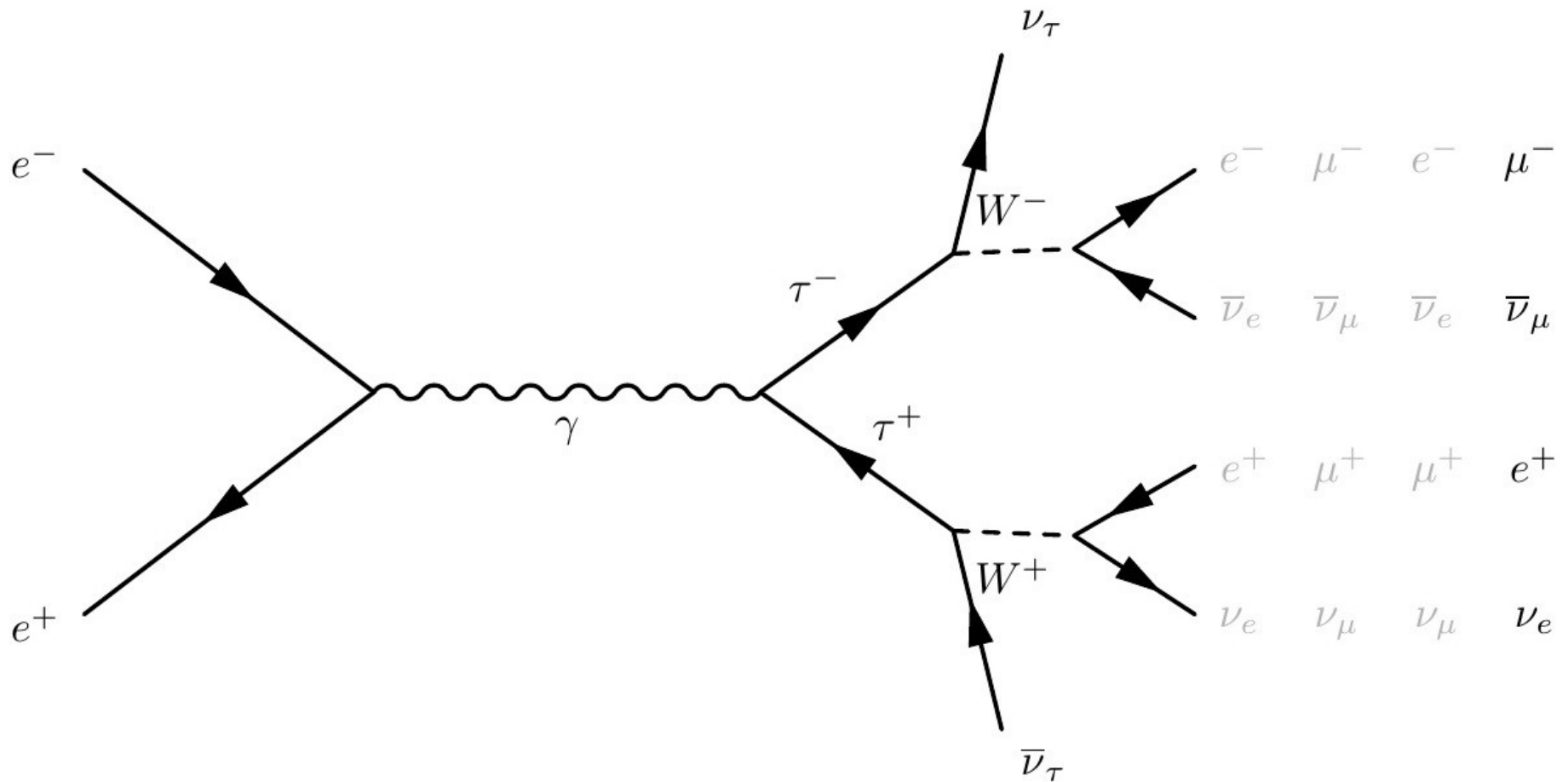
τ -Zerfall bei e^+e^- -Annihilation



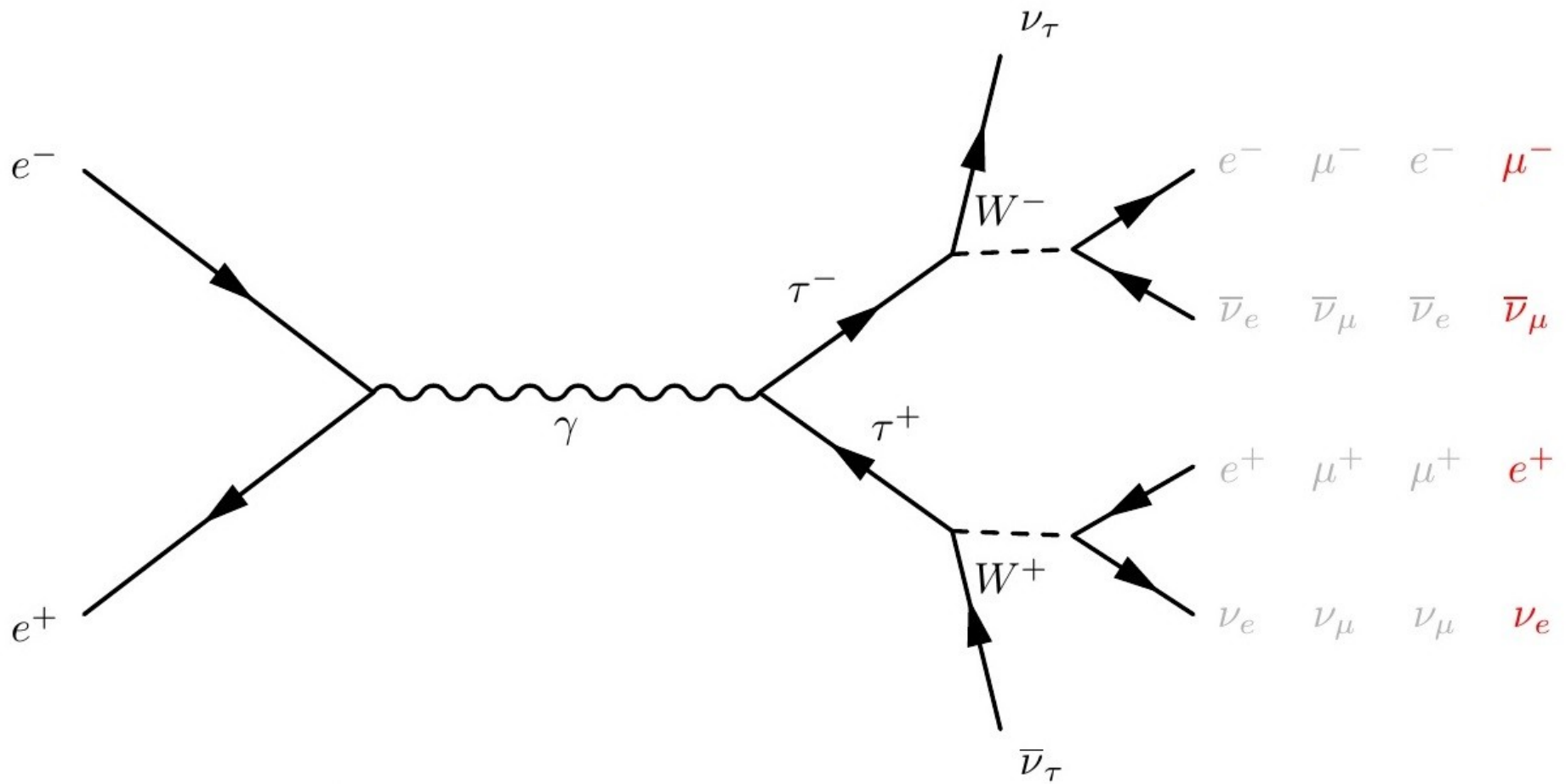
τ -Zerfall bei e^+e^- -Annihilation



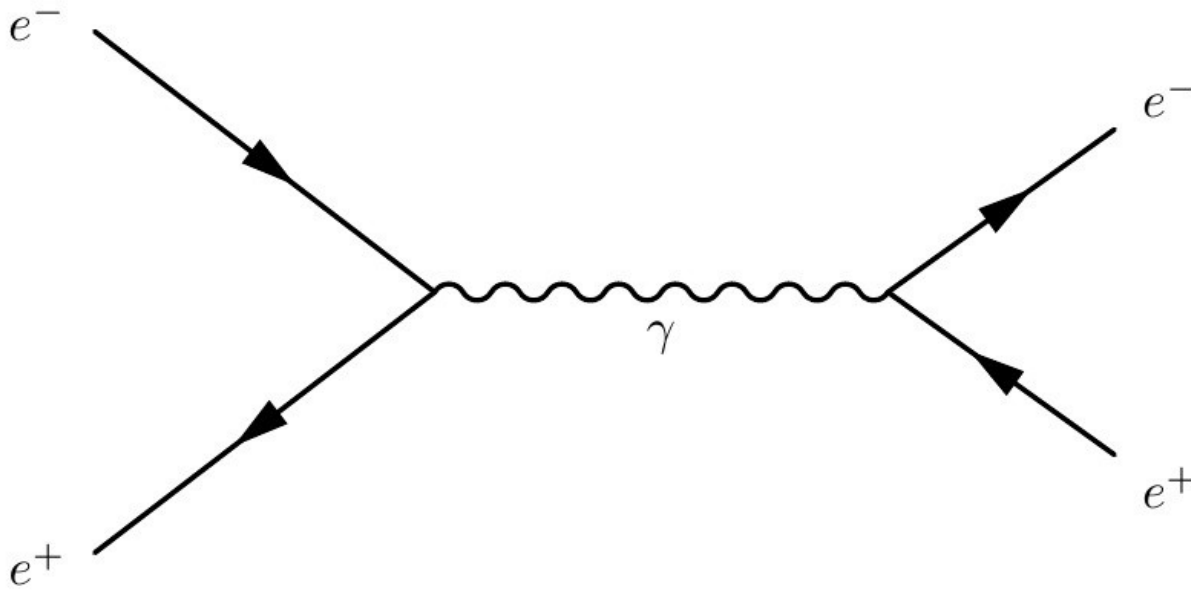
τ -Zerfall bei e^+e^- -Annihilation



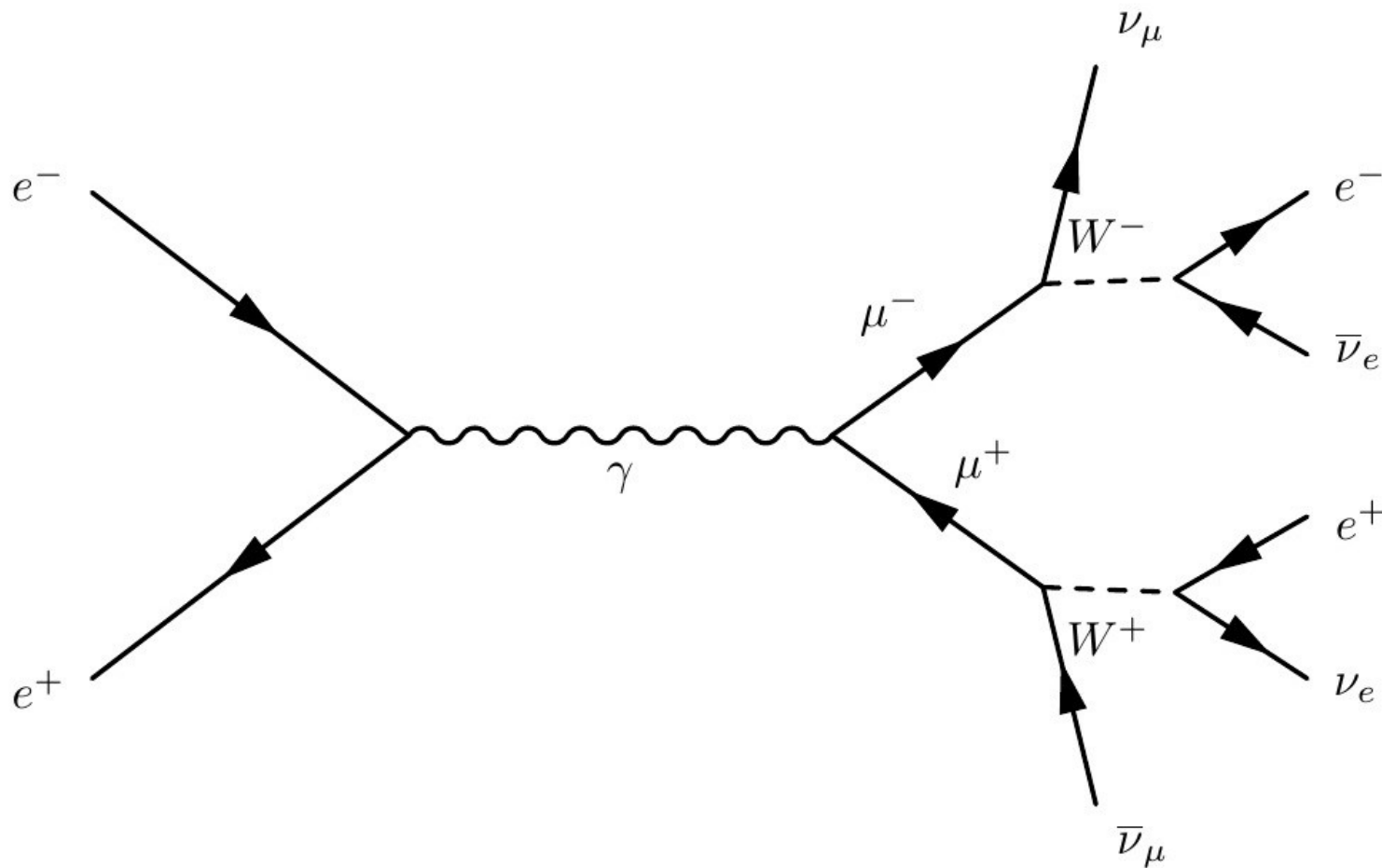
τ -Zerfall bei e^+e^- -Annihilation



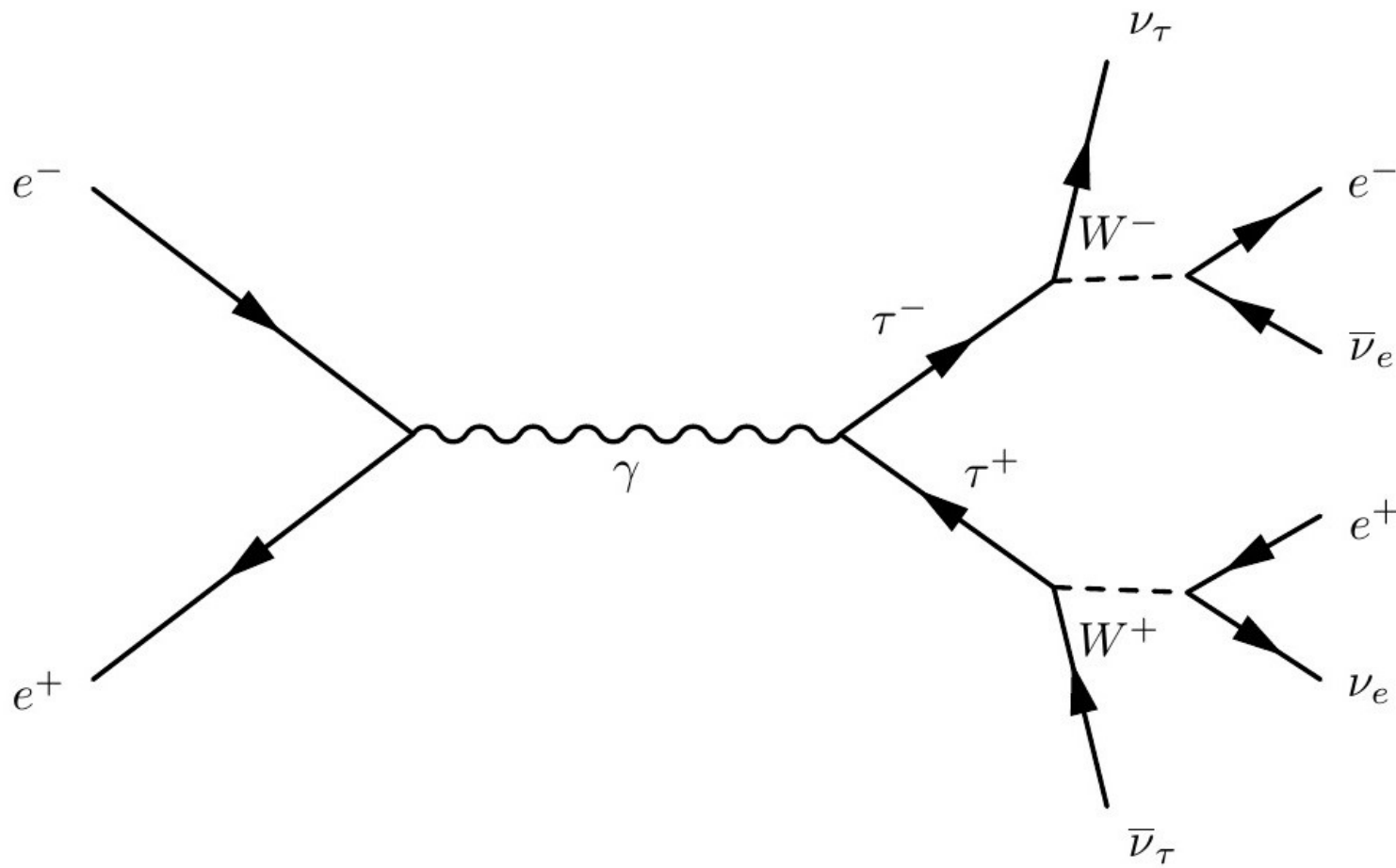
ee-Produktion bei e^+e^- -Annihilation



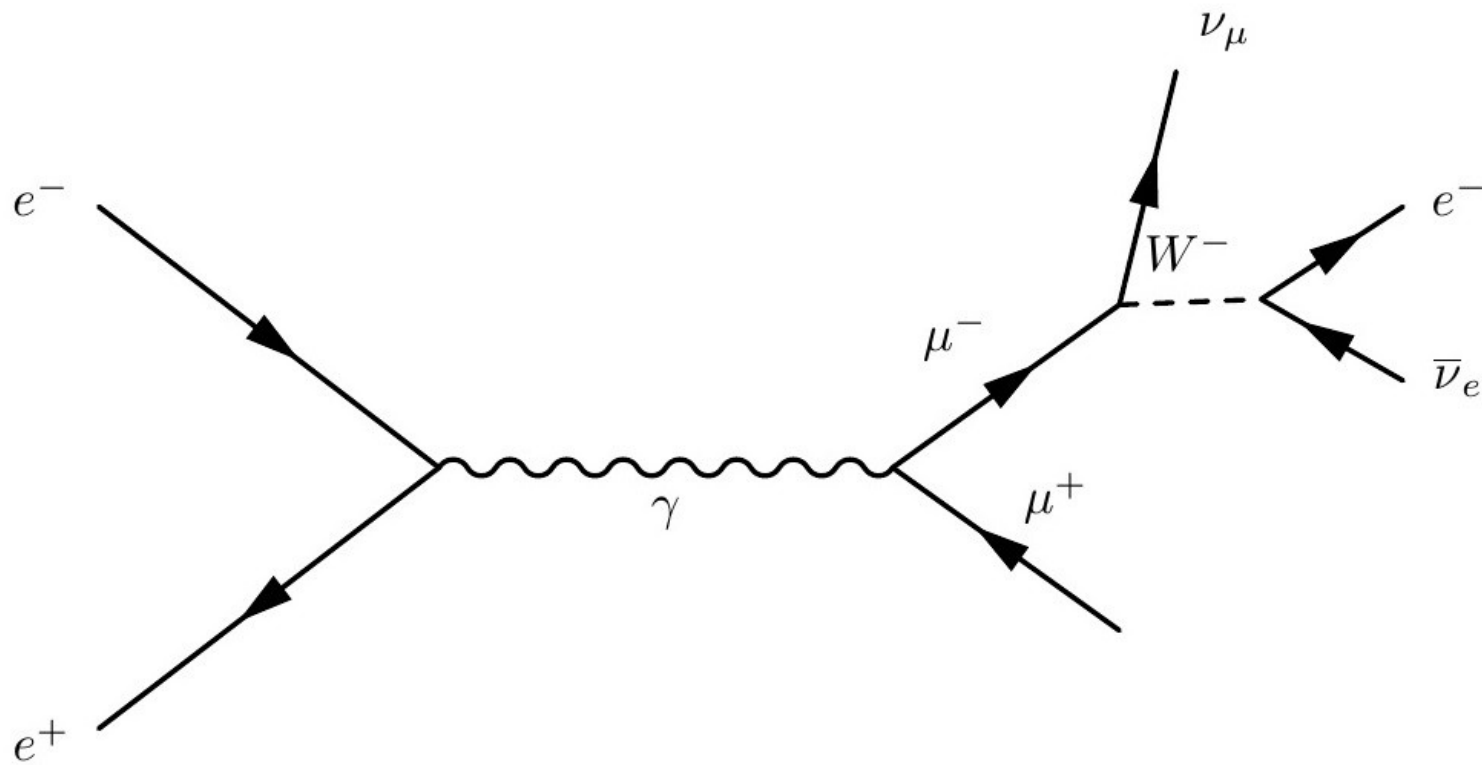
ee-Produktion bei e^+e^- -Annihilation



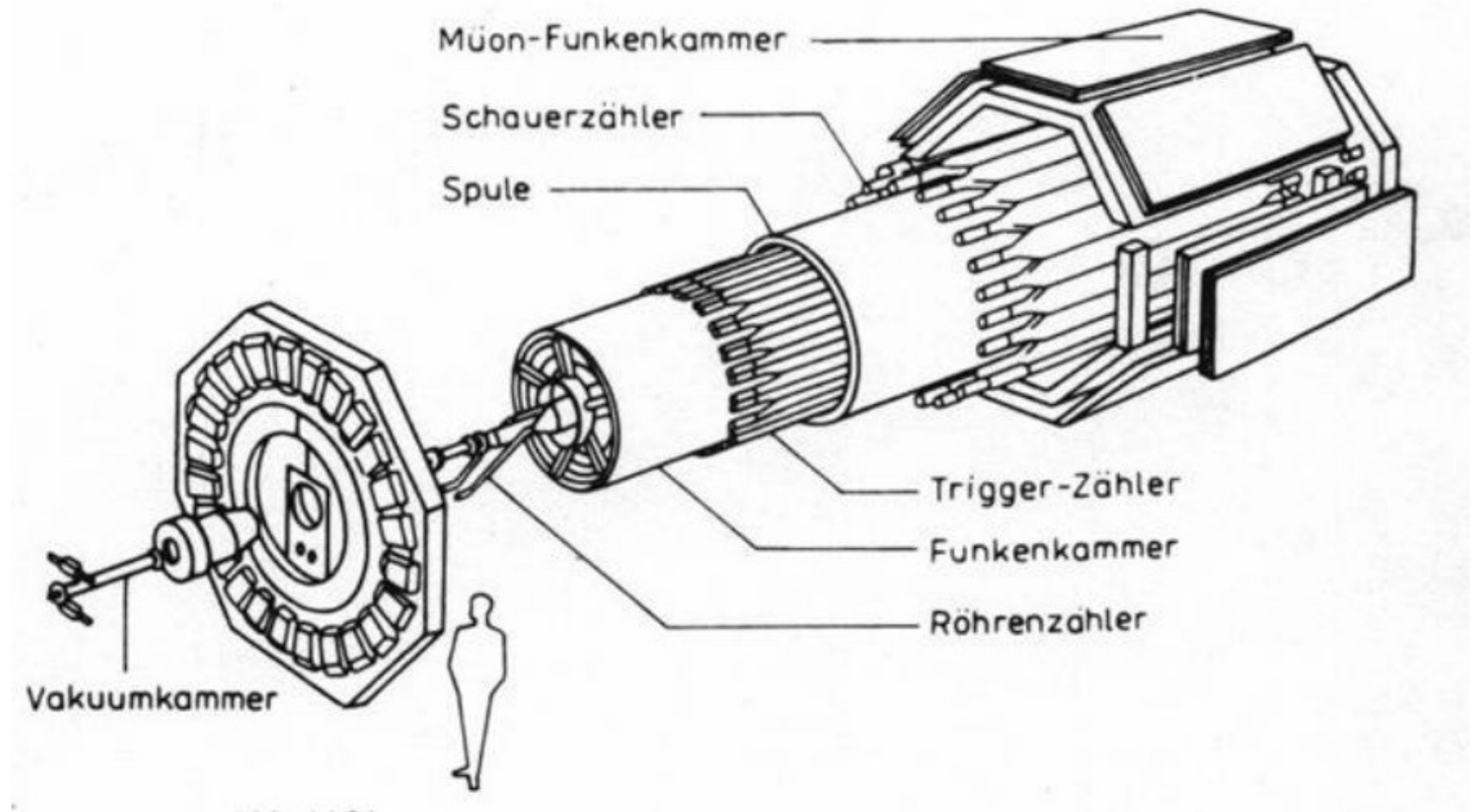
ee-Produktion bei e^+e^- -Annihilation



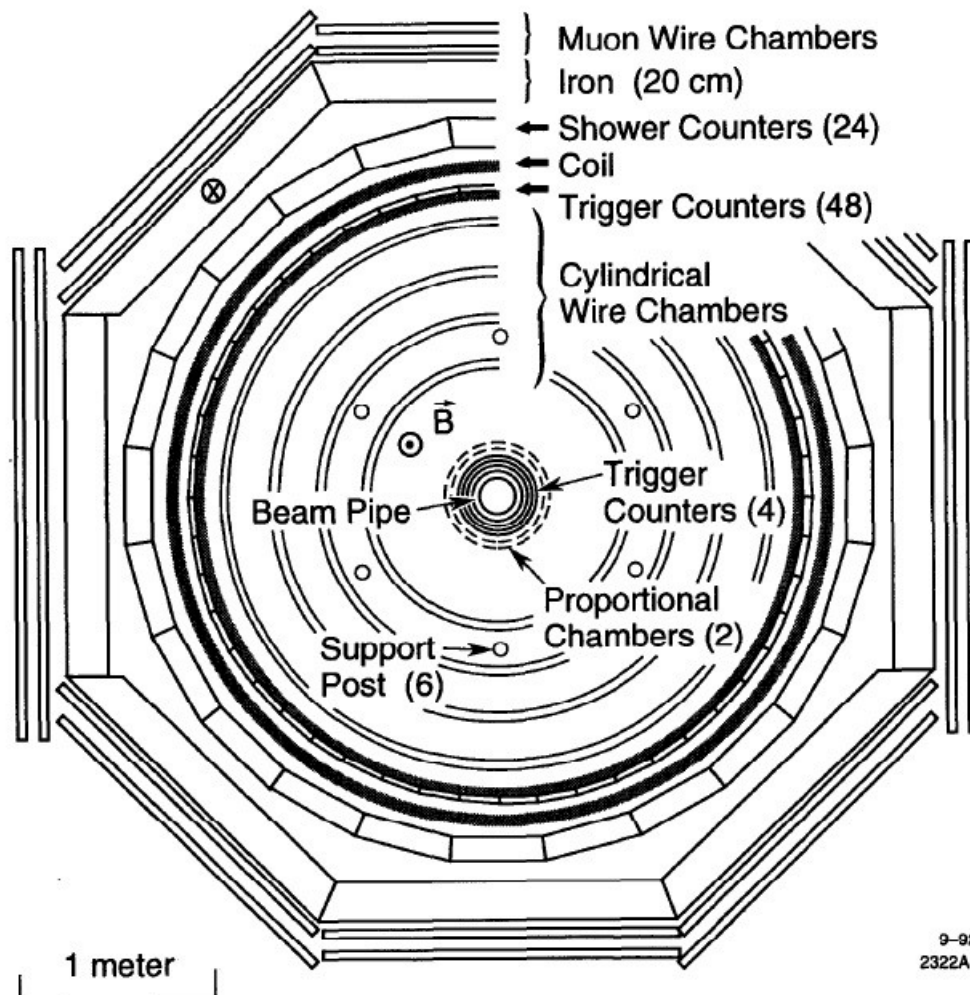
$e\mu$ -Produktion bei e^+e^- -Annihilation



Schlüsselexperiment 1975: Mark I Detector

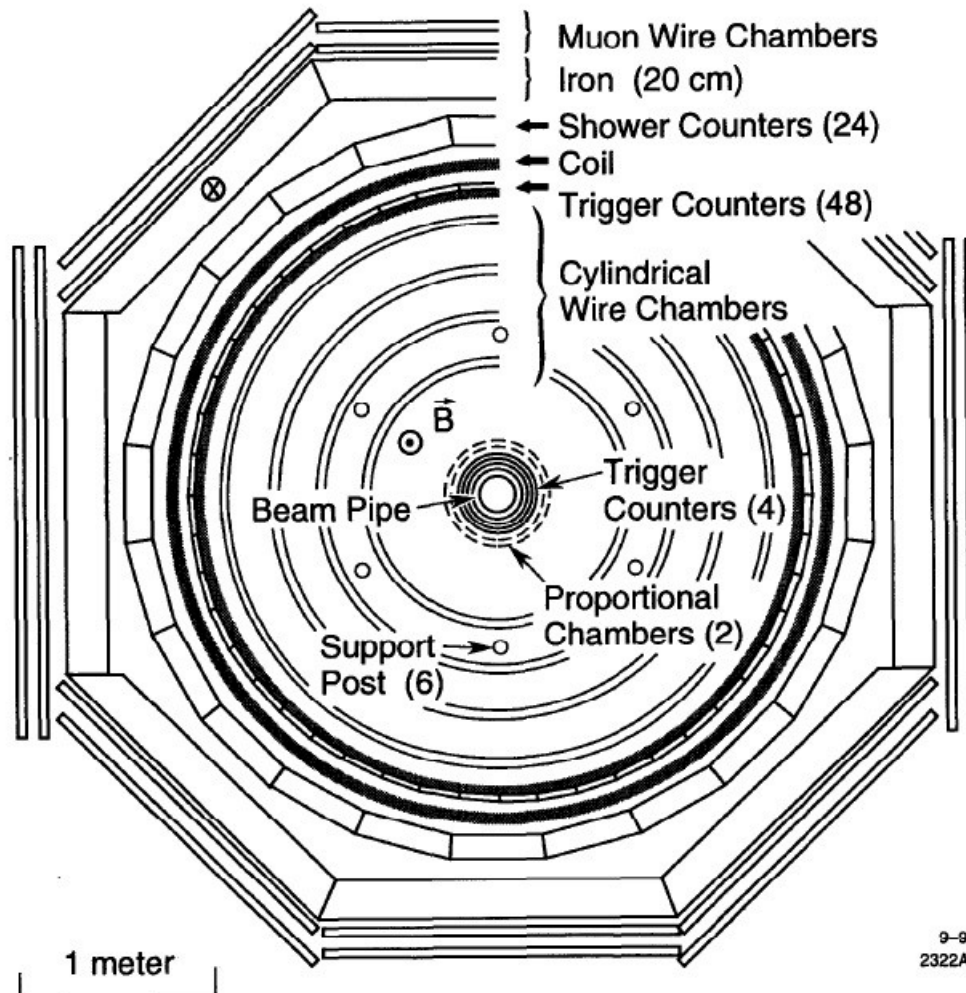


Schlüsselexperiment 1975: Mark I Detector



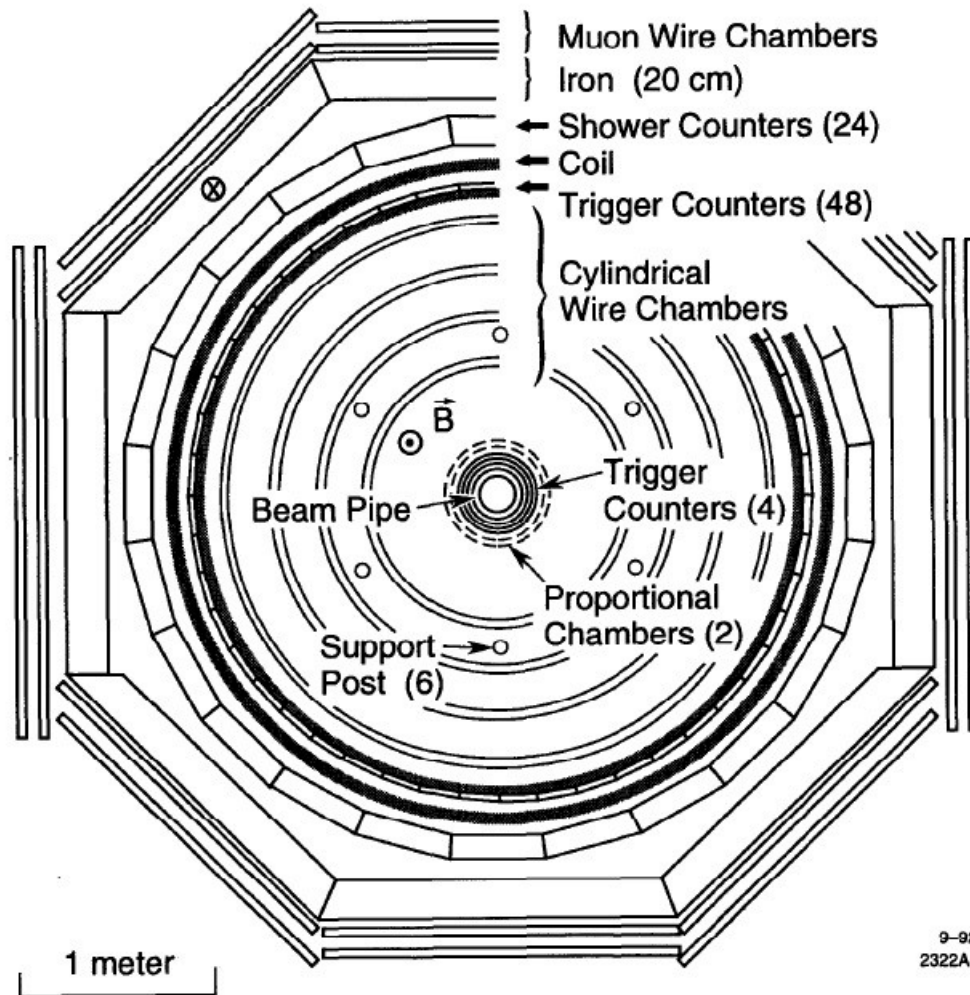
- Ursprünglicher Mark I Detektor
- „Erster 4π Detektor“
- Beschleuniger SLAC
- e^+e^- -Speicherring SPEAR
- Max Energie bei Beginn (1973): 4,8 GeV
- Durchgeführt durch Martin Lewis Perl

Schlüsselexperiment 1975: Mark I Detector



- Wire Chambers in B:
Krümmung der Bahnen
→ Impulse
- Trigger Counters:
Flugzeitmessung
→ Geschwindigkeit
- Shower Counters:
Energiebestimmung der
Elektronen, Myonen,
Hadronen (,Photonen)
- Muon Wire Chambers:
Detektiert Myonen
- Iron (20cm): Absorption
der Nicht-Myonen

Schlüsselexperiment 1975: Mark I Detector



Bedingungen zur
Detektion

- Elektronen: Signal in Shower Counter größer als Signal eines 0,5GeV-Elektron
→ kein Signal in MyonWC
- Myonen:
 1. Signal in MyonWC
 2. Kleines Signal im Shower Counter
- Hadronen: Alle anderen geladenen Teilchen

Ergebnisse des Experiments (1)

- „We have found 64 events of the form

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow e^{\pm} + \mu^{\mp} + \geq 2 \text{ undetected particles}$$

for which we have no conventional explanation.“

- „A possible explanation for these events is the production and decay of a pair of new particles, each having a mass in the range of 1.6 to 2.0 GeV/c²“

Ergebnisse des Experiments (2)

TABLE Distribution of 513 two-prong events, obtained at $E_{\text{c.m.}} = 4.8$ GeV, which meet the criteria $|\vec{p}_1| > 0.65$ GeV/c, $|\vec{p}_2| > 0.65$ GeV/c, and $\theta_{\text{copl}} > 20^\circ$. Events are classified according to the number N_γ of photons detected, the total charge, and the nature of the particles. All particles not identified as e or μ are called h for hadron.

Particles \ N_γ	Total charge = 0			Total charge = ± 2		
	0	1	> 1	0	1	> 1
$e-e$	40	111	55	0	1	0
$e-\mu$	24	8	8	0	0	3
$\mu-\mu$	16	15	6	0	0	0
$e-h$	20	21	32	2	3	3
$\mu-h$	17	14	31	4	0	5
$h-h$	14	10	30	10	4	6

- $e\mu$ -Hintergrund: $(4, 7 \pm 1, 2)$ Ereignisse

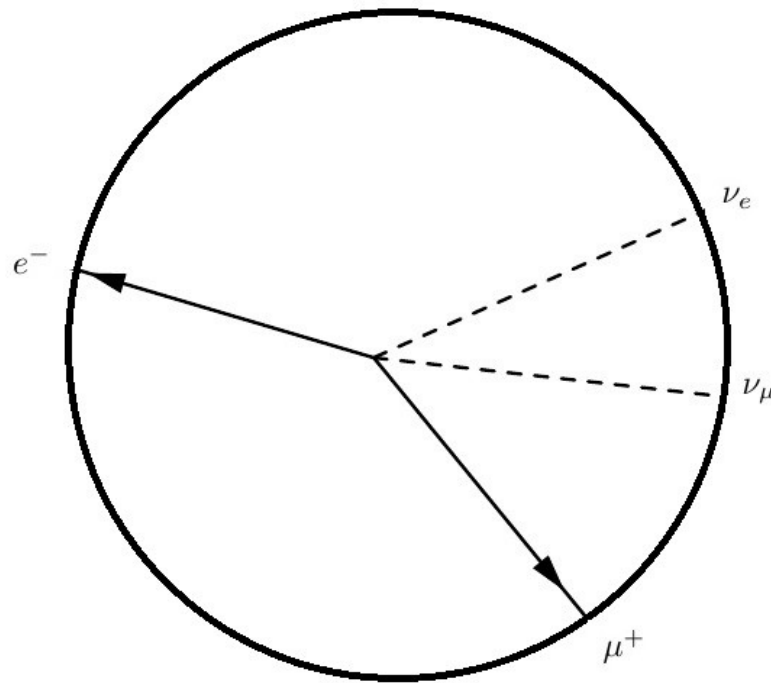
Ergebnisse des Experiments (2)

TABLE Distribution of 513 two-prong events, obtained at $E_{\text{c.m.}} = 4.8 \text{ GeV}$, which meet the criteria $|\vec{p}_1| > 0.65 \text{ GeV}/c$, $|\vec{p}_2| > 0.65 \text{ GeV}/c$, and $\theta_{\text{copl}} > 20^\circ$. Events are classified according to the number N_γ of photons detected, the total charge, and the nature of the particles. All particles not identified as e or μ are called h for hadron.

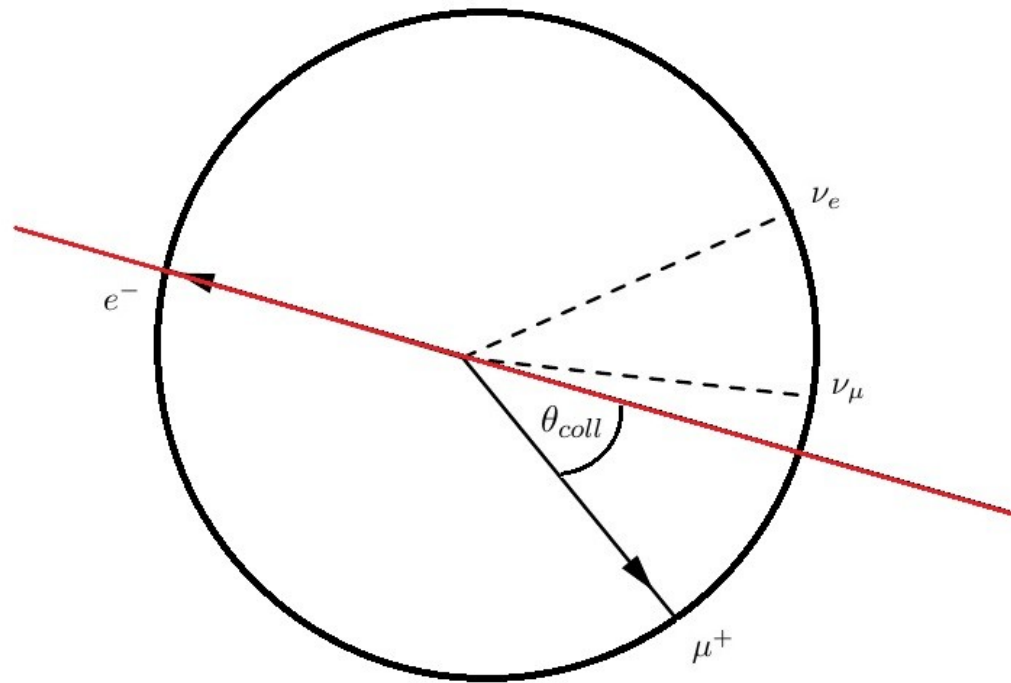
Particles \ N_γ	Total charge = 0			Total charge = ± 2		
	0	1	> 1	0	1	> 1
$e-e$	40	111	55	0	1	0
$e-\mu$	24	8	8	0	0	3
$\mu-\mu$	16	15	6	0	0	0
$e-h$	20	21	32	2	3	3
$\mu-h$	17	14	31	4	0	5
$h-h$	14	10	30	10	4	6

- $e\mu$ -Hintergrund: $(4, 7 \pm 1, 2)$ Ereignisse

Koplanaritätswinkel θ



Koplanaritätswinkel θ



Ergebnisse des Experiments (3)

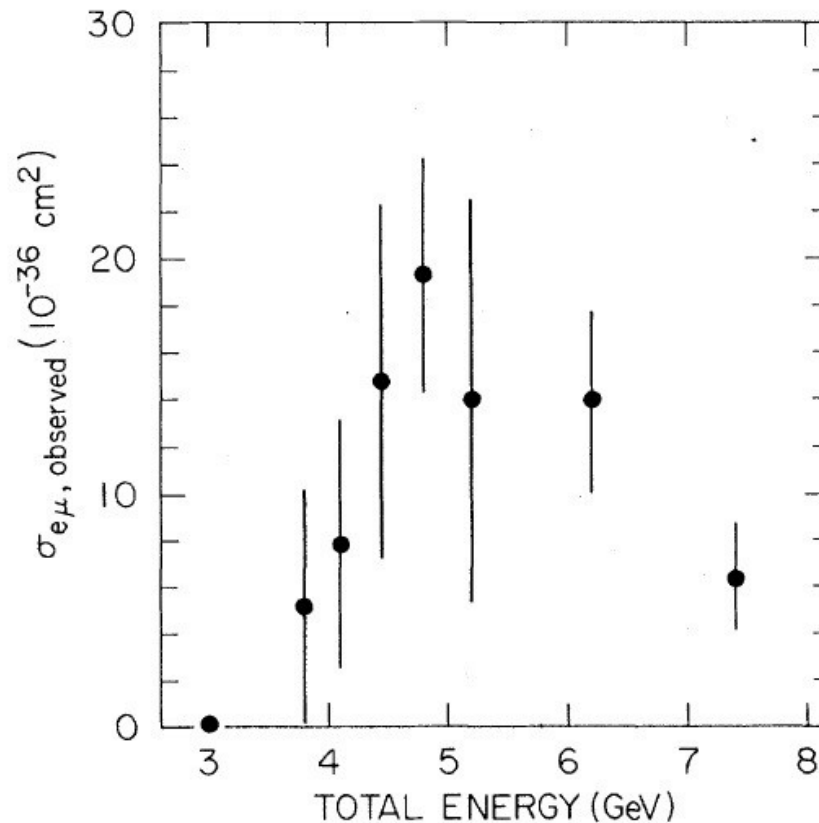
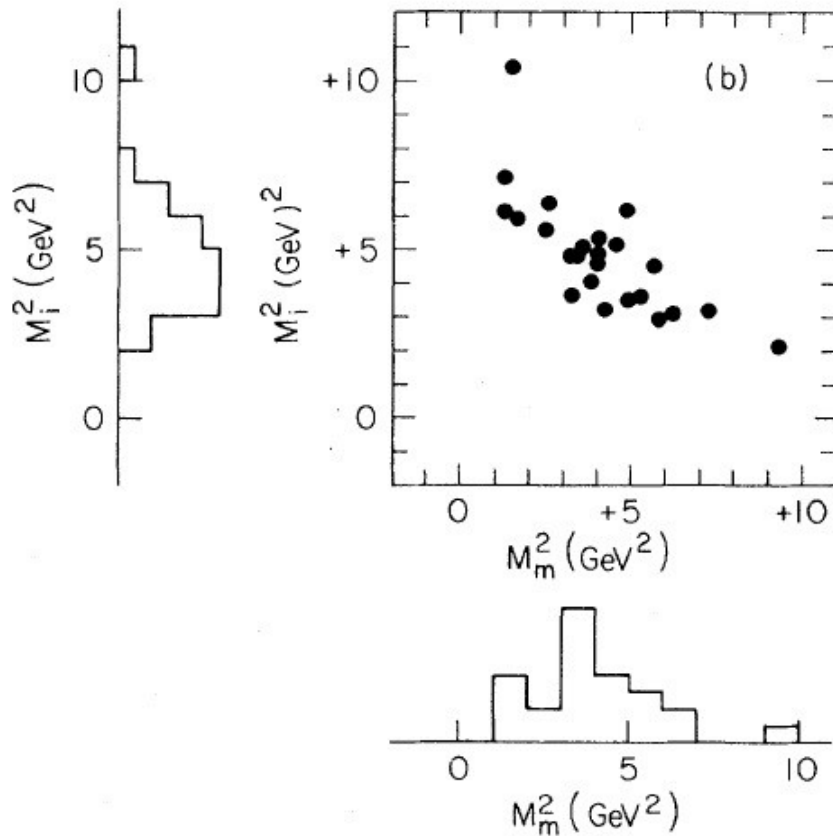


FIG. The *observed* cross section for the signature $e-\mu$ events.

- Insgesamt 86 $e\mu$ Ereignisse, 22 Hintergrundereignisse → 64 Ereignisse

Ergebnisse des Experiments (4)

- Signifikante e- μ -Ereignisse
- Quadrat der invarianten Masse aufgetragen gegen das Quadrat der fehlenden Masse



→ aus Diagramm kann geschlossen werden, dass **mind. 2 Teilchen unentdeckt** bleiben

M_{inv}^2 und M_{miss}^2 bei einem unentdeckten Teilchen

Impulserhaltung:

$$\vec{p}_e + \vec{p}_\mu + \vec{p}_\nu = \vec{p}_{\text{ges}} = 0$$

Energieerhaltung:

$$E_e + E_\mu + E_\nu = E_{\text{ges}}$$

Invariante Masse $e\mu$:

$$M_{\text{inv}}^2 = (E_e + E_\mu)^2 - (\vec{p}_e + \vec{p}_\mu)^2$$

Fehlende Masse:

$$\begin{aligned} M_{\text{miss}}^2 &= (E_{\text{ges}} - [E_e + E_\mu])^2 - (\vec{p}_{\text{ges}} - [\vec{p}_e + \vec{p}_\mu])^2 \\ &= E_\nu^2 - \vec{p}_\nu^2 = M_\nu^2 \end{aligned}$$

M_{inv}^2 und M_{miss}^2 bei zwei unentdeckten Teilchen

Impulserhaltung:

$$\vec{p}_e + \vec{p}_\mu + \vec{p}_{\nu_e} + \vec{p}_{\nu_\mu} = \vec{p}_{ges} = 0$$

Energieerhaltung:

$$E_e + E_\mu + E_{\nu_e} + E_{\nu_\mu} = E_{ges}$$

Invariante Masse $e\mu$:

$$M_{inv}^2 = (E_e + E_\mu)^2 - (\vec{p}_e + \vec{p}_\mu)^2$$

Fehlende Masse:

$$\begin{aligned} M_{miss}^2 &= (E_{ges} - [E_e + E_\mu])^2 - (\vec{p}_{ges} - [\vec{p}_e + \vec{p}_\mu])^2 \\ &= (E_{\nu_e} + E_{\nu_\mu})^2 - (\vec{p}_{\nu_e} + \vec{p}_{\nu_\mu})^2 \\ &= E_{\nu_e}^2 + E_{\nu_\mu}^2 + 2E_{\nu_e}E_{\nu_\mu} - \vec{p}_{\nu_e}^2 - \vec{p}_{\nu_\mu}^2 - 2\vec{p}_{\nu_e}\vec{p}_{\nu_\mu} \\ &= M_{\nu_e}^2 + M_{\nu_\mu}^2 + E_{\nu_e}E_{\nu_\mu} - 2\vec{p}_{\nu_e}\vec{p}_{\nu_\mu} \end{aligned}$$

M_{inv}^2 und M_{miss}^2 bei zwei unentdeckten Teilchen

Impulserhaltung:

$$\vec{p}_e + \vec{p}_\mu + \vec{p}_{\nu_e} + \vec{p}_{\nu_\mu} = \vec{p}_{ges} = 0$$

Energieerhaltung:

$$E_e + E_\mu + E_{\nu_e} + E_{\nu_\mu} = E_{ges}$$

Invariante Masse $e\mu$:

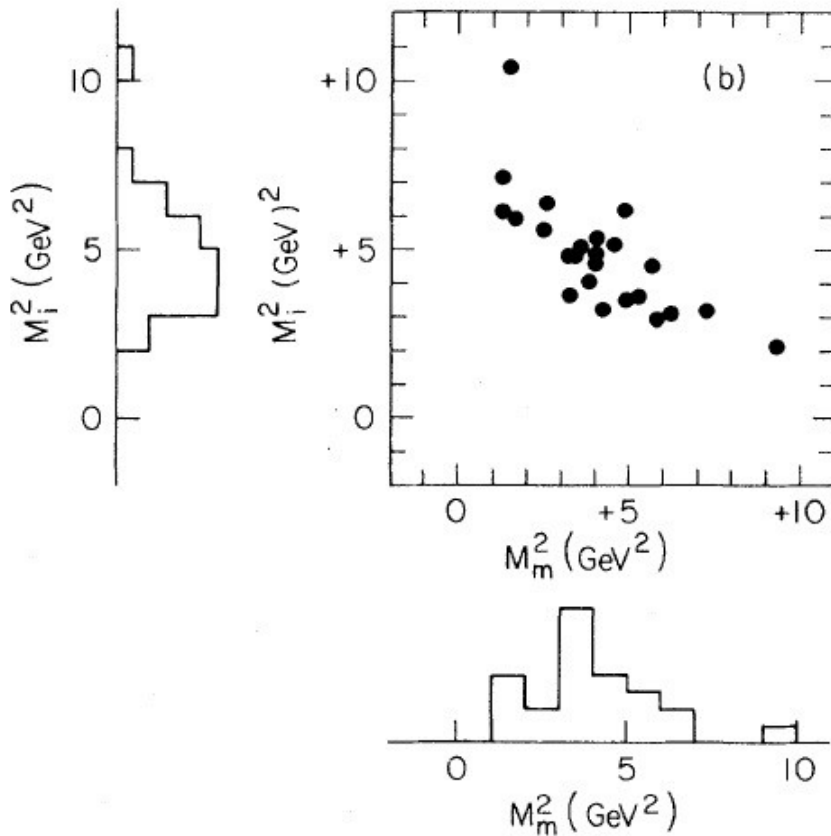
$$M_{inv}^2 = (E_e + E_\mu)^2 - (\vec{p}_e + \vec{p}_\mu)^2$$

Fehlende Masse:

$$\begin{aligned} M_{miss}^2 &= (E_{ges} - [E_e + E_\mu])^2 - (\vec{p}_{ges} - [\vec{p}_e + \vec{p}_\mu])^2 \\ &= (E_{\nu_e} + E_{\nu_\mu})^2 - (\vec{p}_{\nu_e} + \vec{p}_{\nu_\mu})^2 \\ &= E_{\nu_e}^2 + E_{\nu_\mu}^2 + 2E_{\nu_e}E_{\nu_\mu} - \vec{p}_{\nu_e}^2 - \vec{p}_{\nu_\mu}^2 - 2\vec{p}_{\nu_e}\vec{p}_{\nu_\mu} \\ &= M_{\nu_e}^2 + M_{\nu_\mu}^2 + E_{\nu_e}E_{\nu_\mu} - 2\vec{p}_{\nu_e}\vec{p}_{\nu_\mu} \end{aligned}$$

Ergebnisse des Experiments (4)

- Signifikante e- μ -Ereignisse
- Quadrat der invarianten Masse aufgetragen gegen das Quadrat der fehlenden Masse
→ aus Diagramm kann geschlossen werden, dass **mind. 2 Teilchen unentdeckt** bleiben



Ergebnisse des Experiments (5)

“Misidentification probabilities for 4.8 GeV sample”

Momentum range (GeV/c)	$P_{h \rightarrow e}$	$P_{h \rightarrow \mu}$	$P_{h \rightarrow h}$
0.6– 0.9	.130 $\pm$.005	.161 $\pm$.006	.709 $\pm$.012
0.9–1.2	.160 $\pm$.009	.213 $\pm$.011	.627 $\pm$.020
1.2– 1.6	.206 $\pm$.016	.216 $\pm$.017	.578 $\pm$.029
1.6– 2.4	.269 $\pm$.031	.211 $\pm$.027	.520 $\pm$.043
Weighted average using hh, μ h, and $e\mu$ events	.183 $\pm$.007	.198 $\pm$.007	.619 $\pm$.012

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Signifikante $e\mu$ -Anomalie bei e^+e^- -Annihilation bei 4,8 GeV
- Mögliche ee - und $\mu\mu$ -Anomalie wird noch weiter untersucht
- Mind. 2 Neutrinos unentdeckt
- Hohe Missidentifikation der Teilchen
- Dennoch:
 - Ergebnisse können dadurch erklärt werden, dass ein schweres Lepton mit $m=1,6-2,0\text{ GeV}/c^2$ erzeugt wird und zerfällt

Nach dem Experiment: Einwände

- Sowohl Charm-Quark (Entdeckung 1974) als auch τ -Lepton im selben Energie-Bereich gefunden
- Keine (theoretische) Notwendigkeit eines dritten geladenen Leptons
- Keine Hinweise auf eine dritte Teilchengeneration

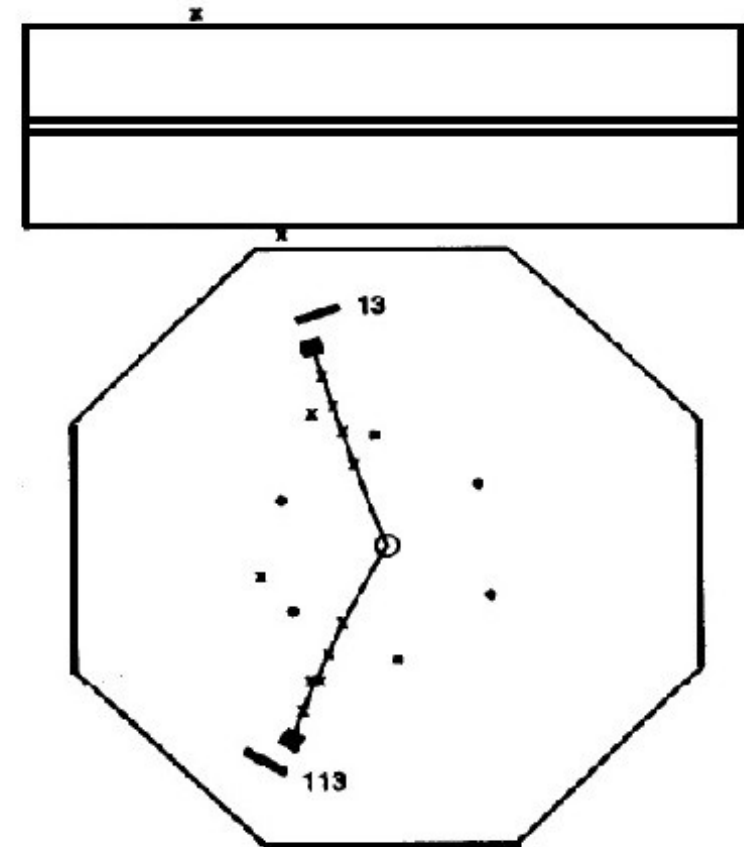
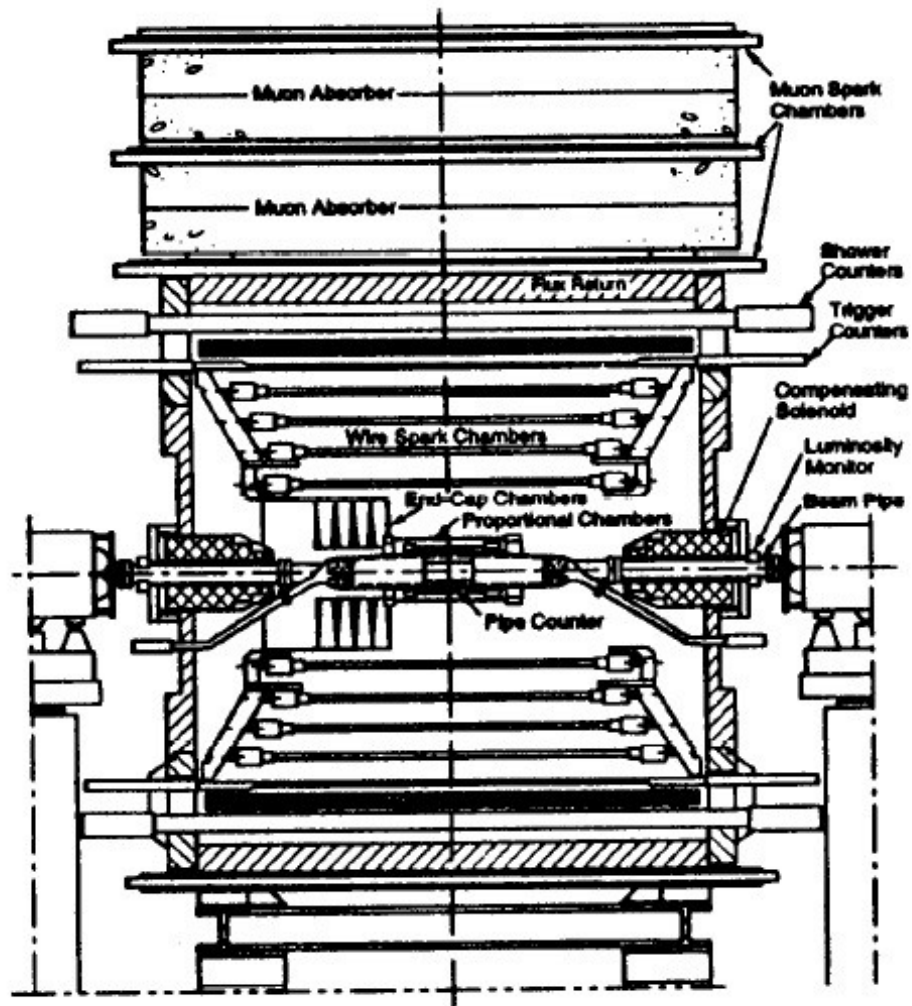
Nach dem Experiment: weitere Ziele

- 1. Gefundene $e\mu$ -Anomalie bestätigen
- 2. Myonen besser detektieren: „Muon-Tower“
- 3. Weitere Zerfallskanäle beobachten (Hadronenzerfälle)

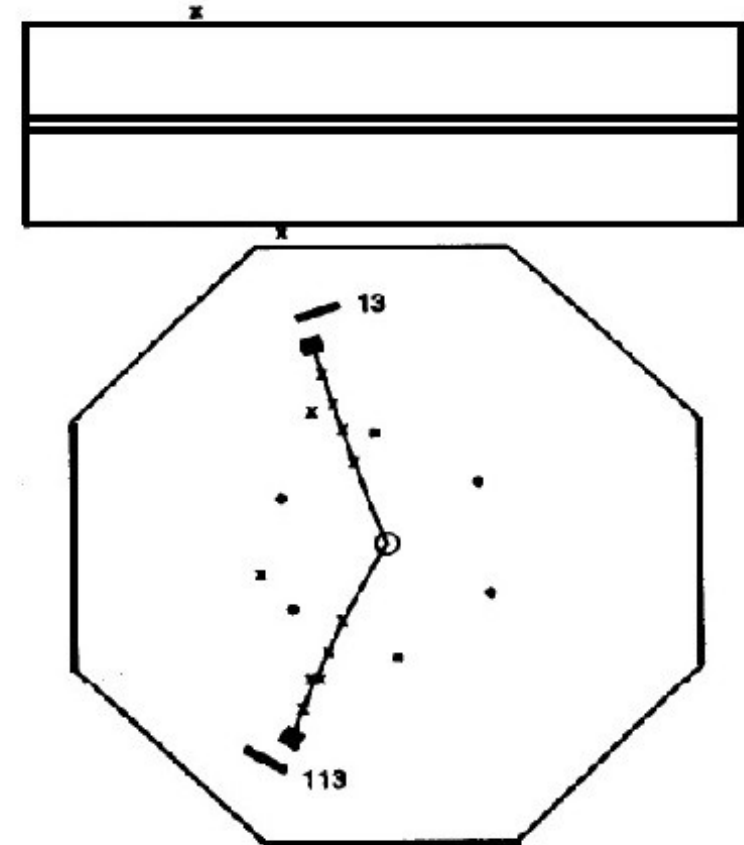
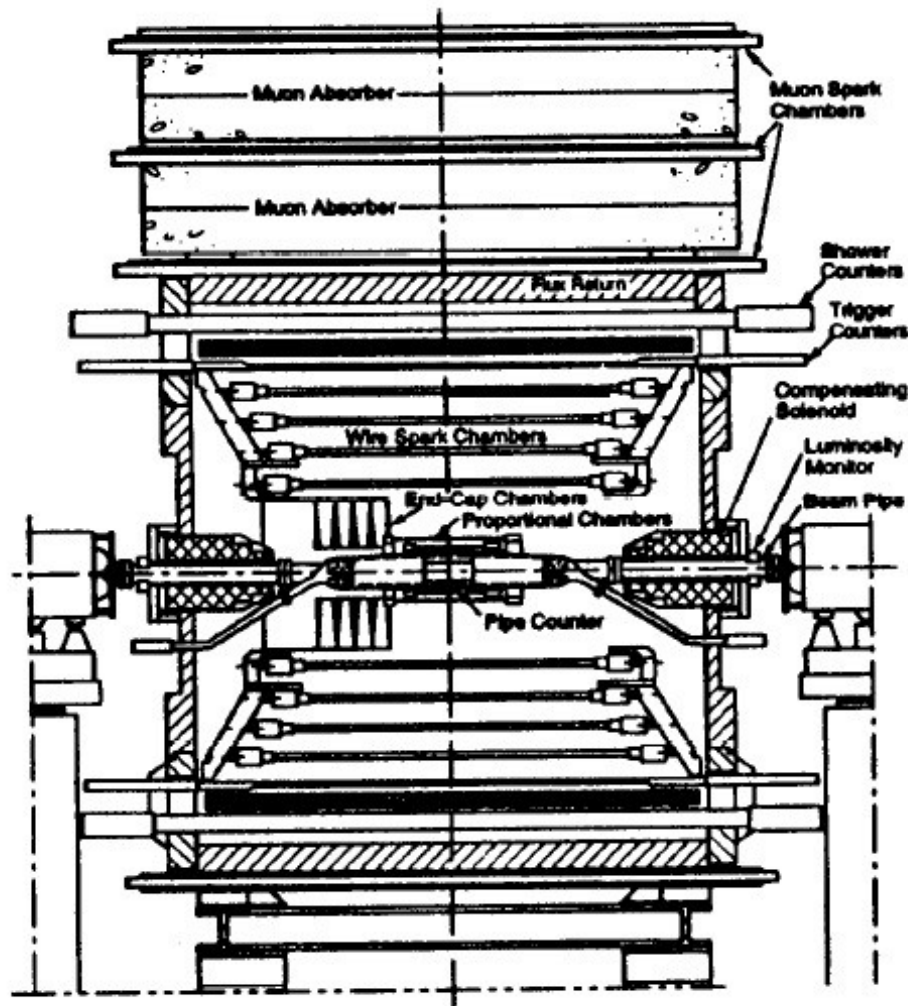
1. $e\mu$ -Anomalie

- 1976: weiteres Experiment am SPEAR bestätigt Anomalie (Cavalli-Sforza et al.)
- 1977: weitere Messungen mit dem Mark I Detektor (mit Muon-Tower) bestätigen Anomalie (Feldman et al.)
- 1977: Messungen am DORIS e^+e^- -Speicherring der PLUTO-Kollaboration bestätigen Anomalie (Burmester et al.)

2. „Muon-Tower“ (1)



2. „Muon-Tower“ (1)



- Muon-Tower nur an einer Seite
→ eingeschränkte Statistik

„Muon-Tower“ (2)

- „In summary, we have observed a large rate of anomalous muon production in two-prong events consistent with what is expected from heavy-lepton decays.“ (Feldman et al., 1977)

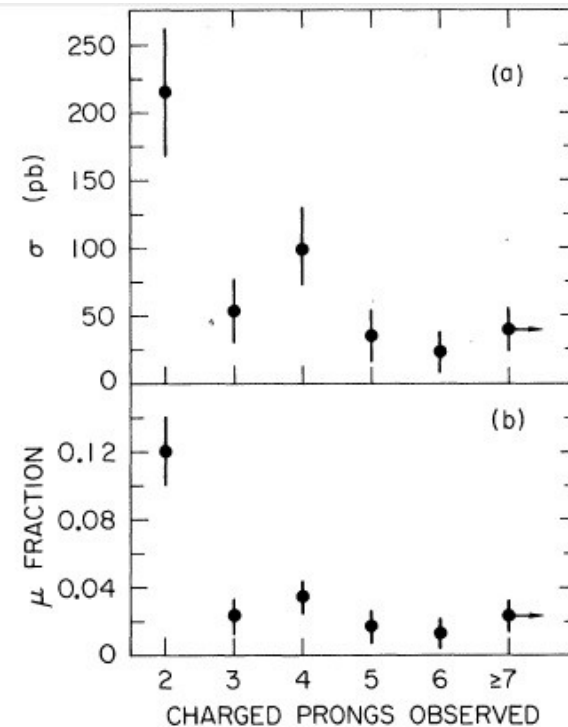


FIG. 3. (a) Anomalous muon-production cross section and (b) ratio of anomalous muons to candidates vs the number of observed charged prongs in the $E_{c.m.}$ range from 5.8 to 7.8 GeV. Note that the two-prong cross section is not corrected for a coplanarity cut and is thus artificially suppressed relative to multiprong cross sections. In calculating the two-prong μ fraction, the number of candidates has been corrected to eliminate leptonic reactions.

3. Untersuchung der Hadronenzerfälle (1)

- Vage theoretische Analyse liefert für die Verzweungsverhältnisse (branching fractions):

$$B(\tau^- \longrightarrow \nu_\tau + e^- + \bar{\nu}_e) \approx 20\%$$

$$B(\tau^- \longrightarrow \nu_\tau + \mu^- + \bar{\nu}_\mu) \approx 20\%$$

$$B(\tau^- \longrightarrow \nu_\tau + \textit{Hadronen}) \approx 60\%$$

- (Die Ähnlichkeit des Zerfalls in Elektron oder Myon beruht auf der Leptonen-Universalität)

Mögliche Hadronenzerfälle

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \pi^0 + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow 2\pi^- + \pi^+ + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + 2\pi^0 + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow 2\pi^- + \pi^+ + \pi^0 + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow K^{*}(892)^- + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \pi^- + 3\pi^0 + \nu_\tau$$

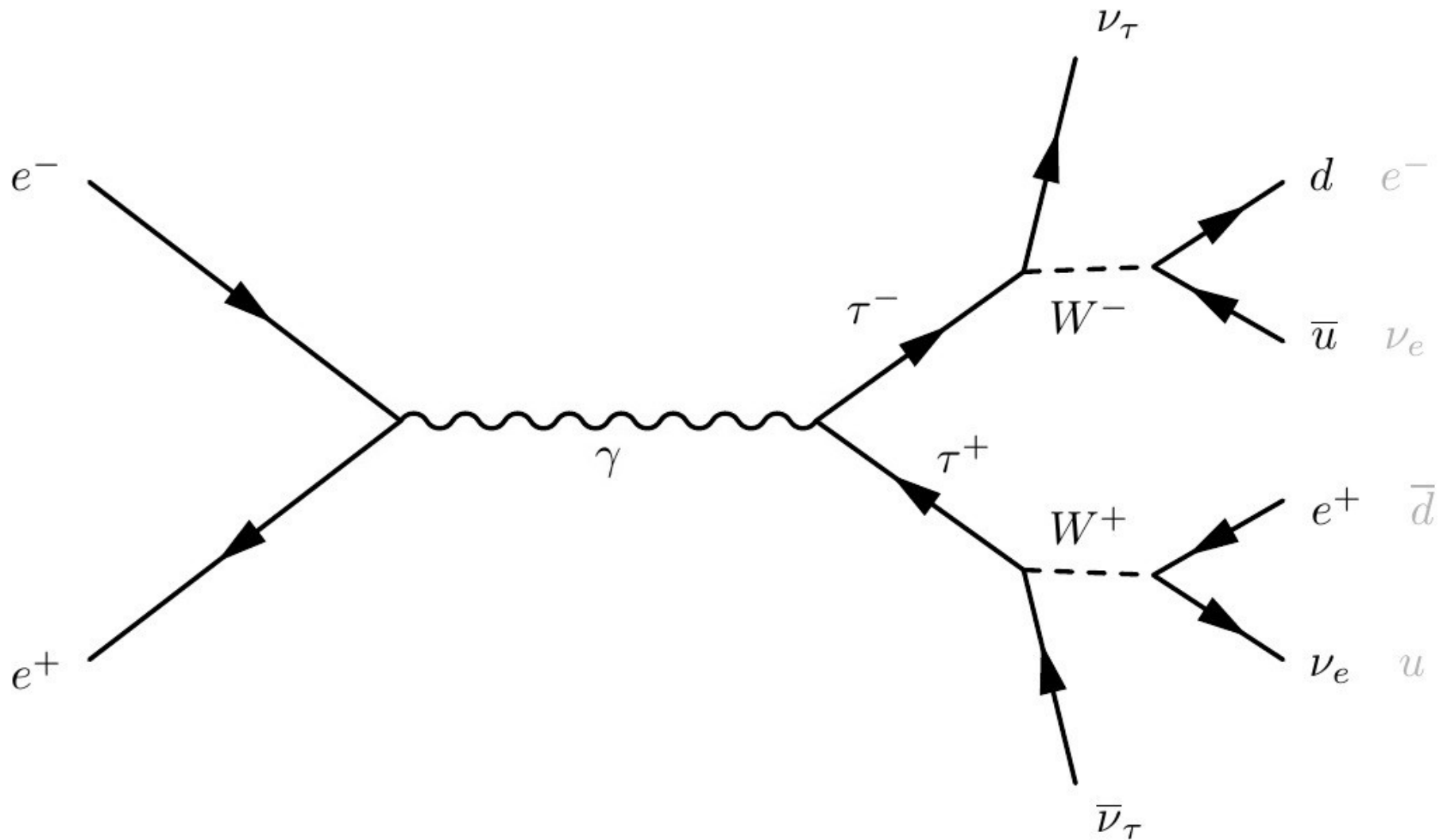
$$\tau^- \rightarrow \pi^- + \bar{K}^0 + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow K^- + \nu_\tau$$

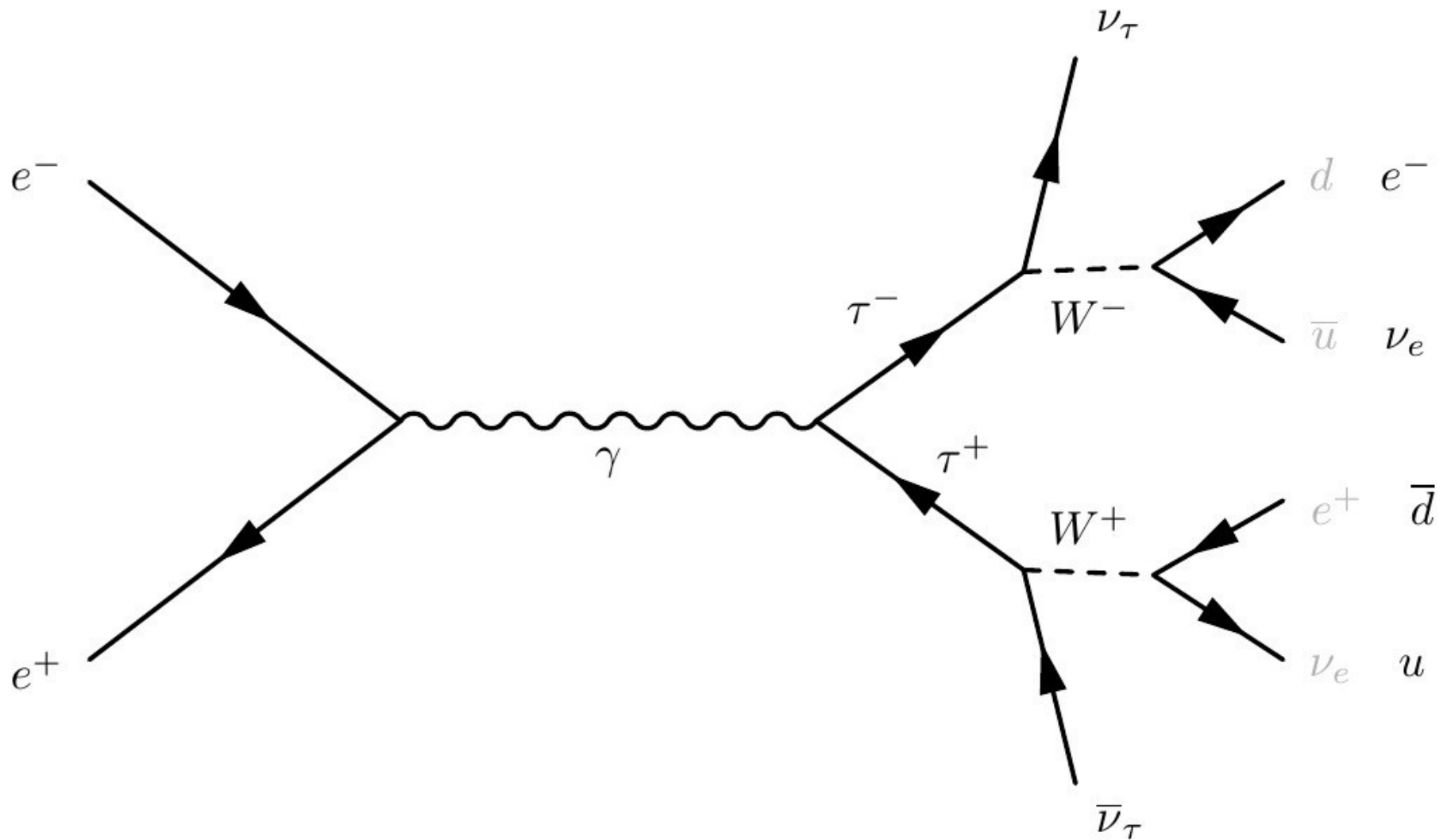
Man beobachtet Zerfälle
der Form:

$$e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen(neg/pos)} + \\ + e^\pm + \text{Neutrinos}$$

Beispiel: Zerfall in e^+ und π^-



Beispiel: Zerfall in e^- und π^+



Untersuchung der Hadronenzerfälle (2)

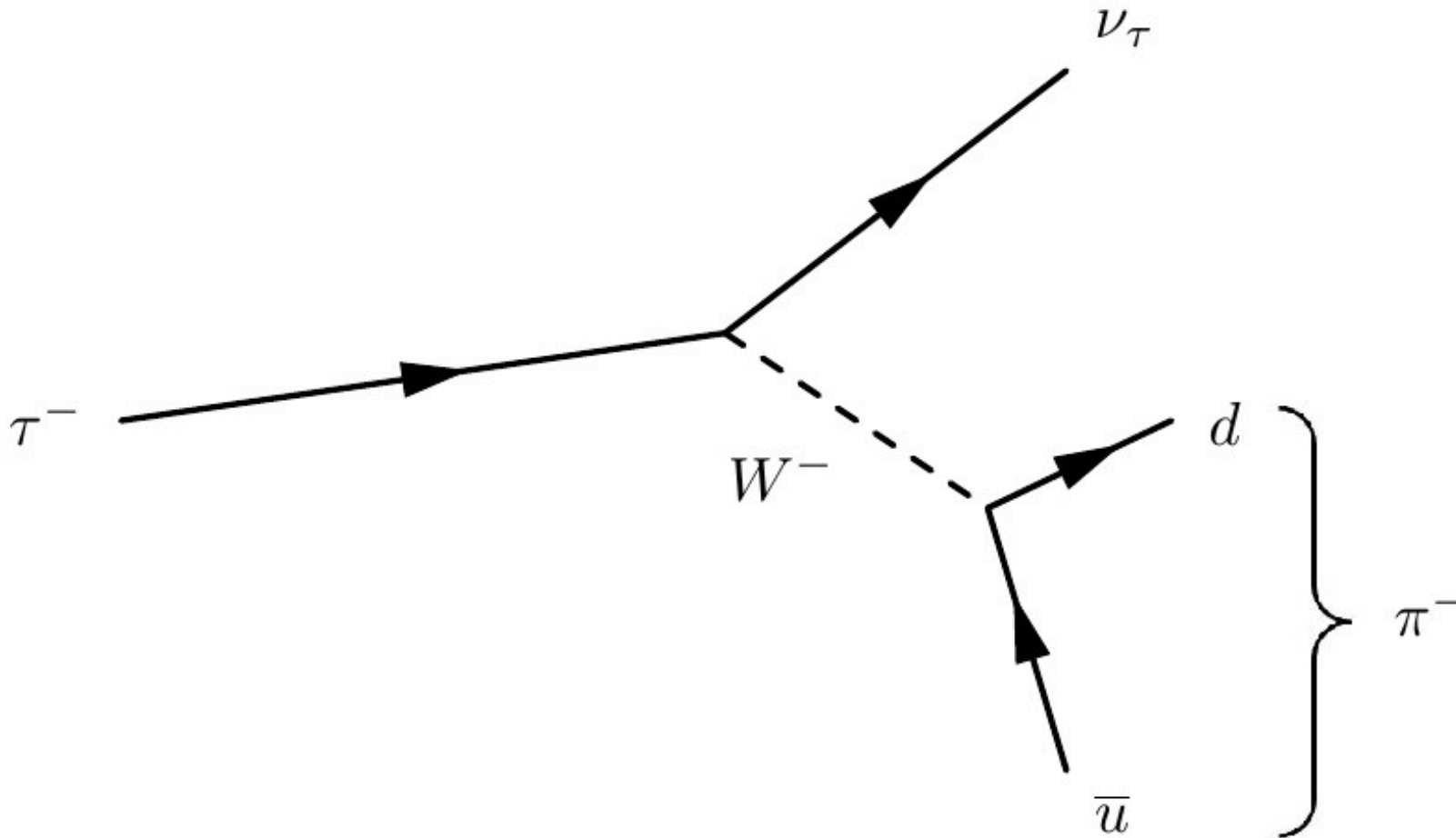
- Elektron/Positron muss genau bestimmt werden
- Notwendig: verbesserte elektronische Identifikation in den Detektoren
- Photonen müssen genauer bestimmt werden, da einige Teilchen (bspw. das π^0) in Photonen zerfallen

Review 1977 (Perl)

- 1. Alle Messwerte der anomalen $e\mu$, $e\chi$, ee und $\mu\mu$ Ereignisse (produziert in ee -Annihilation) stimmt mit der Existenz eines geladenen Leptons (τ) der Masse $1,9 \pm 0,1 \text{ GeV}/c^2$ überein
- 2. Messwerte können nicht durch Zerfälle des Charm-Quarks erklärt werden
- 3. Viele erwartete Zerfälle wurden bereits gesehen. **Noch nicht beobachtet:**

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \pi^-$$

Zerfall des τ -Leptons in Neutrino und π^- (1)



Zerfall des τ -Leptons in Neutrino und Pion (2)

- $\tau^- \rightarrow \nu_{\tau} + \pi^-$

- Schwer zu unterscheiden vom Zerfall

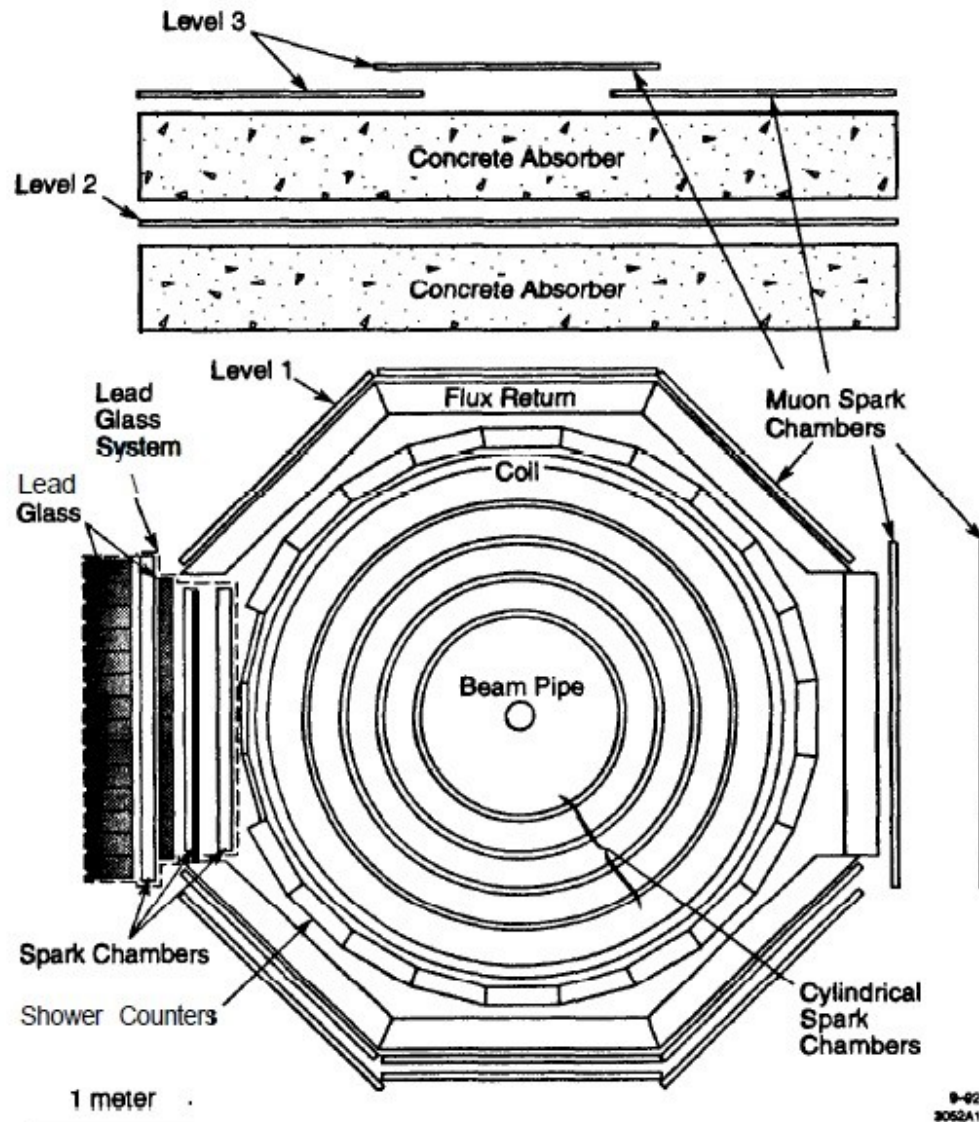
$$\tau^- \rightarrow \nu_{\tau} + \pi^- + \pi^0$$

- Bessere Photonendetektion ermöglicht eine Unterscheidung

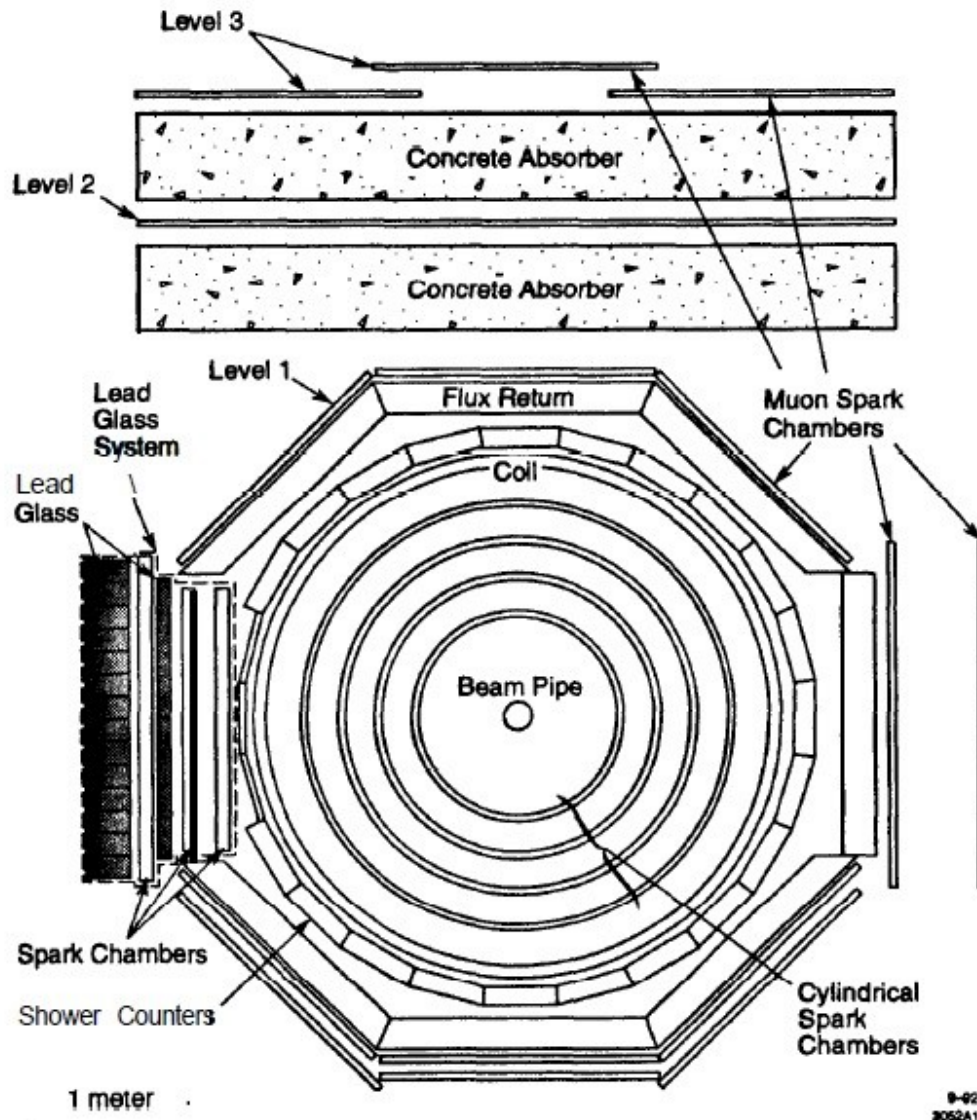
→ Verbesserung des Detektors Mark I und Bau neuer Teilchendetektoren wie Mark II

- Bessere Elektronvermessung: DELCO-Detektor am SPEAR (Direct Electron Production Measurement) (1977)

Mark I mit Bleiglas-Wänden



Mark I mit Bleiglas-Wänden



- Bleiglas ermöglicht bessere Photonendetektion
- Bleiglas ersetzt 3 Shower Counters
- π^0 zerfällt in 2 Photonen und kann identifiziert werden
- Detektion aller Photonen notwendig
→ 4π Detektor

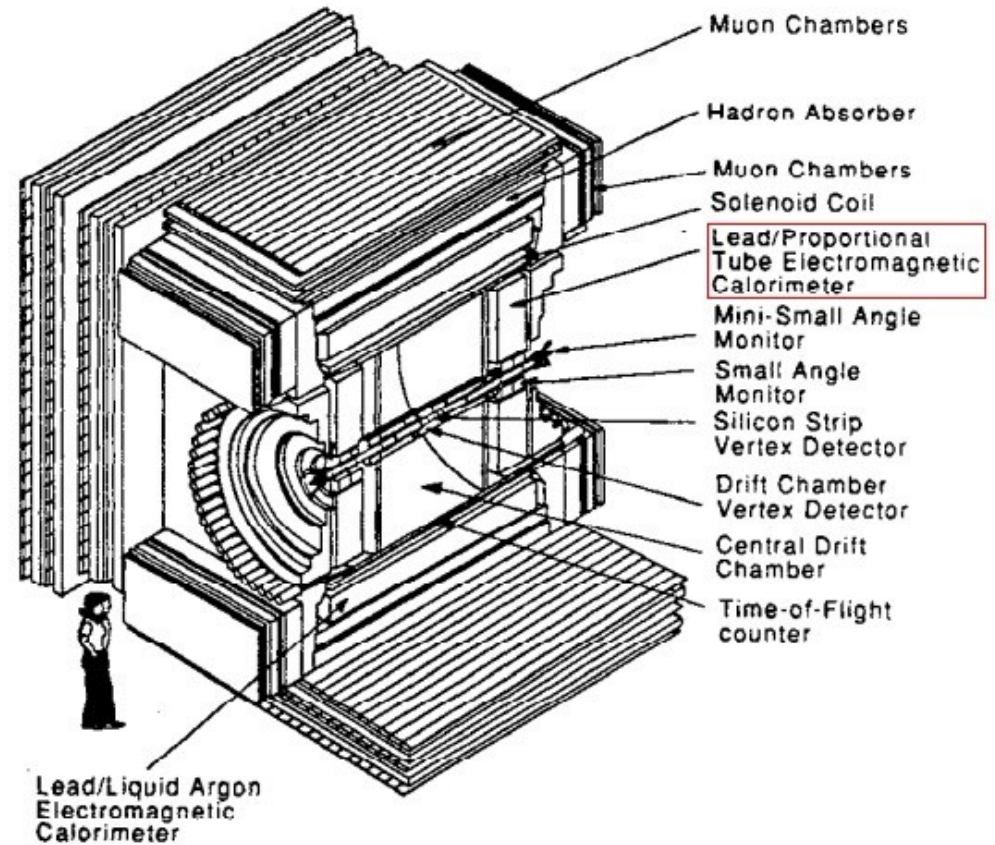
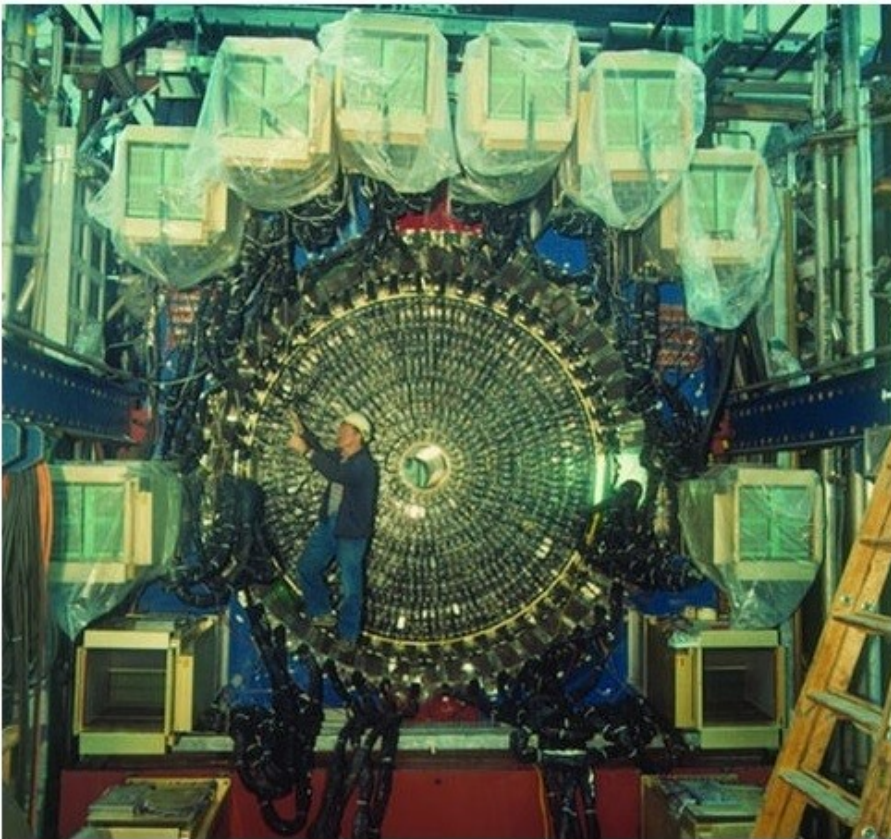
Messungen mit dem Mark I Detektor

- 1977: Messungen mit dem verbesserten Mark I Detektor (Barbaro-Galtieri et al.)
- Gemessene Verzweigungsverhältnisse:

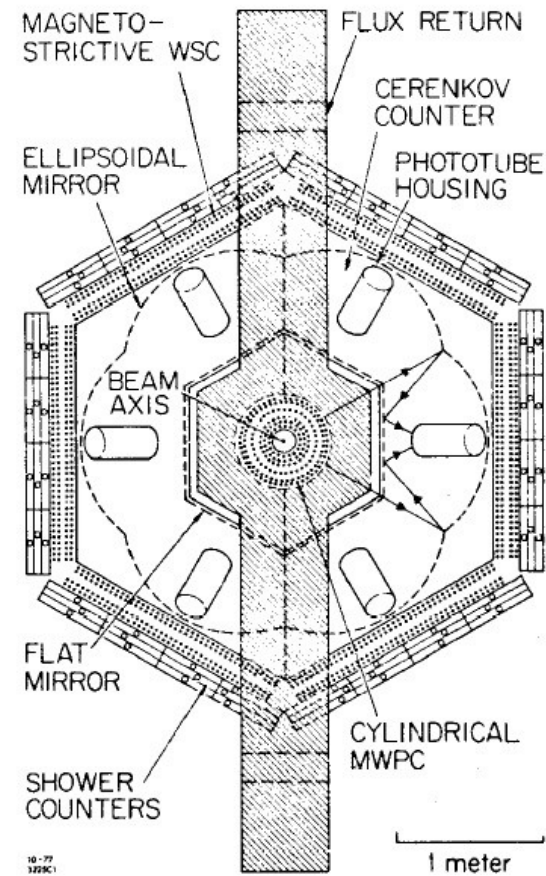
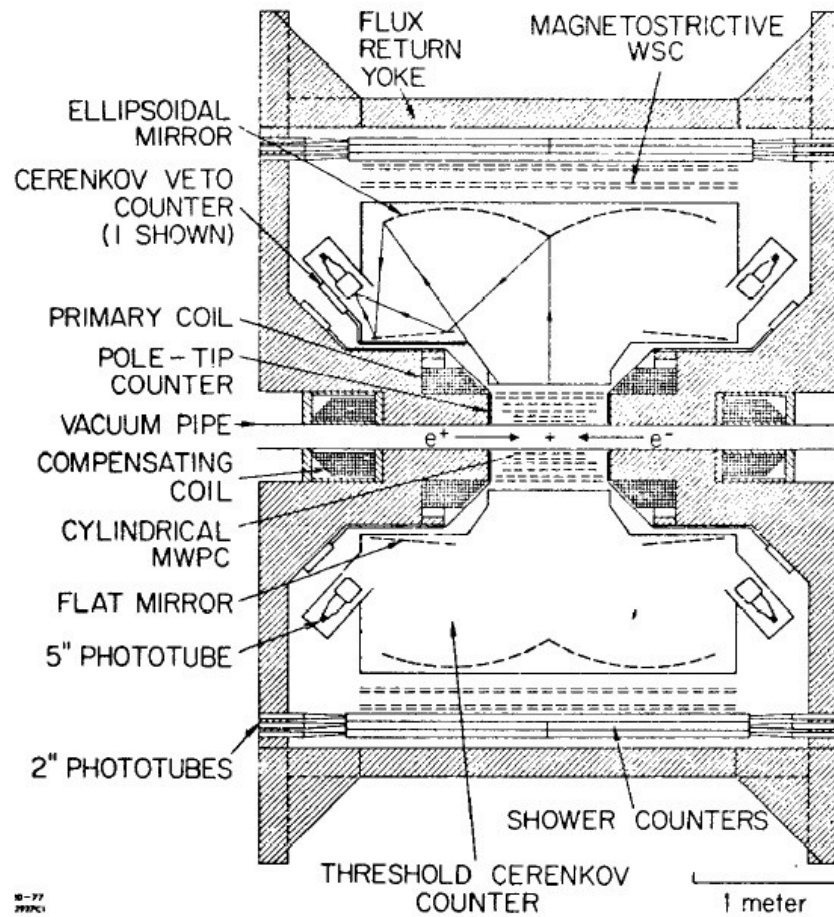
$$B(\tau^- \longrightarrow \nu_\tau + e^- + \bar{\nu}_e) = (22,4 \pm 5,5)\%$$

$$B(\tau^- \longrightarrow \nu_\tau + \textit{Hadronen}) = (45 \pm 19)\%$$

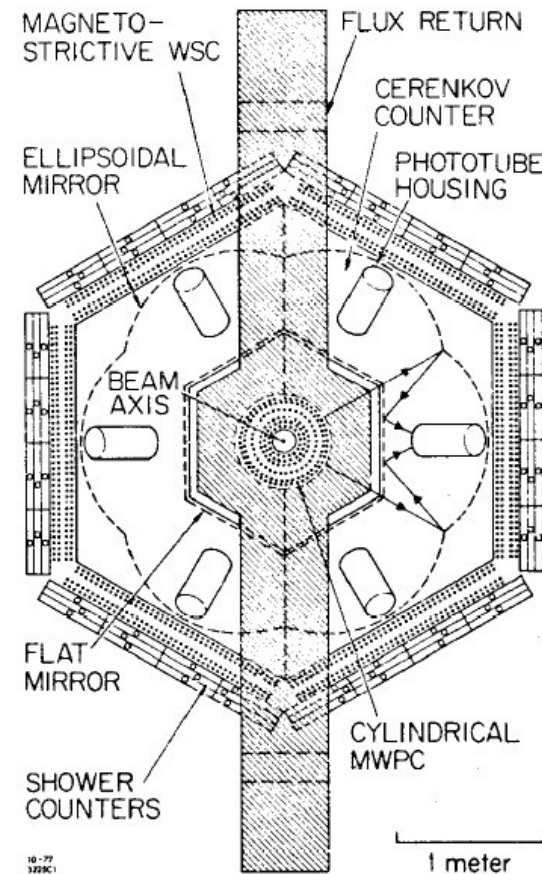
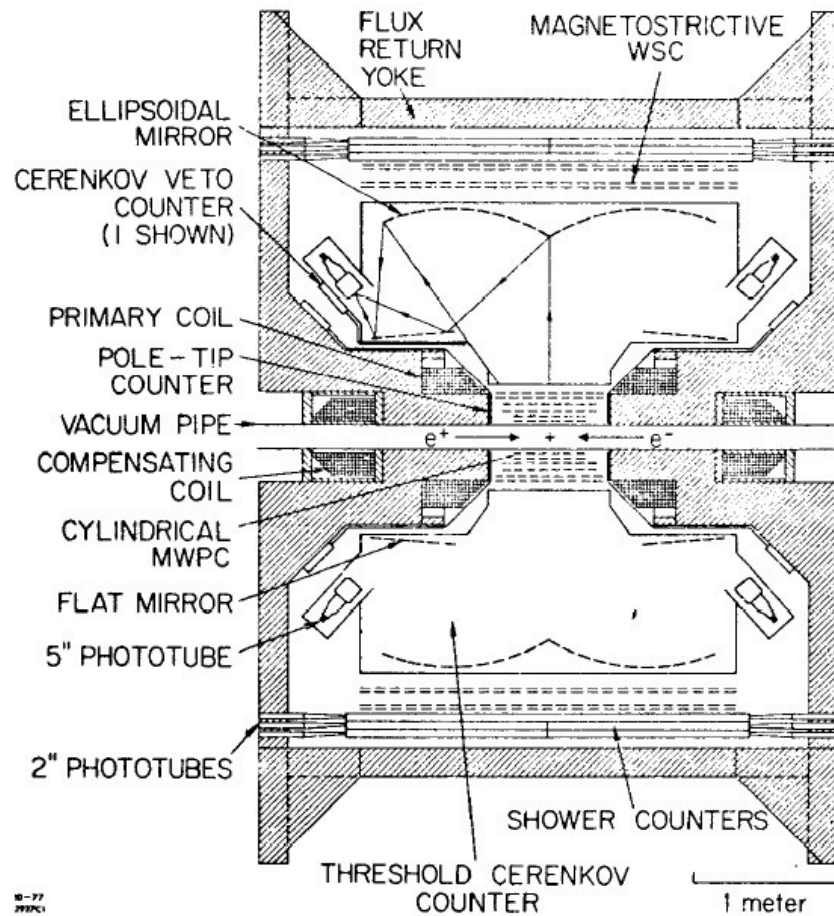
Mark II Detektor am SLAC



DELCO-Detektor am SPEAR



DELCO-Detektor am SPEAR



- Große Tscherenkow-Kammer
→ genaue Unterscheidung von
Elektron und Pion möglich

Ergebnis DELCO-Kollaboration 1977

→ „A comparison of the events having only two visible prongs (of which only one is an electron) with the heavy lepton hypothesis shows *no disagreement*.“
(Kirkby)

Zerfall des τ -Leptons in Neutrino und Pion (3)

- Bis 1978 wurde der Zerfall bei Experimenten an verschiedenen Detektoren beobachtet:
 - PLUTO Detektor (am DESY)
 - DELCO Detektor (am SLAC)
 - Mark I Bleiglas-Wand Detektor (am SLAC)
 - Mark II Detektor (am SLAC)

Vergleich der gemessenen Verzweungsverhältnisse

$$B(\tau^- \rightarrow \nu_{\tau} + \pi^-)$$

Table From Feldman (1979), the various measured branching fraction\ B
in percent for $\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_{\tau}$ in late 1978.

Experiment	Mode	Events	Background	B($\tau \rightarrow \pi \nu$)
SLAC-LBL	$\pi\pi$	≈ 200	≈ 70	$9.3 \pm 1.0 \pm 3.8$
PLUTO	$\pi\pi$	32	9	$9.0 \pm 2.9 \pm 2.5$
DELCO	$e\pi$	18	7	$8.0 \pm 3.2 \pm 1.3$
Mark II	$\pi\pi$	142	46	$8.0 \pm 1.1 \pm 1.5$
	$e\pi$	27	10	$8.2 \pm 2.0 \pm 1.5$
Average				8.3 ± 1.4

- Heute: $B = (10,83 \pm 0,06)\%$

Beobachtung und Messung des Zerfalls des Leptons in Neutrino und zwei Pionen

- Gemessen wurde erneut das
Verzweigungsverhältnis:

$$B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \pi^- + \pi^0)$$

- DASP Kollaboration am DORIS: $B=(24\pm 9)\%$
- Mark II Kollaboration: $B=(20,5\pm 4,1)\%$
- Heute: $B=(25,52\pm 0,09)\%$

Weitere Entwicklung

- 1979: *„Alle bestätigten Messungen im Einklang mit der Hypothese, dass das τ ein Lepton ist, produziert durch eine bekannte elektromagnetische Interaktion und dass es durch schwache Wechselwirkung zerfällt“* (Perl)
→ τ -Lepton ist „verifiziert“
- 1995: **Nobelpreis**

τ -Lepton: Heutige Werte



$$J = \frac{1}{2}$$

Mass $m = 1776.82 \pm 0.16$ MeV

$(m_{\tau^+} - m_{\tau^-})/m_{\text{average}} < 2.8 \times 10^{-4}$, CL = 90%

Mean life $\tau = (290.3 \pm 0.5) \times 10^{-15}$ s

$$c\tau = 87.03 \mu\text{m}$$

Magnetic moment anomaly > -0.052 and < 0.013 , CL = 95%

$\text{Re}(d_\tau) = -0.220$ to 0.45×10^{-16} e cm, CL = 95%

$\text{Im}(d_\tau) = -0.250$ to 0.0080×10^{-16} e cm, CL = 95%

τ -Lepton: Zerfalls- moden

τ^- DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level	ρ (MeV/c)
Modes with one charged particle			
particle $^- \geq 0$ neutrals $\geq 0 K^0 \nu_\tau$ ("1-prong")	(85.35 $\pm$ 0.07) %	S=1.3	—
particle $^- \geq 0$ neutrals $\geq 0 K_L^0 \nu_\tau$	(84.71 $\pm$ 0.08) %	S=1.3	—
$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	[g] (17.41 $\pm$ 0.04) %	S=1.1	885
$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \gamma$	[e] (3.6 $\pm$ 0.4) $\times 10^{-3}$		885
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	[g] (17.83 $\pm$ 0.04) %		888
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau \gamma$	[e] (1.75 $\pm$ 0.18) %		888
$h^- \geq 0 K_L^0 \nu_\tau$	(12.06 $\pm$ 0.06) %	S=1.2	883
$h^- \nu_\tau$	(11.53 $\pm$ 0.06) %	S=1.2	883
$\pi^- \nu_\tau$	[g] (10.83 $\pm$ 0.06) %	S=1.2	883
$K^- \nu_\tau$	[g] (7.00 $\pm$ 0.10) $\times 10^{-3}$	S=1.1	820
$h^- \geq 1$ neutrals ν_τ	(37.10 $\pm$ 0.10) %	S=1.2	—
$h^- \geq 1 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	(36.58 $\pm$ 0.10) %	S=1.2	—
$h^- \pi^0 \nu_\tau$	(25.95 $\pm$ 0.09) %	S=1.1	878
$\pi^- \pi^0 \nu_\tau$	[g] (25.52 $\pm$ 0.09) %	S=1.1	878
$\pi^- \pi^0$ non- $\rho(770) \nu_\tau$	(3.0 $\pm$ 3.2) $\times 10^{-3}$		878
$K^- \pi^0 \nu_\tau$	[g] (4.29 $\pm$ 0.15) $\times 10^{-3}$		814
$h^- \geq 2 \pi^0 \nu_\tau$	(10.87 $\pm$ 0.11) %	S=1.2	—
$h^- 2 \pi^0 \nu_\tau$	(9.52 $\pm$ 0.11) %	S=1.1	862
$h^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	(9.36 $\pm$ 0.11) %	S=1.2	862
$\pi^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	[g] (9.30 $\pm$ 0.11) %	S=1.2	862
$\pi^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0), scalar	< 9 $\times 10^{-3}$	CL=95%	862
$\pi^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0), vector	< 7 $\times 10^{-3}$	CL=95%	862
$K^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	[g] (6.5 $\pm$ 2.3) $\times 10^{-4}$		796
$h^- \geq 3 \pi^0 \nu_\tau$	(1.35 $\pm$ 0.07) %	S=1.1	—
$h^- \geq 3 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	(1.26 $\pm$ 0.07) %	S=1.1	—
$h^- 3 \pi^0 \nu_\tau$	(1.19 $\pm$ 0.07) %		836
$\pi^- 3 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	[g] (1.05 $\pm$ 0.07) %		836

τ -Lepton: Zerfalls- moden

τ^- DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level	ρ (MeV/c)
Modes with one charged particle			
particle $^- \geq 0$ neutrals $\geq 0 K^0 \nu_\tau$ ("1-prong")	(85.35 $\pm$ 0.07) %	S=1.3	–
particle $^- \geq 0$ neutrals $\geq 0 K_L^0 \nu_\tau$	(84.71 $\pm$ 0.08) %	S=1.3	–
$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	[g] (17.41 $\pm$ 0.04) %	S=1.1	885
$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \gamma$	[e] (3.6 $\pm$ 0.4) $\times 10^{-3}$		885
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	[g] (17.83 $\pm$ 0.04) %		888
$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau \gamma$	[e] (1.75 $\pm$ 0.18) %		888
$h^- \geq 0 K_L^0 \nu_\tau$	(12.06 $\pm$ 0.06) %	S=1.2	883
$h^- \nu_\tau$	(11.53 $\pm$ 0.06) %	S=1.2	883
$\pi^- \nu_\tau$	[g] (10.83 $\pm$ 0.06) %	S=1.2	883
$K^- \nu_\tau$	[g] (7.00 $\pm$ 0.10) $\times 10^{-3}$	S=1.1	820
$h^- \geq 1$ neutrals ν_τ	(37.10 $\pm$ 0.10) %	S=1.2	–
$h^- \geq 1 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	(36.58 $\pm$ 0.10) %	S=1.2	–
$h^- \pi^0 \nu_\tau$	(25.95 $\pm$ 0.09) %	S=1.1	878
$\pi^- \pi^0 \nu_\tau$	[g] (25.52 $\pm$ 0.09) %	S=1.1	878
$\pi^- \pi^0$ non- $\rho(770) \nu_\tau$	(3.0 $\pm$ 3.2) $\times 10^{-3}$		878
$K^- \pi^0 \nu_\tau$	[g] (4.29 $\pm$ 0.15) $\times 10^{-3}$		814
$h^- \geq 2 \pi^0 \nu_\tau$	(10.87 $\pm$ 0.11) %	S=1.2	–
$h^- 2 \pi^0 \nu_\tau$	(9.52 $\pm$ 0.11) %	S=1.1	862
$h^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	(9.36 $\pm$ 0.11) %	S=1.2	862
$\pi^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	[g] (9.30 $\pm$ 0.11) %	S=1.2	862
$\pi^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0), scalar	< 9 $\times 10^{-3}$	CL=95%	862
$\pi^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0), vector	< 7 $\times 10^{-3}$	CL=95%	862
$K^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	[g] (6.5 $\pm$ 2.3) $\times 10^{-4}$		796
$h^- \geq 3 \pi^0 \nu_\tau$	(1.35 $\pm$ 0.07) %	S=1.1	–
$h^- \geq 3 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	(1.26 $\pm$ 0.07) %	S=1.1	–
$h^- 3 \pi^0 \nu_\tau$	(1.19 $\pm$ 0.07) %		836
$\pi^- 3 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	[g] (1.05 $\pm$ 0.07) %		836

Vierte Generation?

- Gilt als **experimentell widerlegt** (5.3σ)
- Entdeckung des Higgs-Bosons bei $125 \text{ GeV}/c^2$ schließt diese aus
 - Wechselwirkung mit vierter Generation hätte Auswirkungen auf die Masse
- Messungen der Breiten des Z-Bosons an CERN's Large Electron-Positron Collider
 - „Leichte“ Neutrinos mit $m < 45 \text{ GeV}/c^2$ ausgeschlossen

Quellen (Literatur):

- Perl, M. L., 1975a, Proceedings of the Canadian Institute of Particle Physics, Summer School, edited by R. Heinzl and B. Margolis (McGill University, Montreal, 1975).
- Perl, M. L., et al., 1975b, Phys. Rev. Lett. 35, 1489.
- www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1995/perl-facts.html
- Feldman, G. J., et al., 1977, Phys. Rev. Lett. 38, 117
- Kirkby et al, 1977, Direct Electron Production Measurements by DELCO at SPEAR
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Generation_\(particle_physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Generation_(particle_physics))

Quellen (Bilder):

- de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell
- www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1995/perl-facts.html
- www.catchwordbranding.com/static/uploads/2008/08/slac-aerial-view_hr.jpg
- SLAC-PUB-4558LBL-26671 March 1989 (I/E)
- <http://pdg.lbl.gov/2014/tables/rpp2014-sum-leptons.pdf>

Danke für die Aufmerksamkeit!

