

Kern- und Teilchenphysik

SS2012

Vorlesung-Website

■ Johannes Blümer

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



- e^+e^- -Streuung

- QZ der Quarks
- WQ und Referenzprozess
- Quarkfarben
- qg -WW, Gluonjets
- Resonanzen als q -anti- q -Systeme
- W, Z-Bosonen
- Multiplizitäten
- Bemerkungen zum WQ u. a., Hinweise auf NEUES

Erinnerung an v15

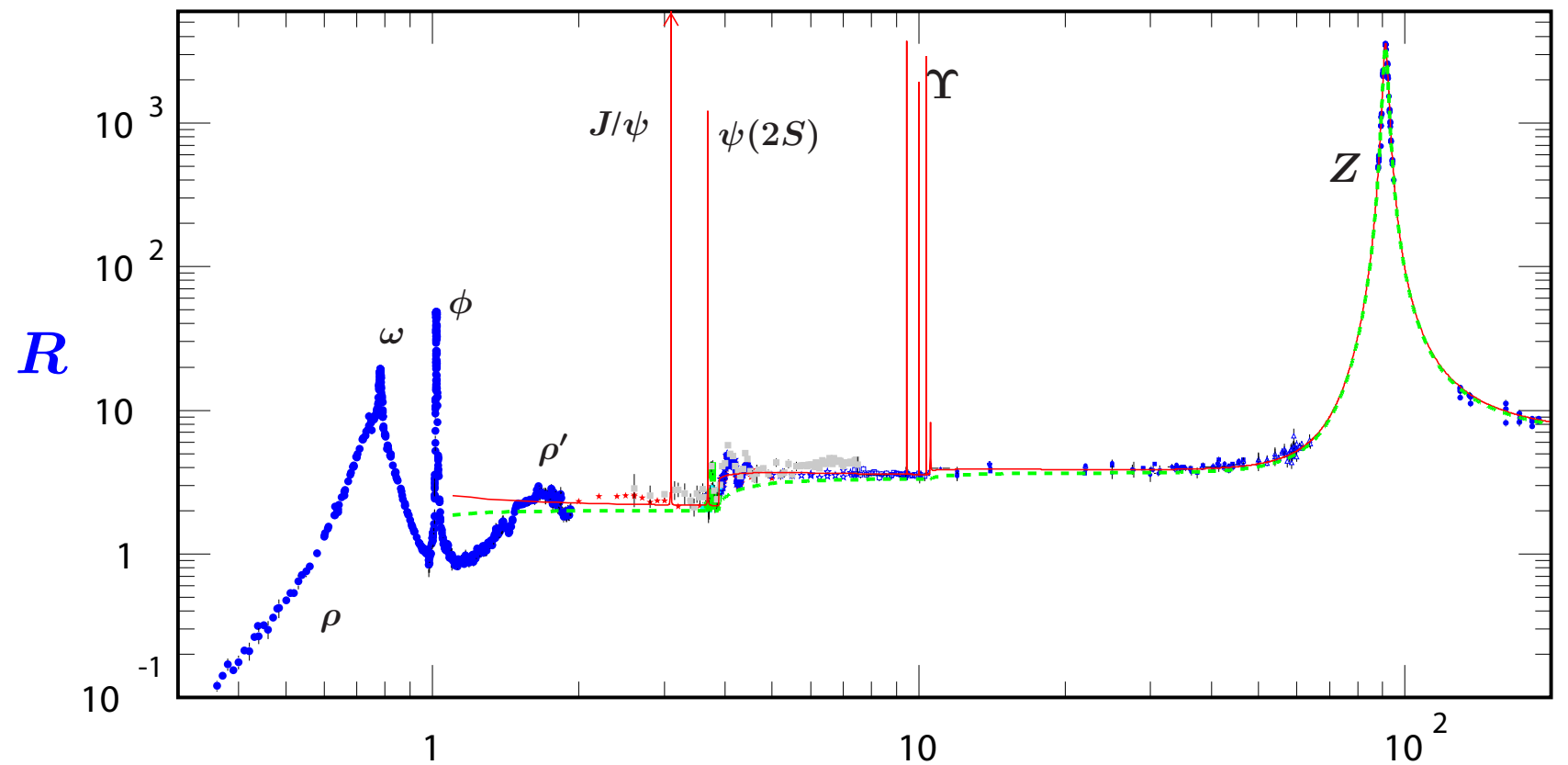
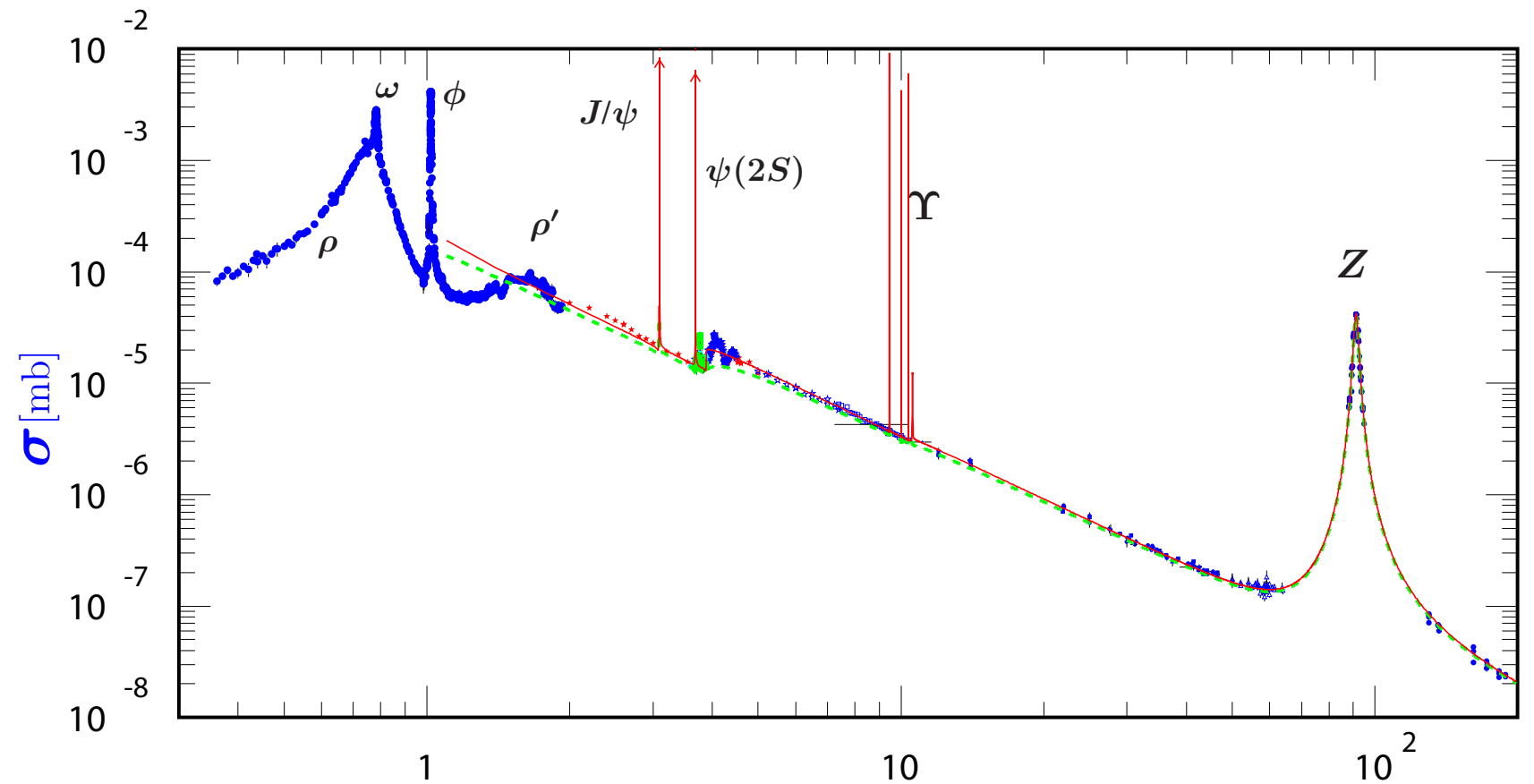
- Symmetrien und Erhaltungssätze

- Einführung
- Diskrete Symmetrieoperationen: C, P, CP, CPT
- ausführlicher: Sturz der Parität, Zeitumkehr, CP-Verletzung
- CPT-Theorem
- Symmetrieeigenschaften der 3 Wechselwirkungen

WQ in e⁺e⁻-Kollisionen

Wirkungsquerschnitt... ►

auf rein leptonischen Referenzprozess mit Myonen normiert...:
Evidenz für “farbige Quarks”,
 $n_c = 3$

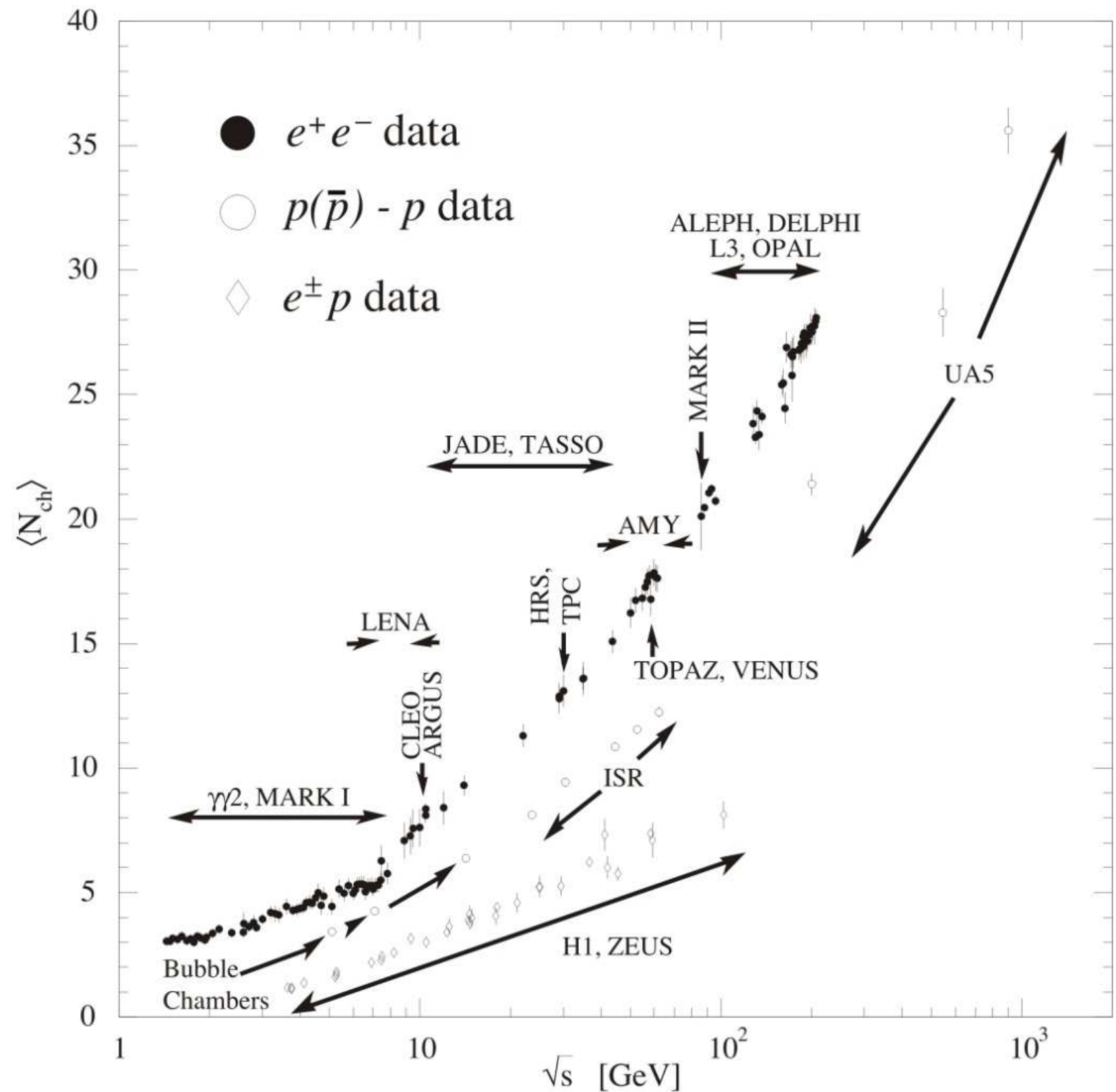


$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\sum_f \sigma(e^+e^- \rightarrow q_f\bar{q}_f)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = n_c \sum_f z_f^2$$

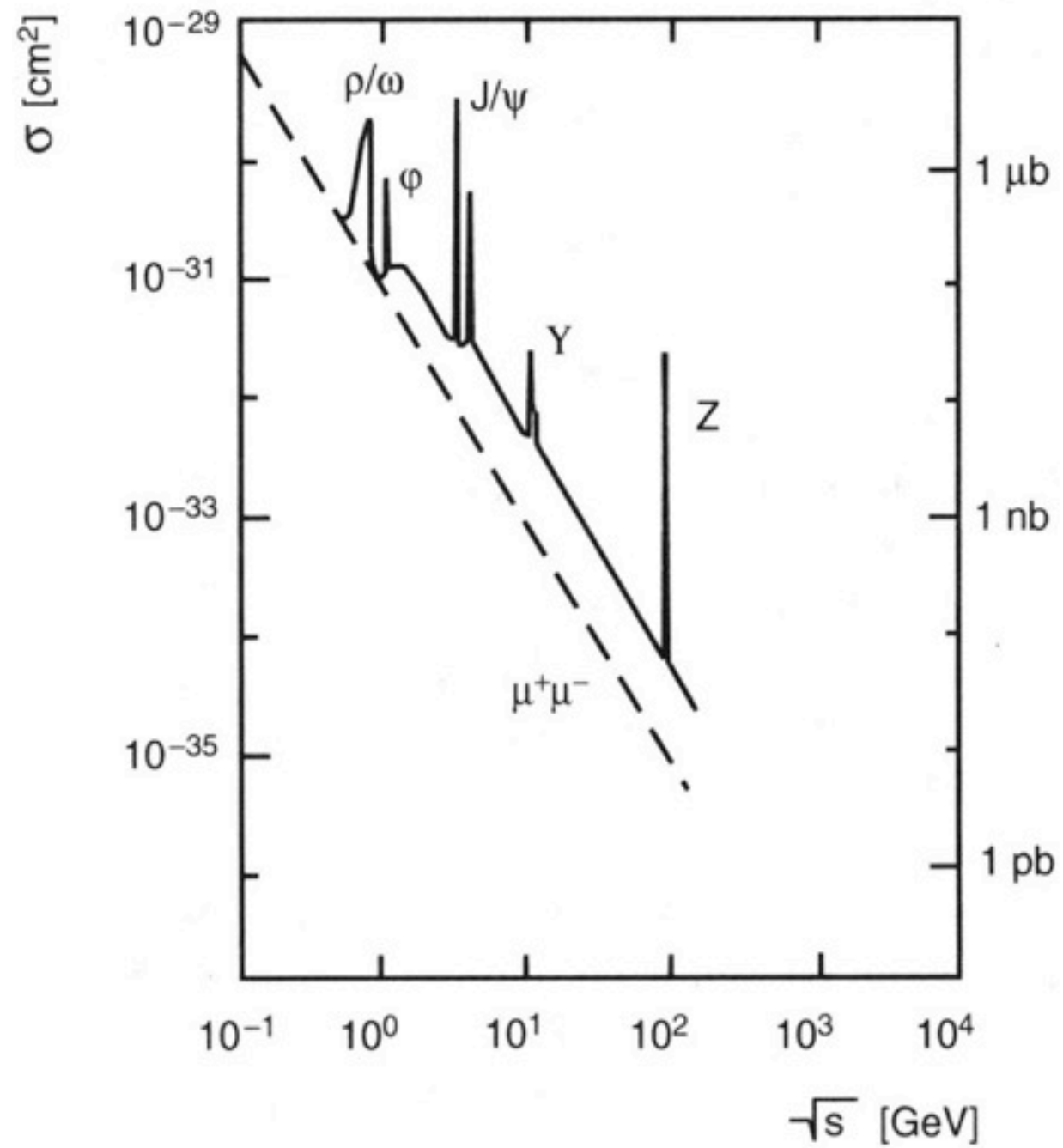
$\sqrt{s}$ [GeV]

Multiplizität geladener Teilchen

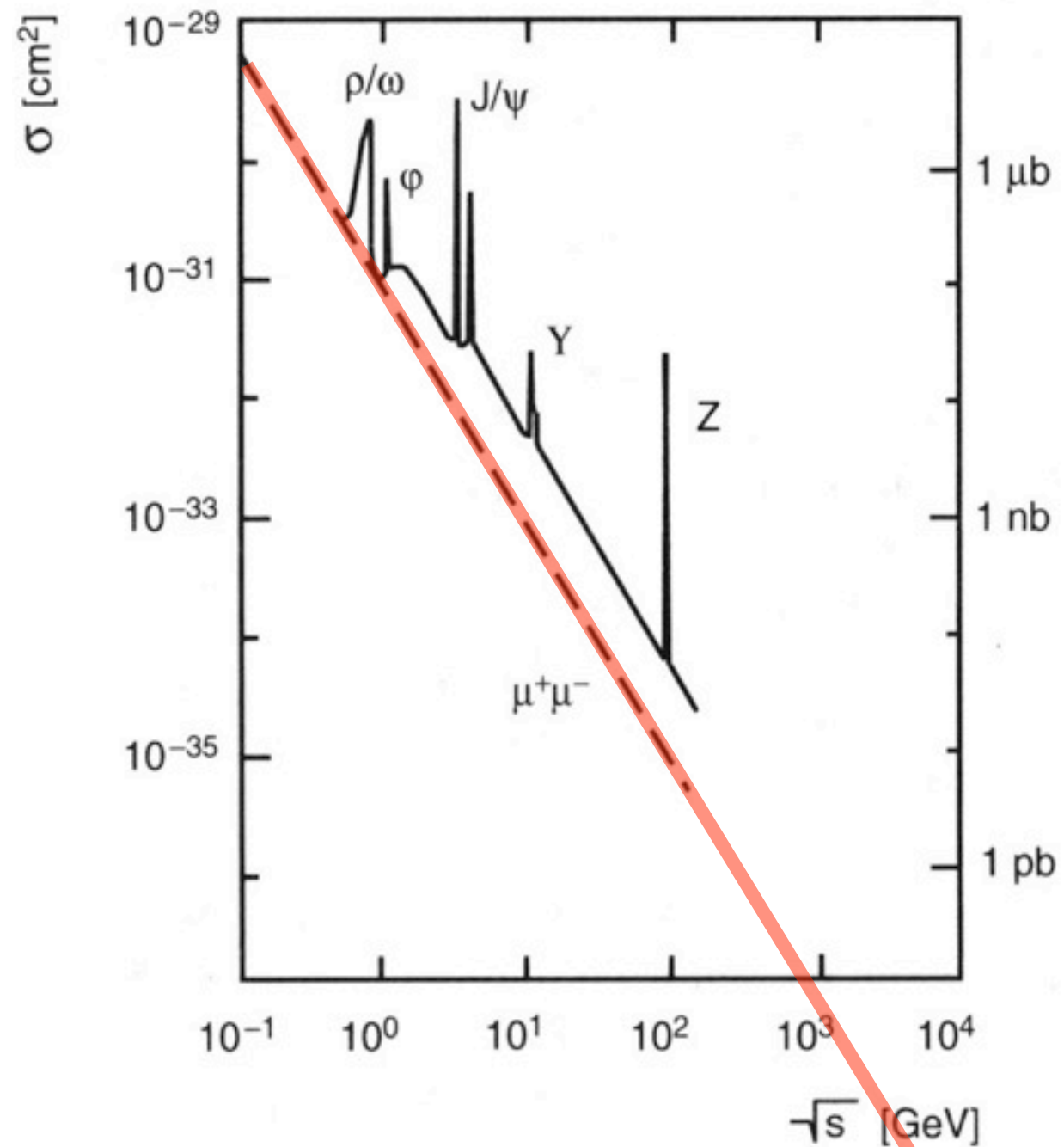
... steigt ungefähr
logarithmisch an...



e^+e^- -Wirkungsquerschnitt

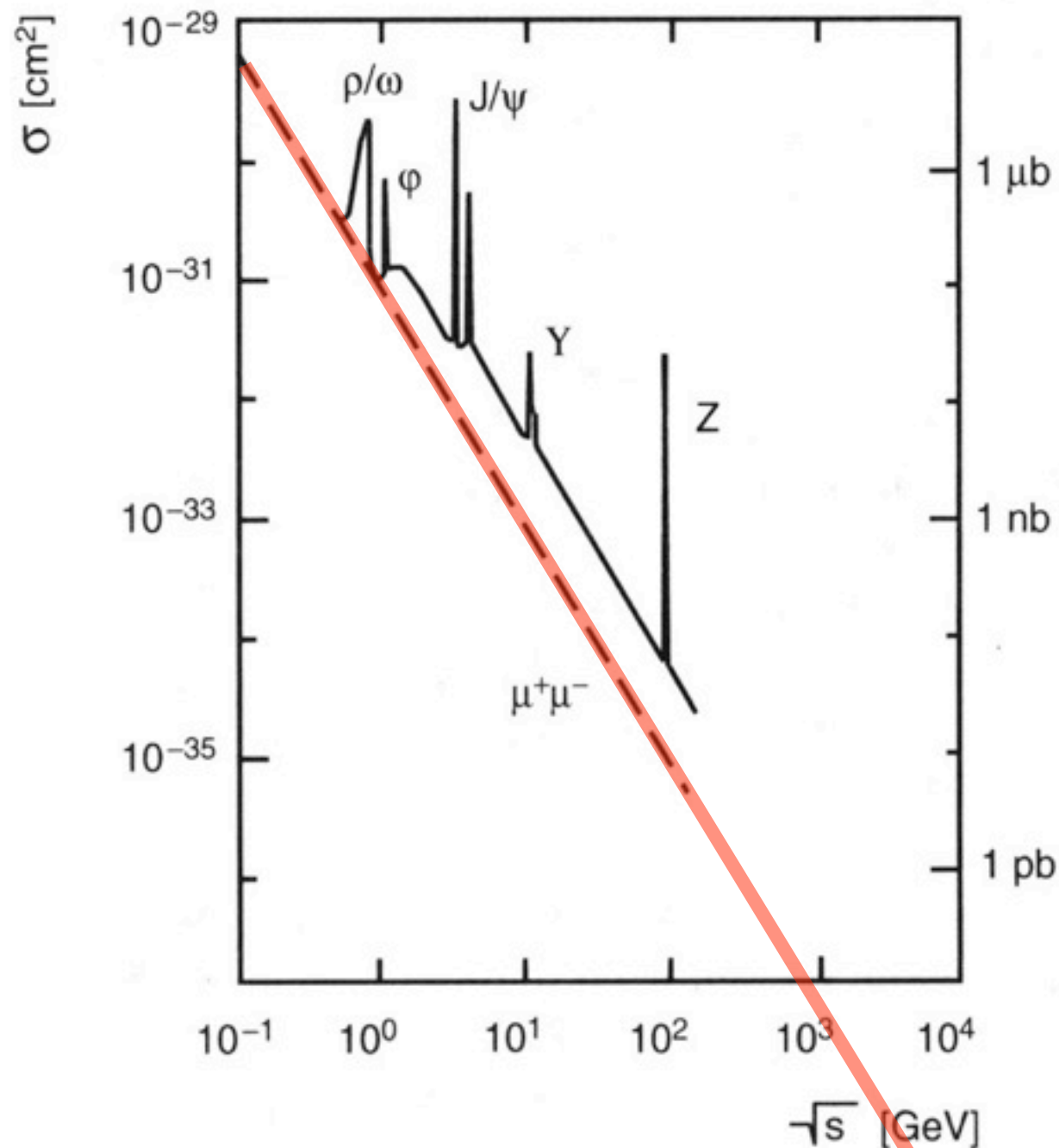


e^+e^- -Wirkungsquerschnitt



$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = 21.7 \frac{\text{nbarn}}{(E^2/\text{GeV}^2)}$$

e^+e^- -Wirkungsquerschnitt



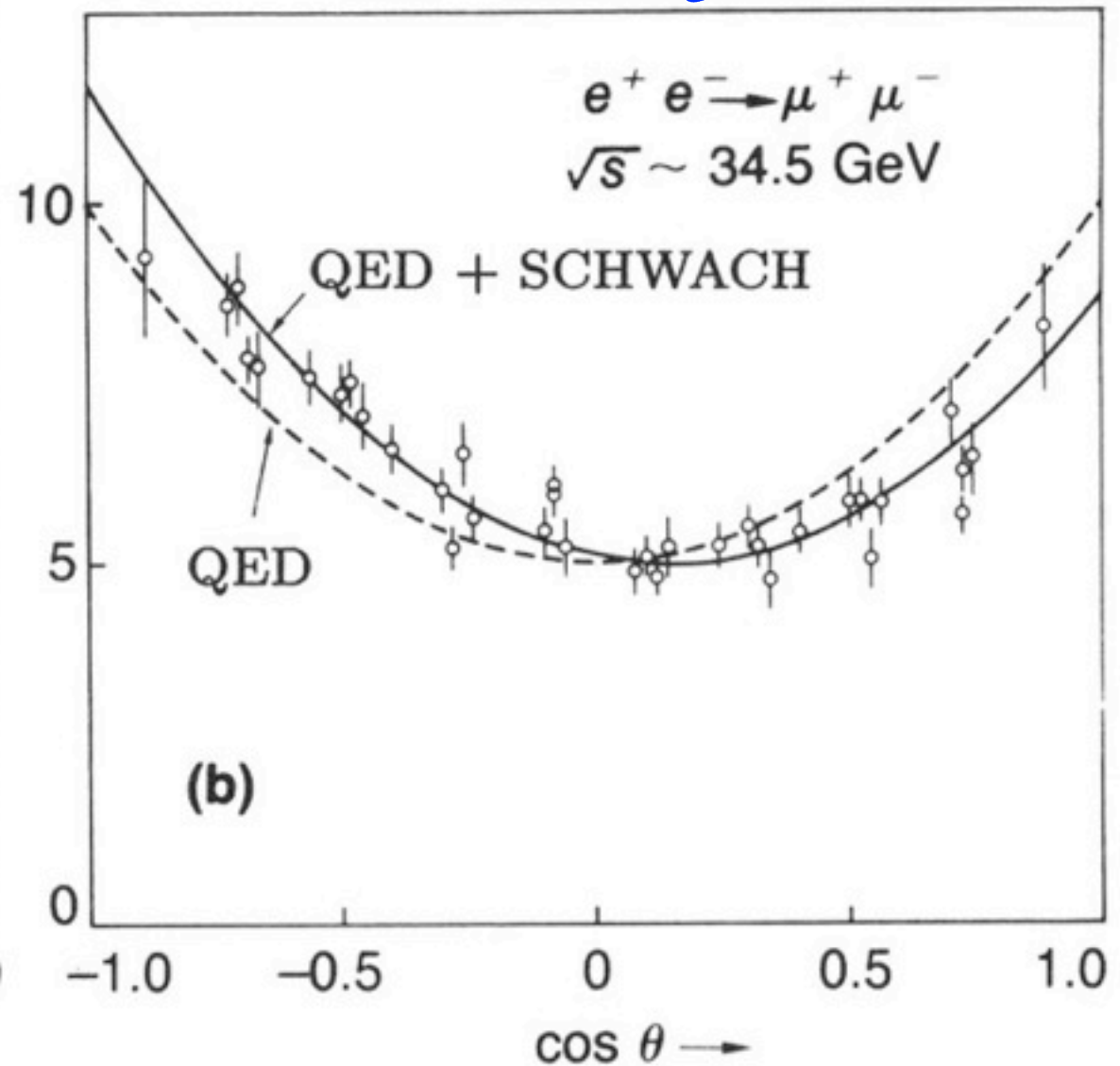
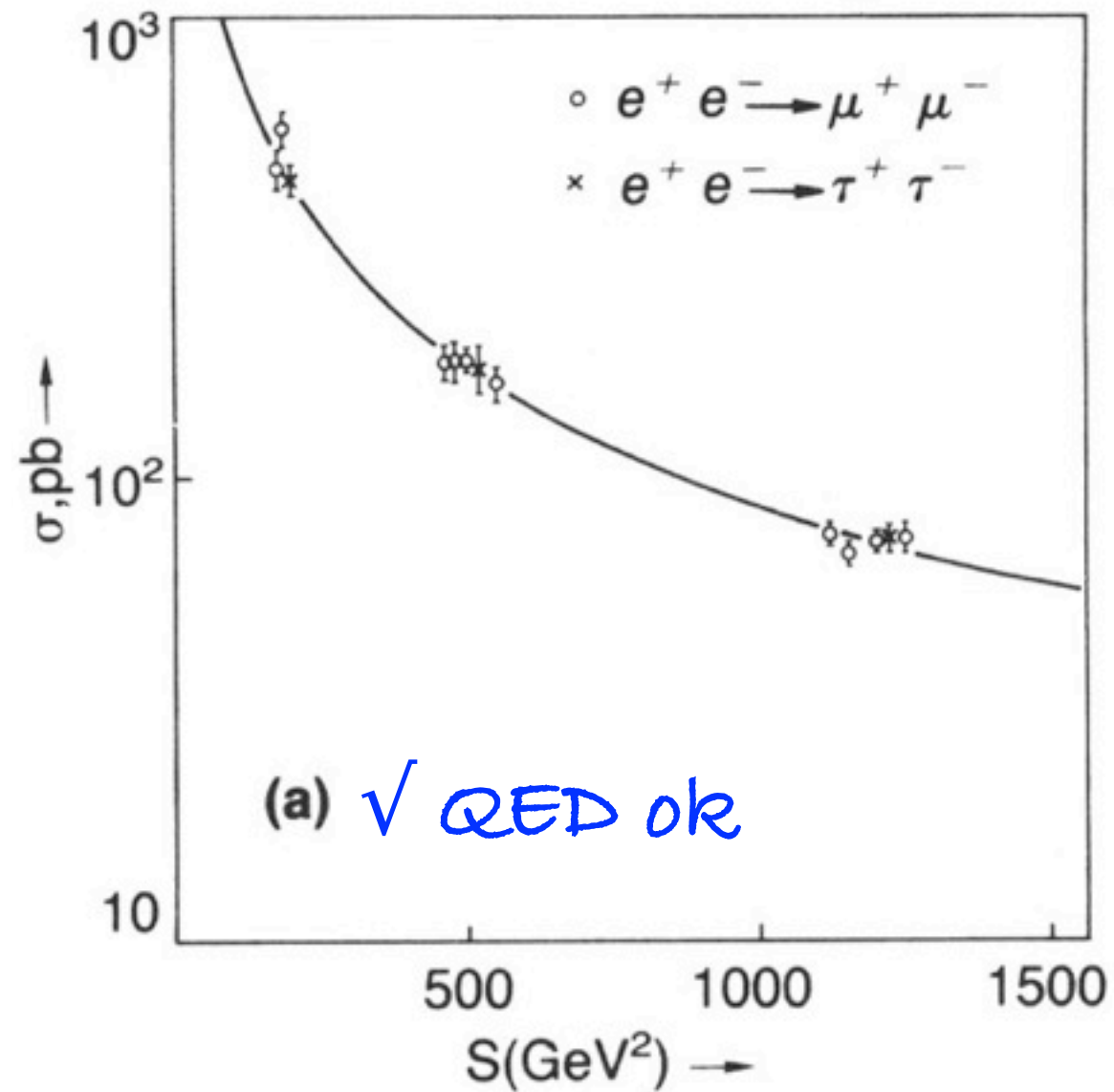
Bemerkungen zu:

- $1/E^2$ - Verhalten des WQ
- **Bhabha-Streuung**
<http://www.physics.usu.edu/Wheeler/QFT/PicsII/QFT10Mar05Bhabha.pdf>
- **Luminosität von Kollidern**
<http://hepunix.rl.ac.uk/~adye/thesis/html/node9.html>
- **Leptonuniversalität**
- **Größe der Leptonen $< 10^{-18} \text{ m}$**
- **Hinweise auf NEUES?**

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = 21.7 \frac{\text{nbarn}}{(E^2/\text{GeV}^2)}$$

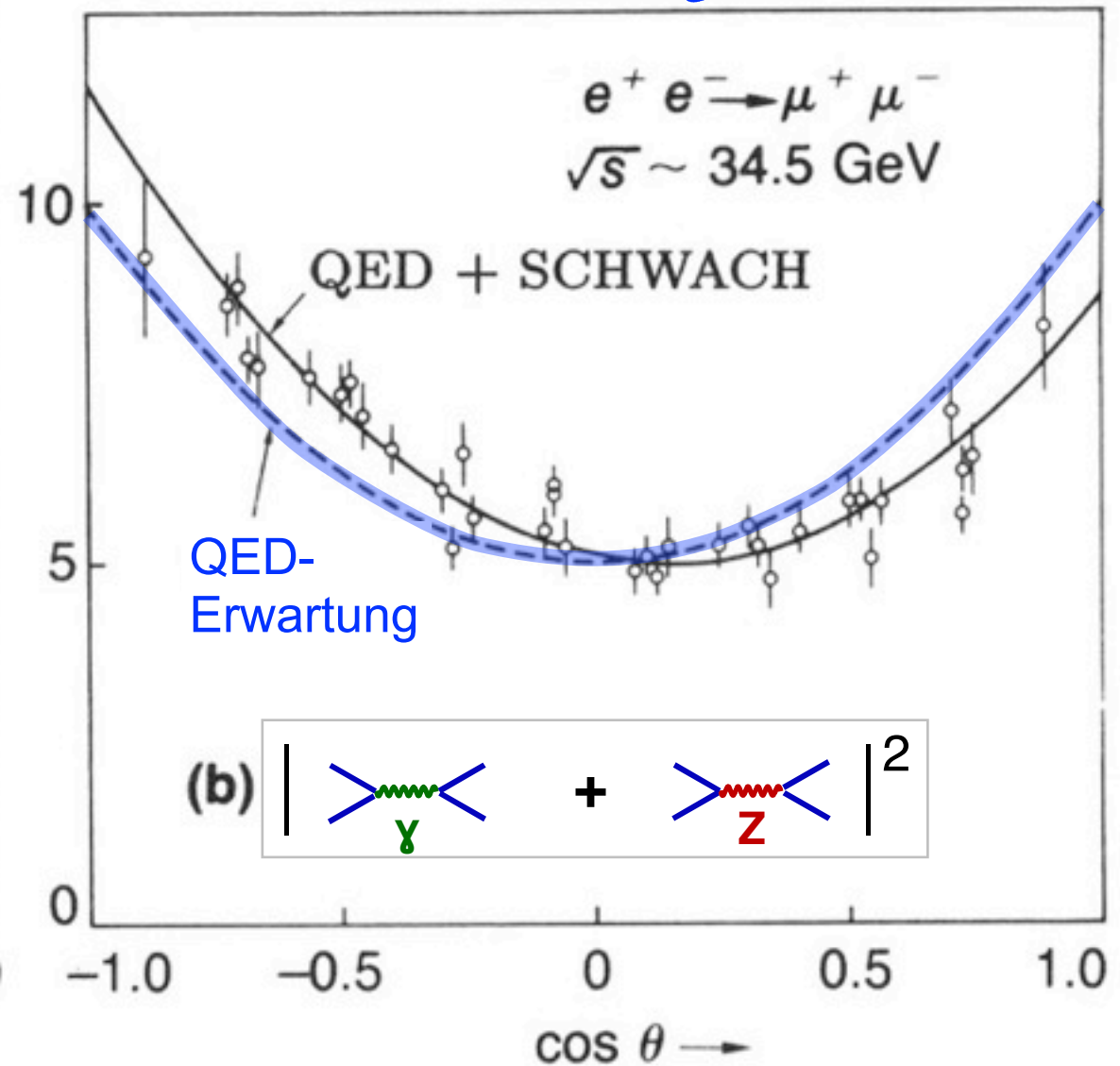
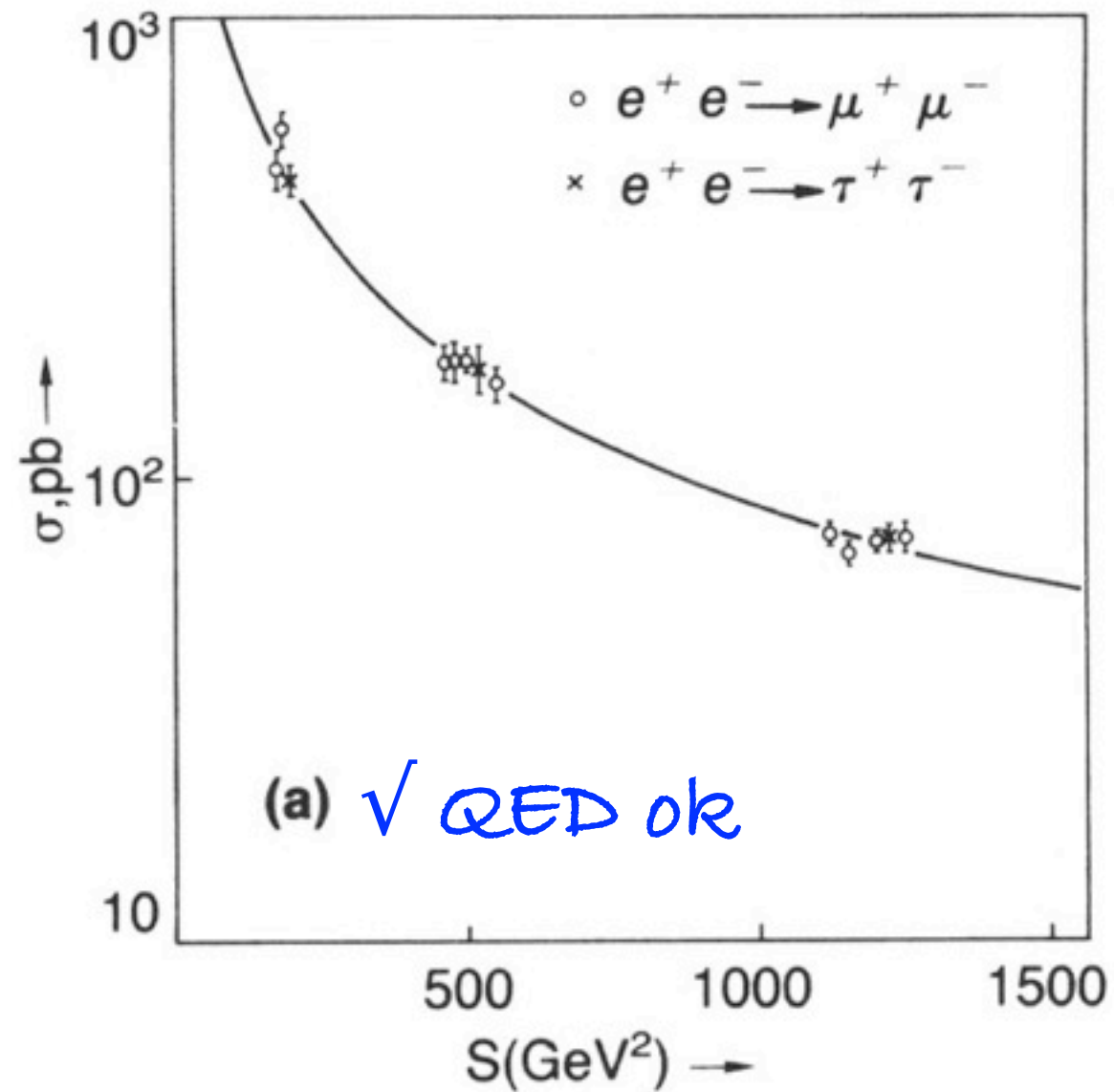
Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie in e^+e^-

PETRA, Wu et al. 1984 [Perkins 6.8]



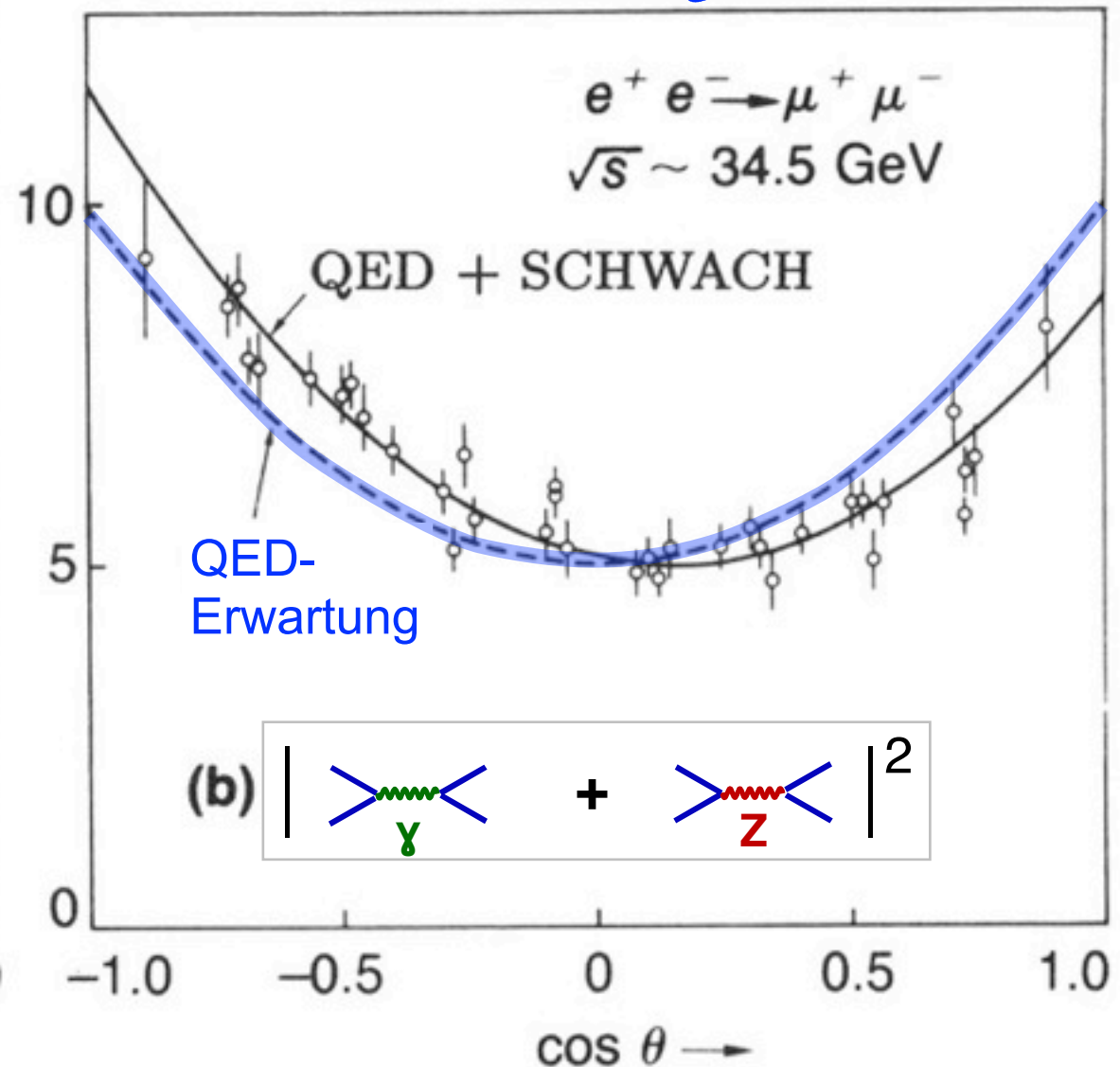
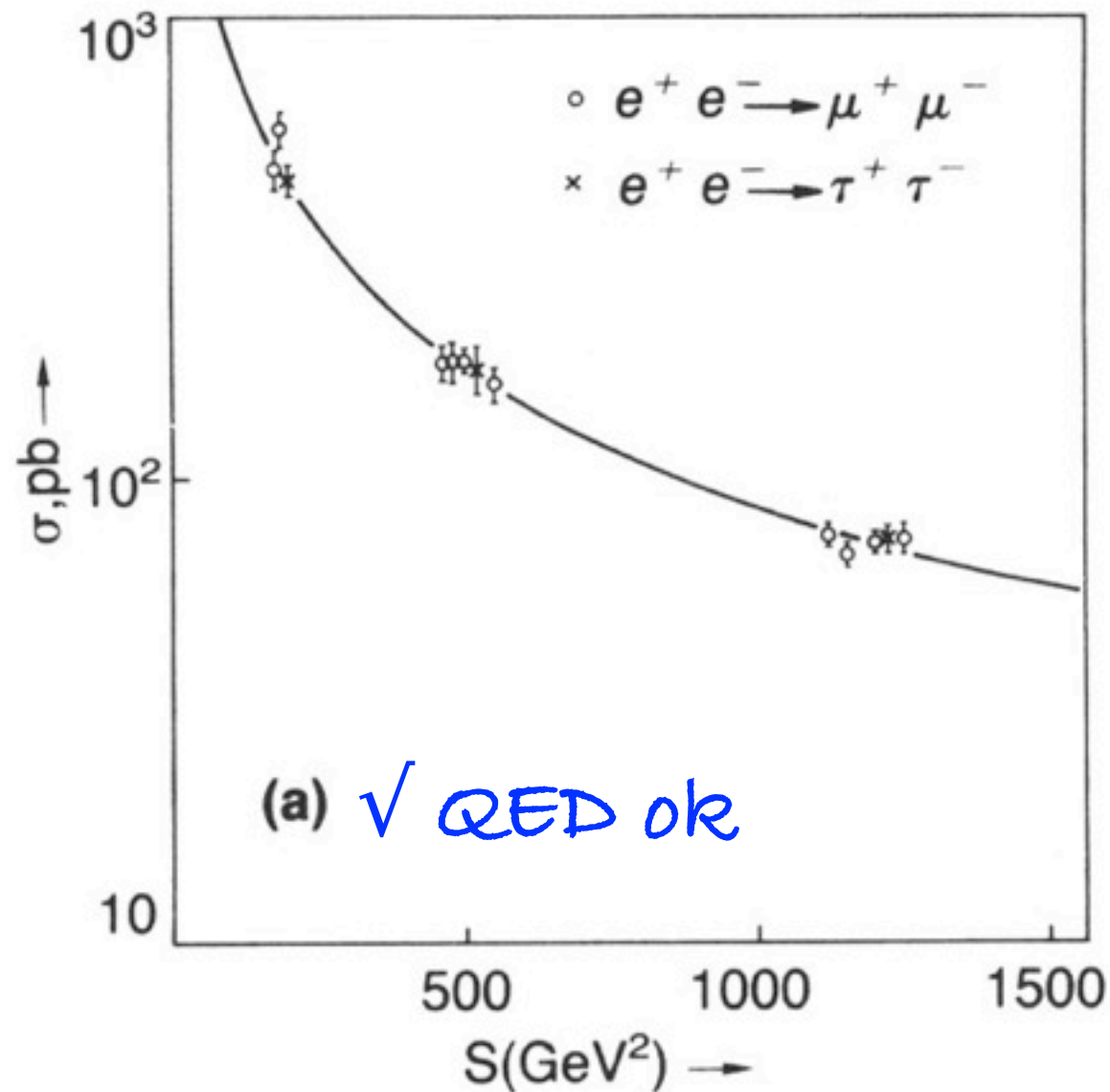
Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie in e^+e^-

PETRA, Wu et al. 1984 [Perkins 6.8]



Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie in e^+e^-

PETRA, Wu et al. 1984 [Perkins 6.8]



$$\left| \text{diagram with } \gamma + \text{diagram with } Z \right|^2 =$$

Erklärung: schweres Austauschteilchen der Schwachen WW macht sich bemerkbar; Schw. WW ist paritätsverletzend...

$\text{QED} - \text{WQ}$ γZ - Interferenz
 kein Beitrag zum totalen WQ

$Z^0 - \text{WQ}$
 sehr klein bei 35 GeV

nach H. Weyl, R.P.Feynman:

„... a thing is symmetrical, if you can do something to it and after you have done it, it looks the same as before ...“

nach H. Weyl, R.P.Feynman:

Objekt, Naturgesetz

Transformation

„... a thing is symmetrical, if you can do something to it and after you have done it, it looks the same as before ...“

Invarianz

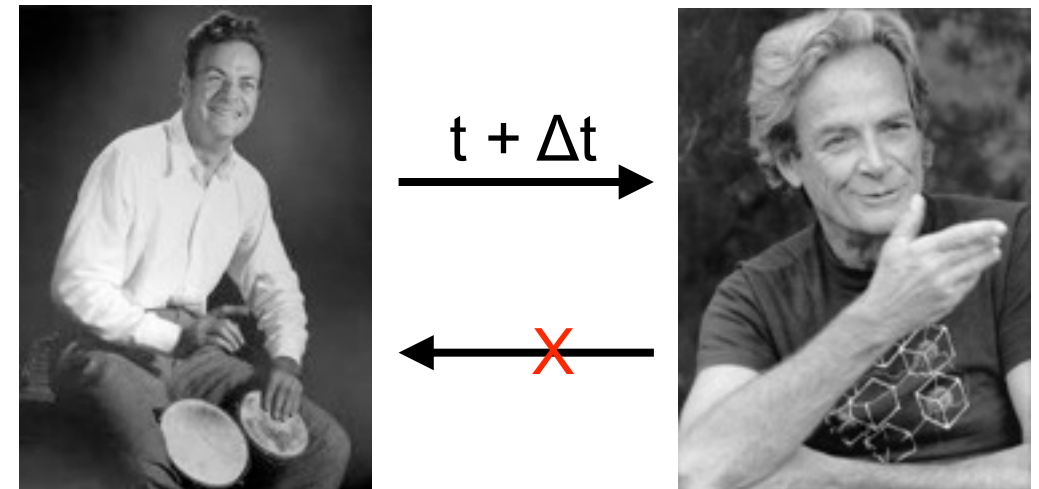
nach H. Weyl, R.P.Feynman:

Objekt, Naturgesetz

Transformation

„... a thing is symmetrical, if you can do something to it and after you have done it, it looks the same as before ...“

Invarianz



nach H. Weyl, R.P.Feynman:

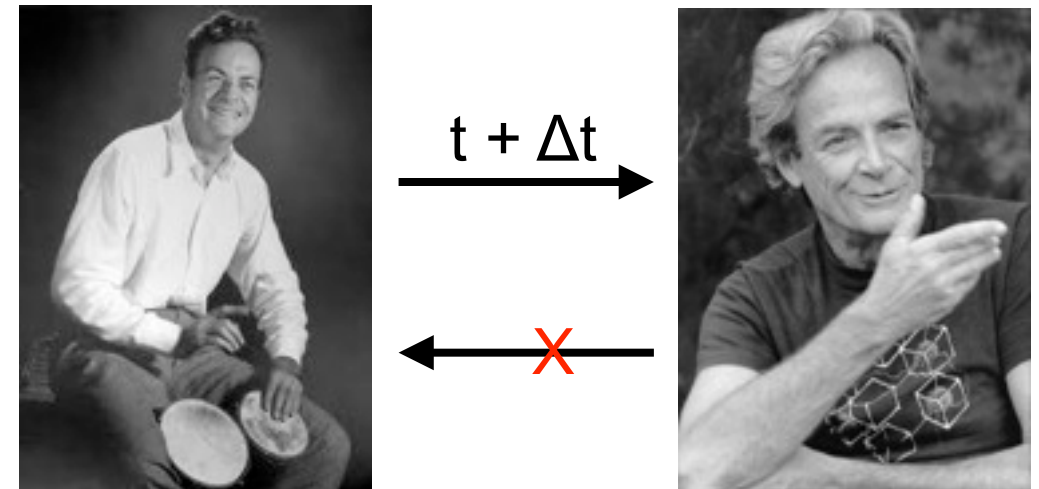
Objekt, Naturgesetz

Transformation

„... a thing is symmetrical, if you can do something to it and after you have done it, it looks the same as before ...“

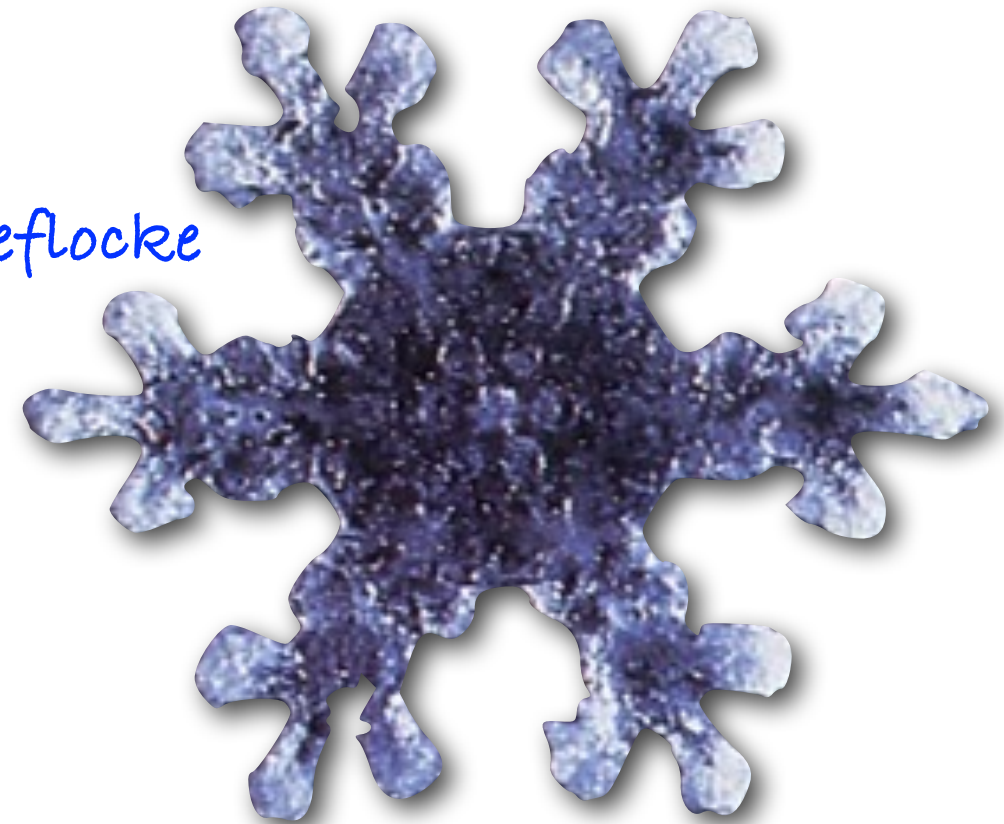
Invarianz

Ordnungsprinzipien
Vorhersagen
Zusammenhang mit unbeobachtbaren Größen
Erhaltungssätze
Struktur der Wechselwirkungen
Noether-Theorem



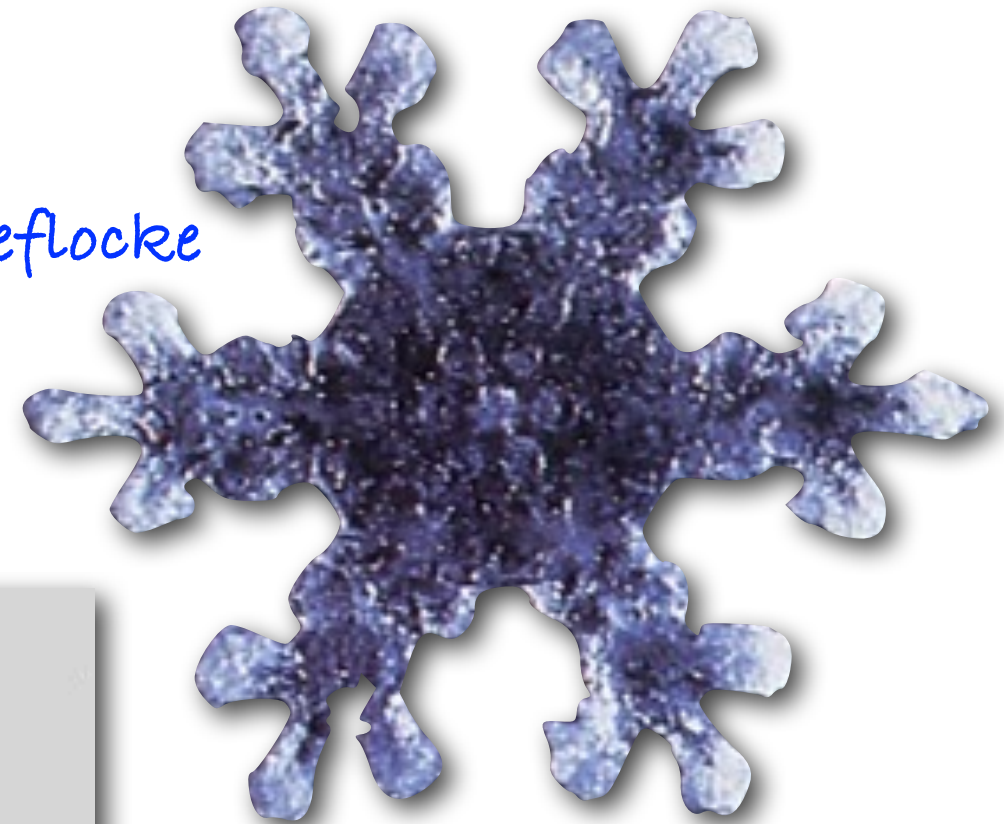
Rotationssymmetrie

60° Rotationssymmetrie einer Schneeflocke



Rotationssymmetrie

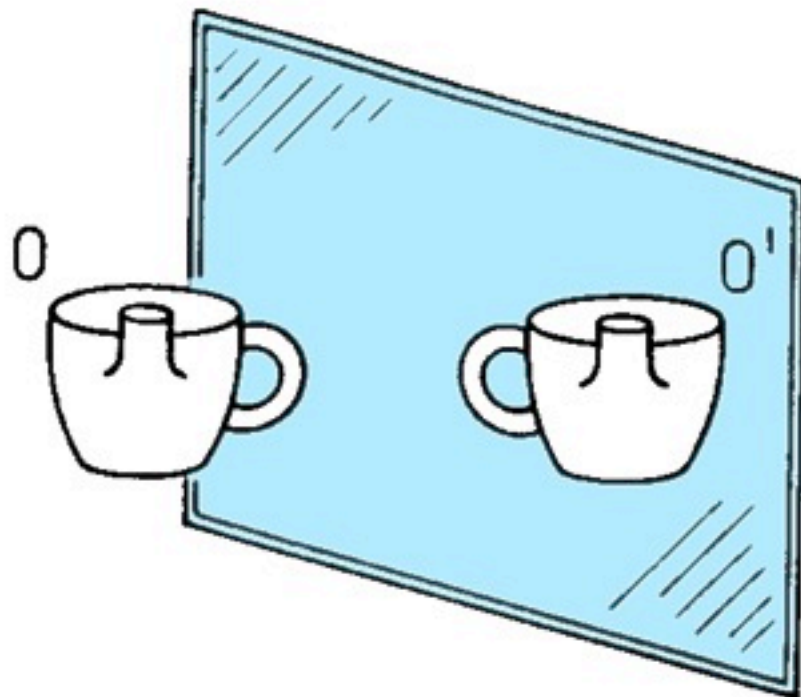
60° Rotationssymmetrie einer Schneeflocke



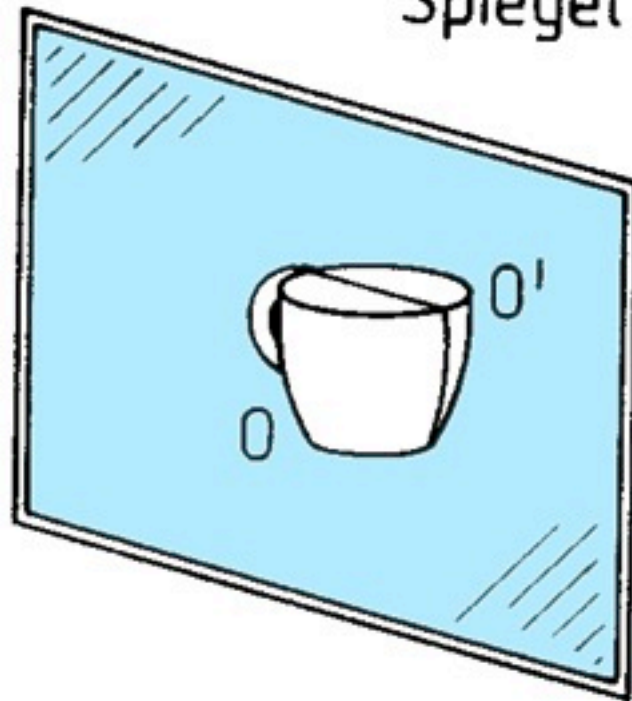
"Da hat doch schon wieder einer das Bild
verkehrt 'rüm aufgehängt."

völlige
Rotationssymmetrie:
es gibt keine
ausgezeichnete
Richtung

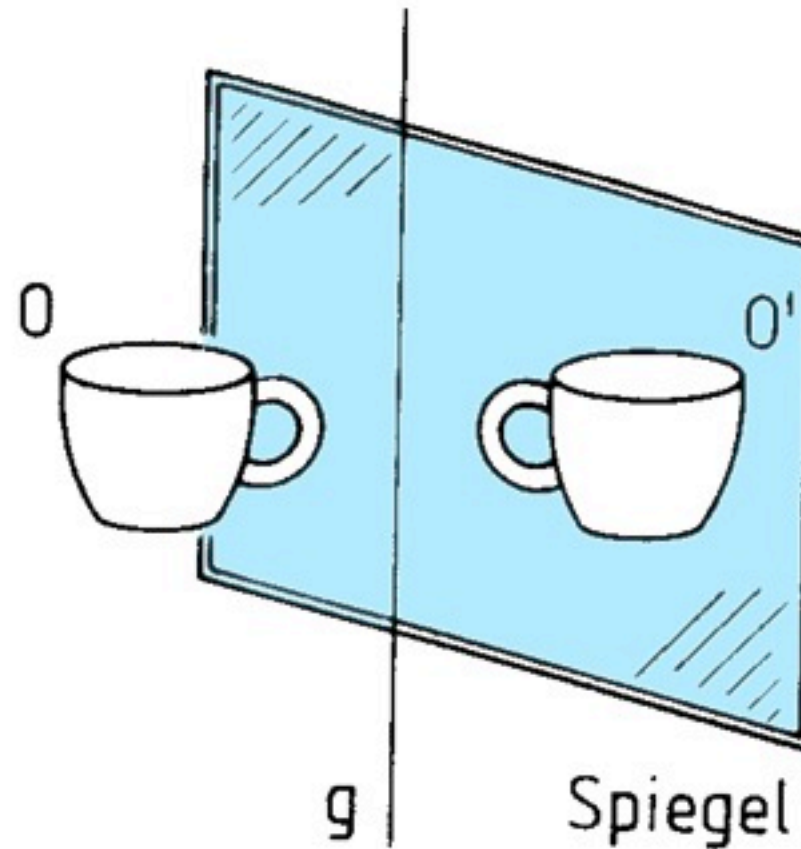
Objekte mit “Händigkeit”



Spiegel



Spiegel



g

Spiegel

Symmetrien $\leftrightarrow$ Erhaltungsgrößen

Symmetrieoperationen	unbeobachtbar	Erhaltungsgröße	
Translationen im Raum	absoluter Ort	Impuls	Klassische kontinuierliche Beispiele
Drehung im Raum	absolute Richtung	Drehimpuls	
Translation in der Zeit	absolute Zeit	Energie	
Eichtransformation (QM)	Phase der Wellenfunktion	el. Ladung	QM
Raumspiegelung	absolute Händigkeit	Parität P	Diskrete Operationen
Materie – Antimaterie	Materieart	C-Parität	
Zeitumkehr	absolute Zeitrichtung	T-Parität	

Symmetrien $\leftrightarrow$ Erhaltungsgrößen

Symmetrieoperationen	unbeobachtbar	Erhaltungsgröße	
Translationen im Raum	absoluter Ort	Impuls	Klassische kontinuierliche Beispiele
Drehung im Raum	absolute Richtung	Drehimpuls	
Translation in der Zeit	absolute Zeit	Energie	
Eichtransformation (QM)	Phase der Wellenfunktion	el. Ladung	QM
Raumspiegelung	absolute Händigkeit	Parität P	Diskrete Operationen
Materie – Antimaterie	Materieart	C-Parität	
Zeitumkehr	absolute Zeitrichtung	T-Parität	

P: $\vec{r} \rightarrow -\vec{r} \quad ; \quad \vec{p} \rightarrow -\vec{p}$

C: $Q \rightarrow -Q \quad ; \quad B \rightarrow -B \quad ; \quad S \rightarrow -S$

T: $t \rightarrow -t \quad ; \quad \vec{r} \rightarrow \vec{r} \quad ; \quad \vec{p} \rightarrow -\vec{p}$

Symmetrien $\leftrightarrow$ Erhaltungsgrößen

Symmetrieoperationen	unbeobachtbar	Erhaltungsgröße	
Translationen im Raum	absoluter Ort	Impuls	Klassische kontinuierliche Beispiele
Drehung im Raum	absolute Richtung	Drehimpuls	
Translation in der Zeit	absolute Zeit	Energie	
Eichtransformation (QM)	Phase der Wellenfunktion	el. Ladung	QM
Raumspiegelung	absolute Händigkeit	Parität P	Diskrete Operationen
Materie – Antimaterie	Materieart	C-Parität	
Zeitumkehr	absolute Zeitrichtung	T-Parität	

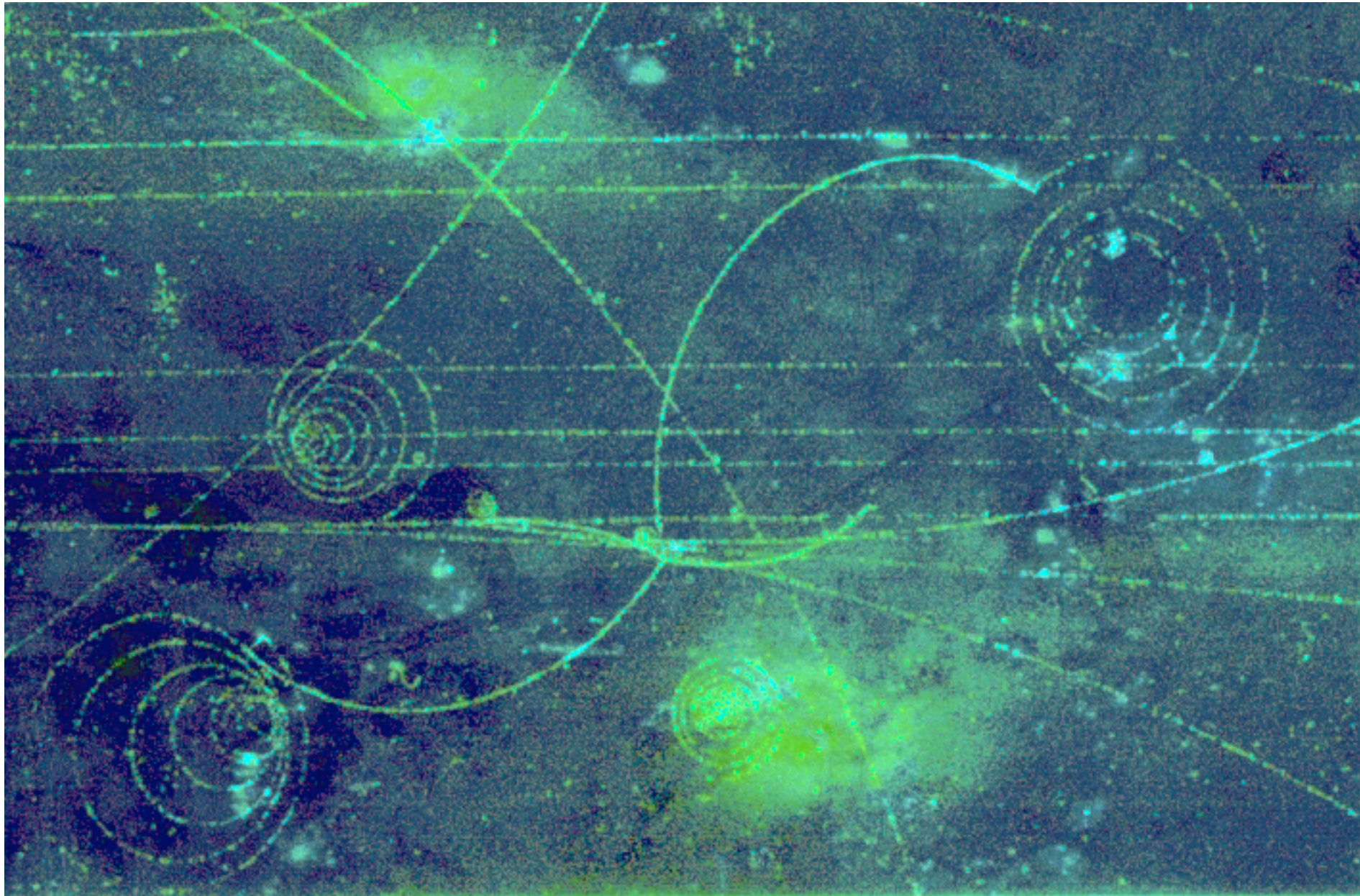
P: $\vec{r} \rightarrow -\vec{r} \quad ; \quad \vec{p} \rightarrow -\vec{p}$

C: $Q \rightarrow -Q \quad ; \quad B \rightarrow -B \quad ; \quad S \rightarrow -S$

T: $t \rightarrow -t \quad ; \quad \vec{r} \rightarrow \vec{r} \quad ; \quad \vec{p} \rightarrow -\vec{p}$

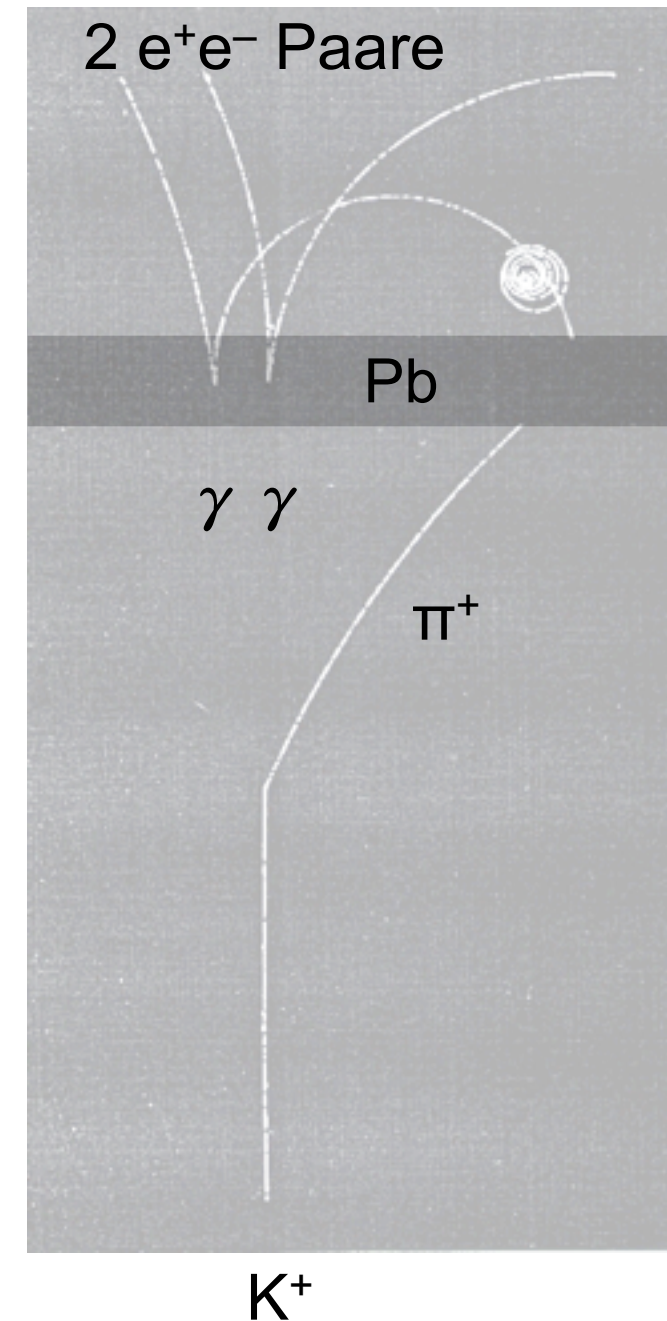
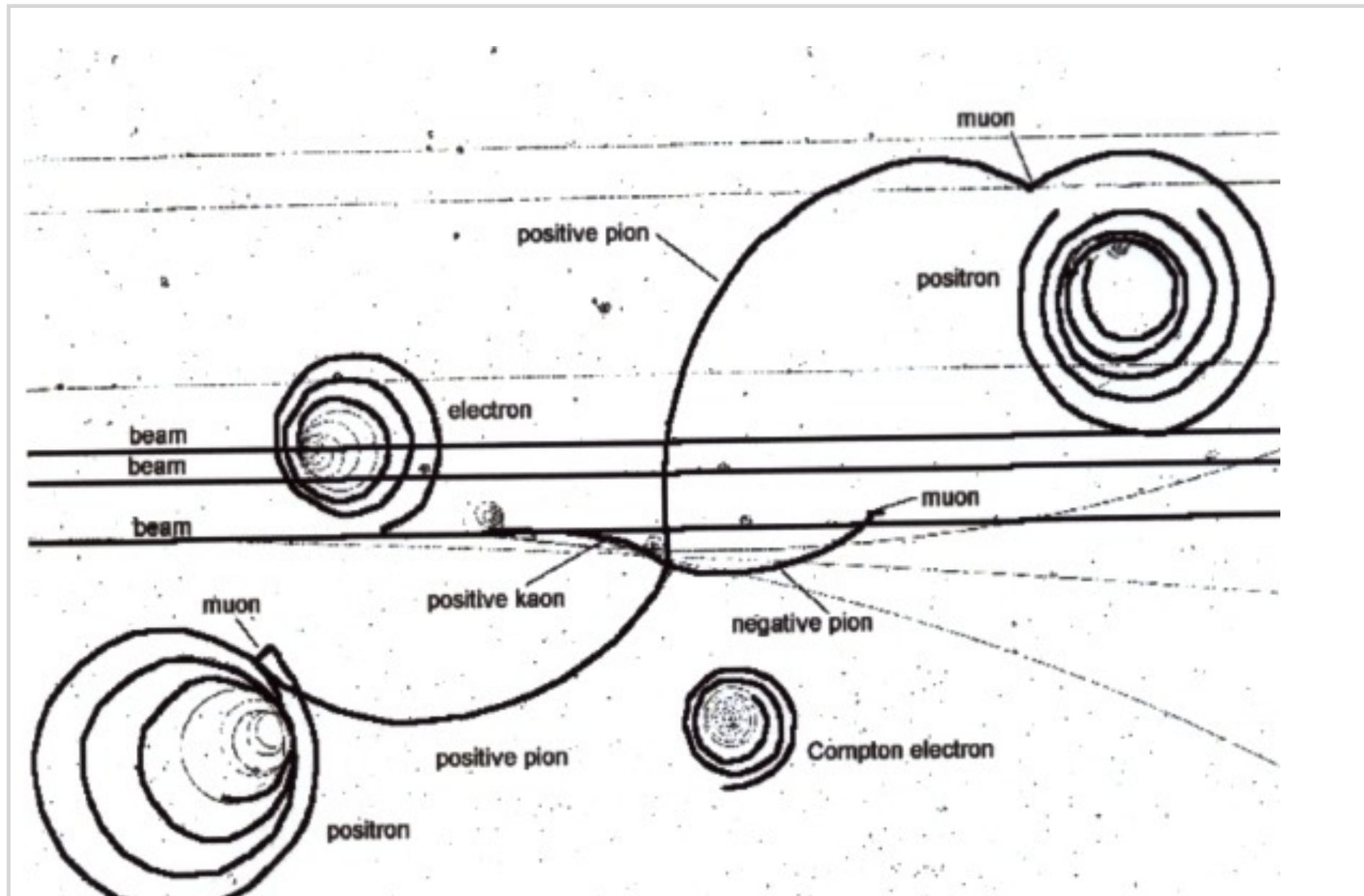
Bis ~1957 wurden die Naturgesetze für symmetrisch unter P gehalten...

Das θ - τ -Puzzle



Paritätseigenwerte von Teilchen?

Das θ - τ -Puzzle



$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$

gleiche Masse, Lebensdauer...
verschiedene Paritäten im
Endzustand?

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$$

Paritätsverhalten phys. Größen

Impuls (Polarvektor)

1⁻ Vektor

$$\hat{P} \vec{x} = -\vec{x}$$

$$\hat{P} \vec{p} = -\vec{p}$$

Drehimpuls (Axialvektor)

1⁺ Axialvektor

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

$$\hat{P} \vec{L} = \vec{L}$$

$$\hat{P} (\vec{r} \times \vec{p}) = (-\vec{r}) \times (-\vec{p}) = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{L}$$

Energie (Skalar)

0⁺ Skalar

$$\hat{P}(E) = E$$

Helizität (Pseudoskalar)

0⁻ Pseudoskalar

$$\lambda = \vec{s} \cdot \vec{p}$$

$$\begin{aligned} \hat{P}(\lambda) &= P(\vec{s} \cdot \vec{p}) = P\vec{s} \cdot P\vec{p} = \vec{s} \cdot (-\vec{p}) \\ &= -\lambda \end{aligned}$$

Sturz der Parität

- 1956: T.D. Lee & C.N. Yang schlagen experimentelle Tests vor, ob die **Parität P durch die schwache Wechselwirkung verletzt wird**

“In strong interactions, ... there were indeed many experiments that established parity conservation to a high degree of accuracy...”

“to decide unequivocally whether parity is conserved in weak interactions, one must perform an experiment to determine whether weak interactions differentiate the right from the left”

Question of Parity Conservation in Weak Interactions

T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. 104 (1956) 254

"for their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary particles"



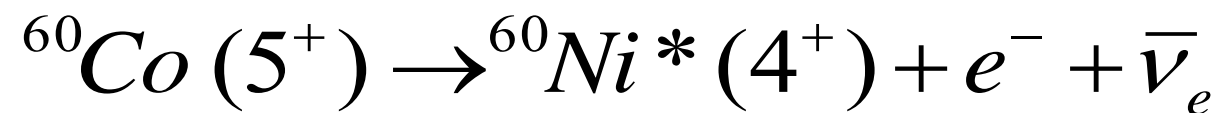
Nobelpreis
1957



Tsung-Dao Lee Chen Ning Yang

Wu-Experiment zur Paritätsverletzung

- C.S. Wu et al. untersuchen den Kern- β -Zerfall von ^{60}Co zum Test der Erhaltung der **Parität in der schwachen Wechselwirkung**
Fragestellung: gibt es eine Vorzugsrichtung der beim β -Zerfall emittierten Elektronen relativ zum Spin des ^{60}Co Kerns?
ja: Parität ist verletzt, **nein**: Parität ist erhalten

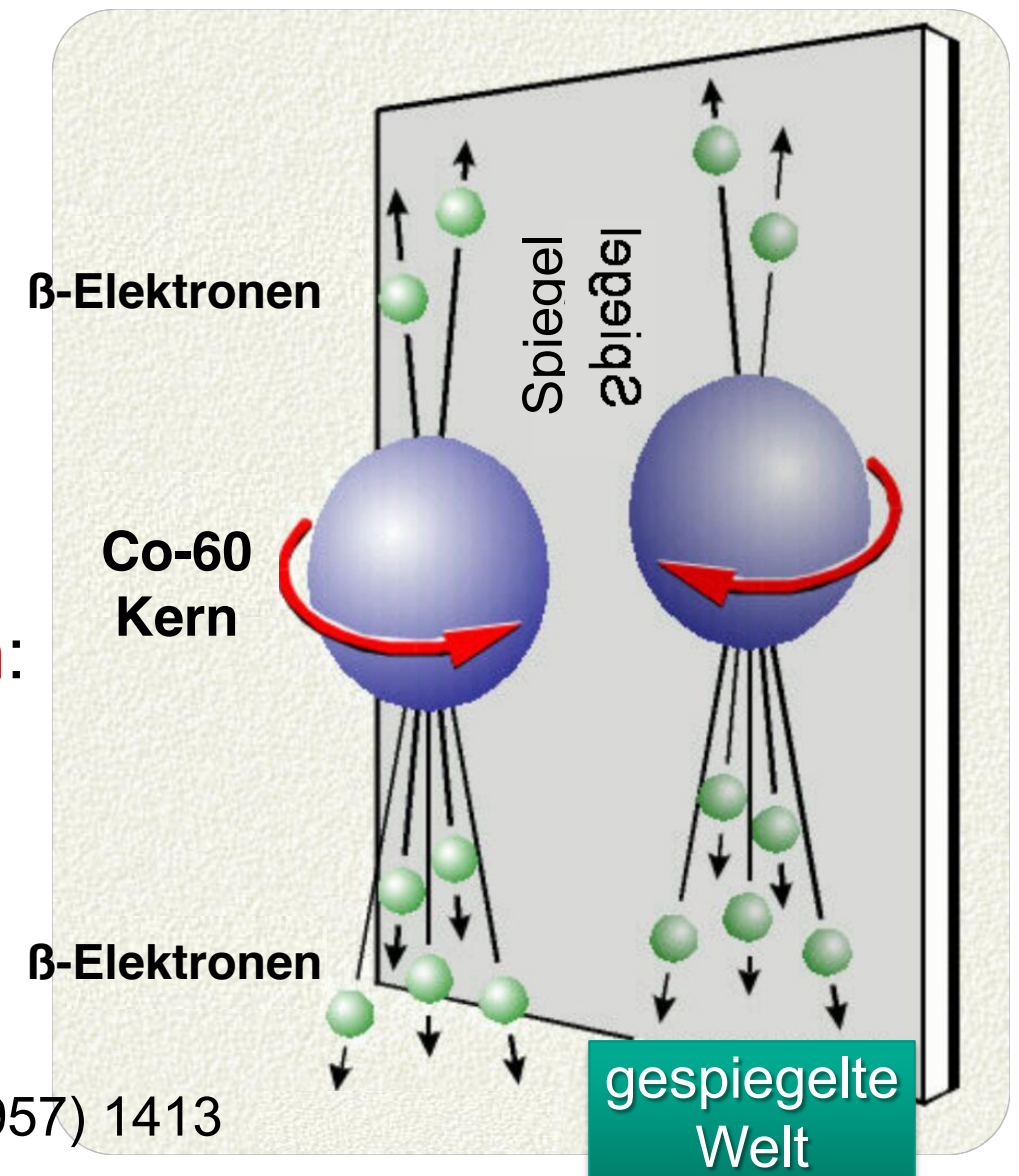


Chien-Shiung Wu
(1912-1997) 吴健雄

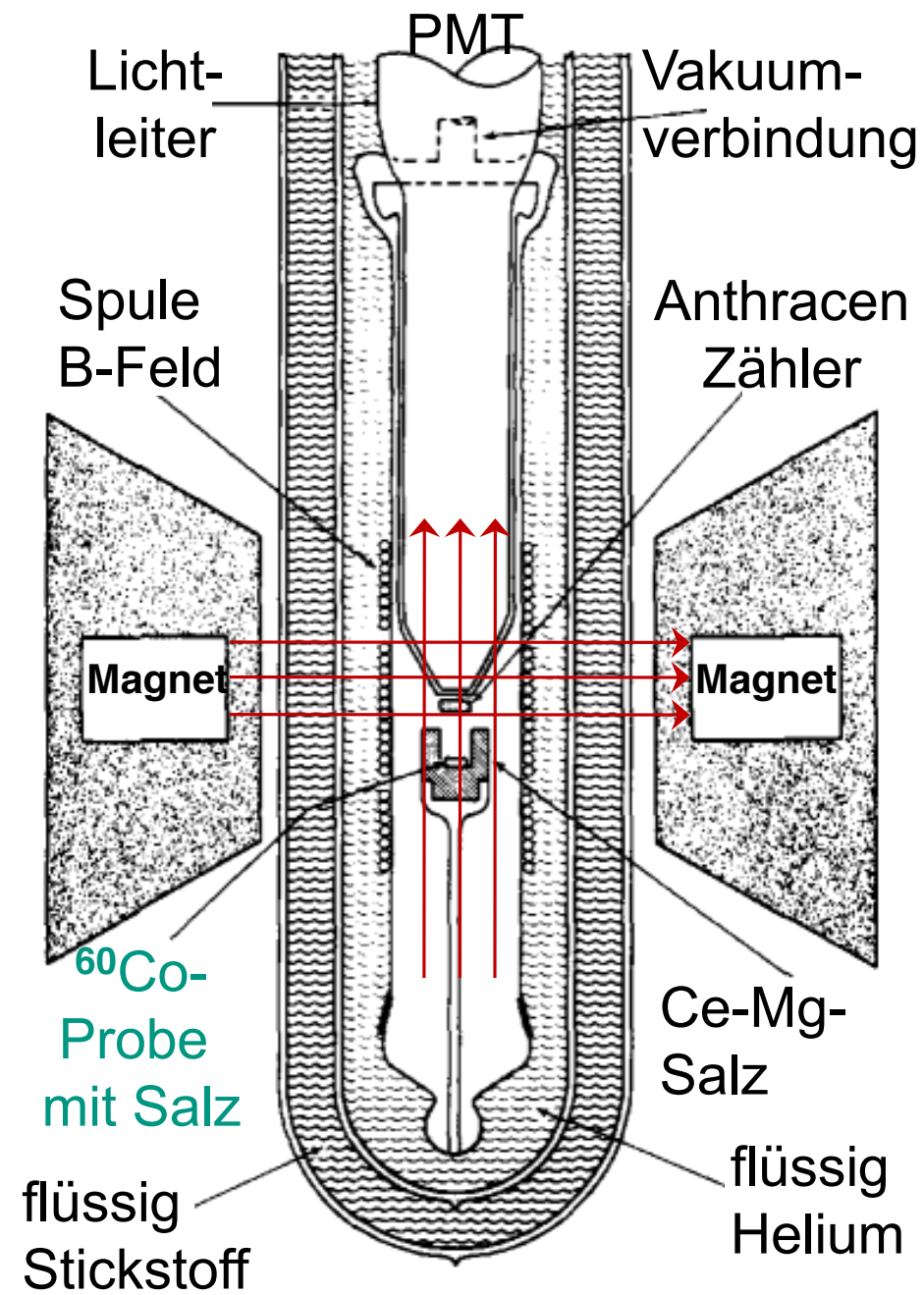
- techn. Herausforderung:
Ausrichtung der ^{60}Co -Kerne bei sehr tiefen Temperaturen:
Prinzip der „adiabatischen Entmagnetisierung“

Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay

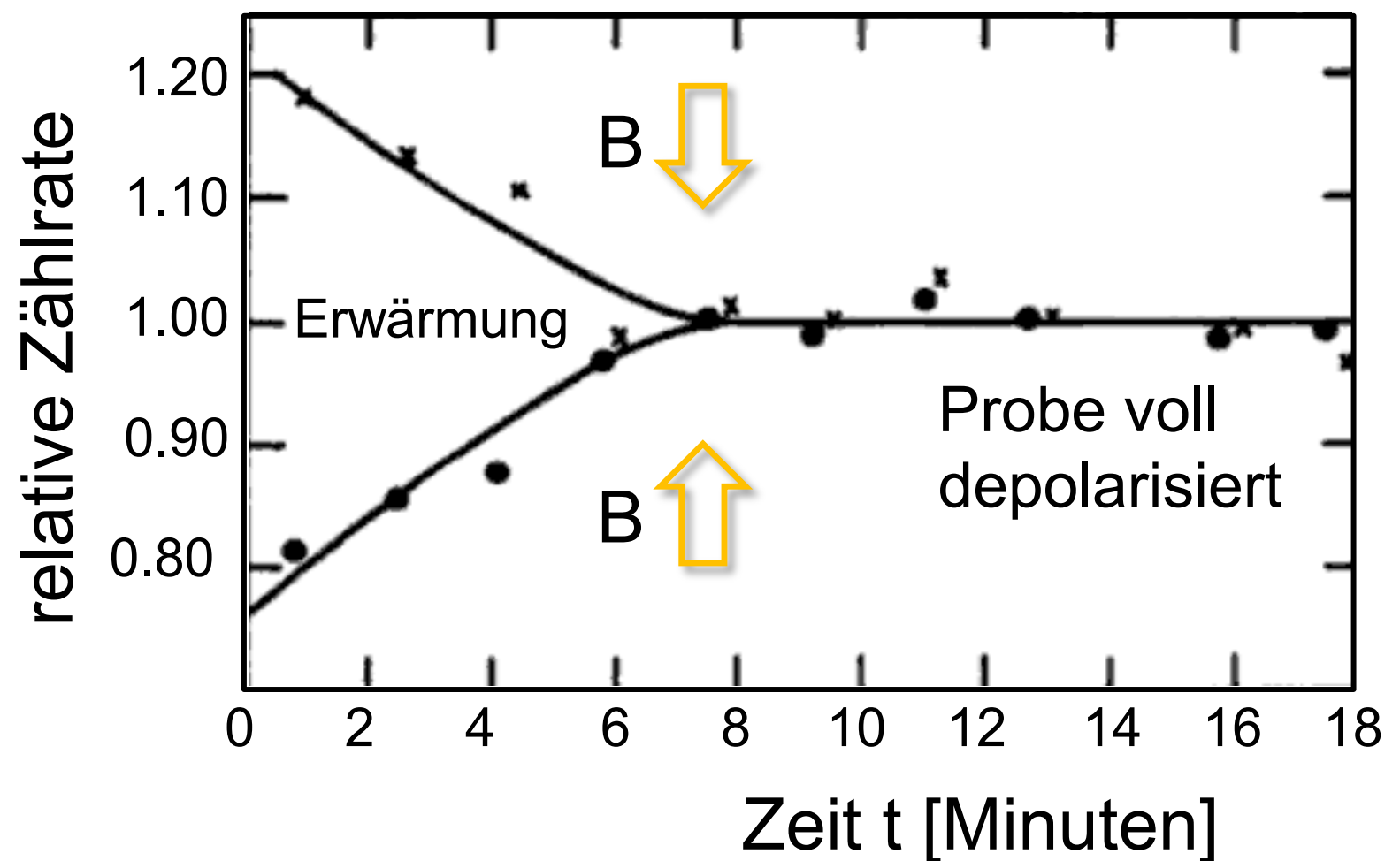
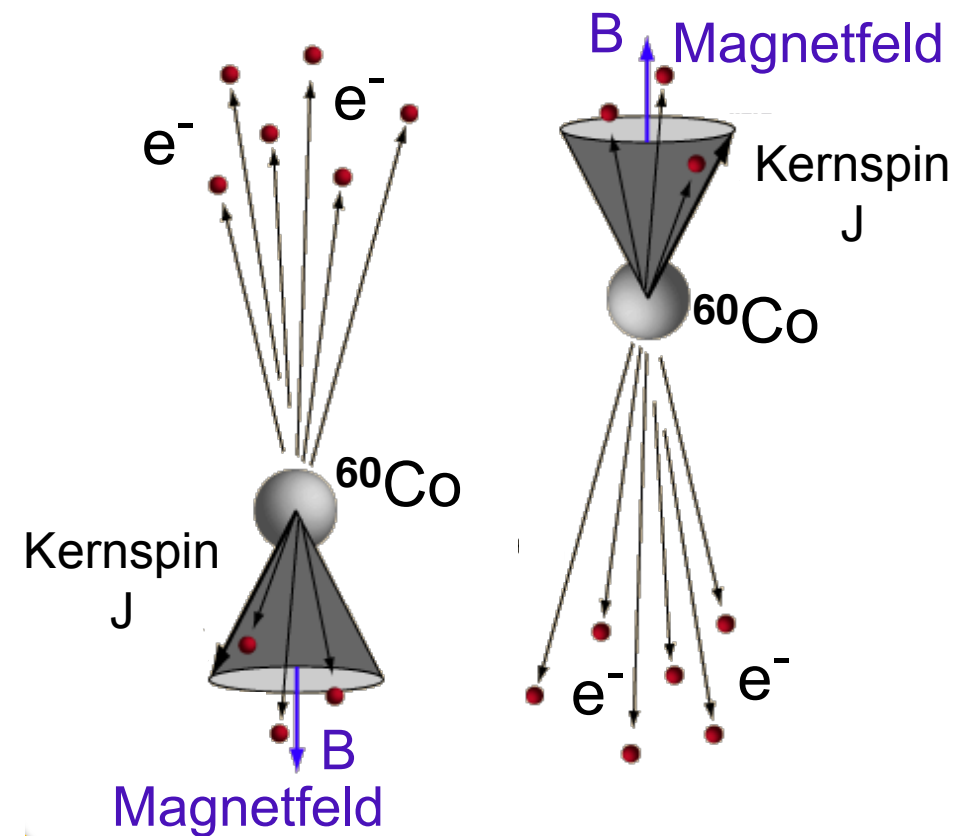
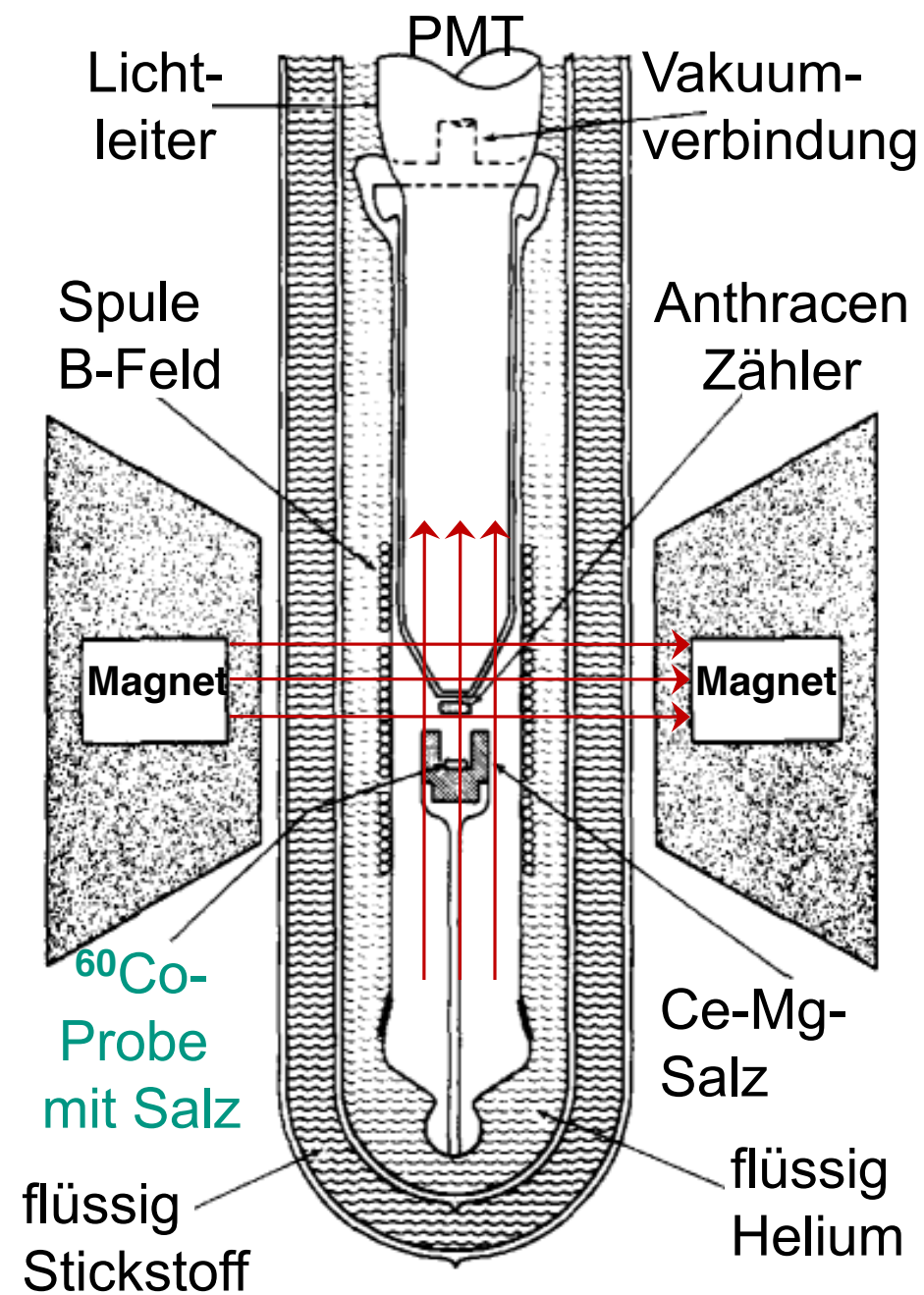
C. S. Wu et al., Phys. Rev. 105 (1957) 1413



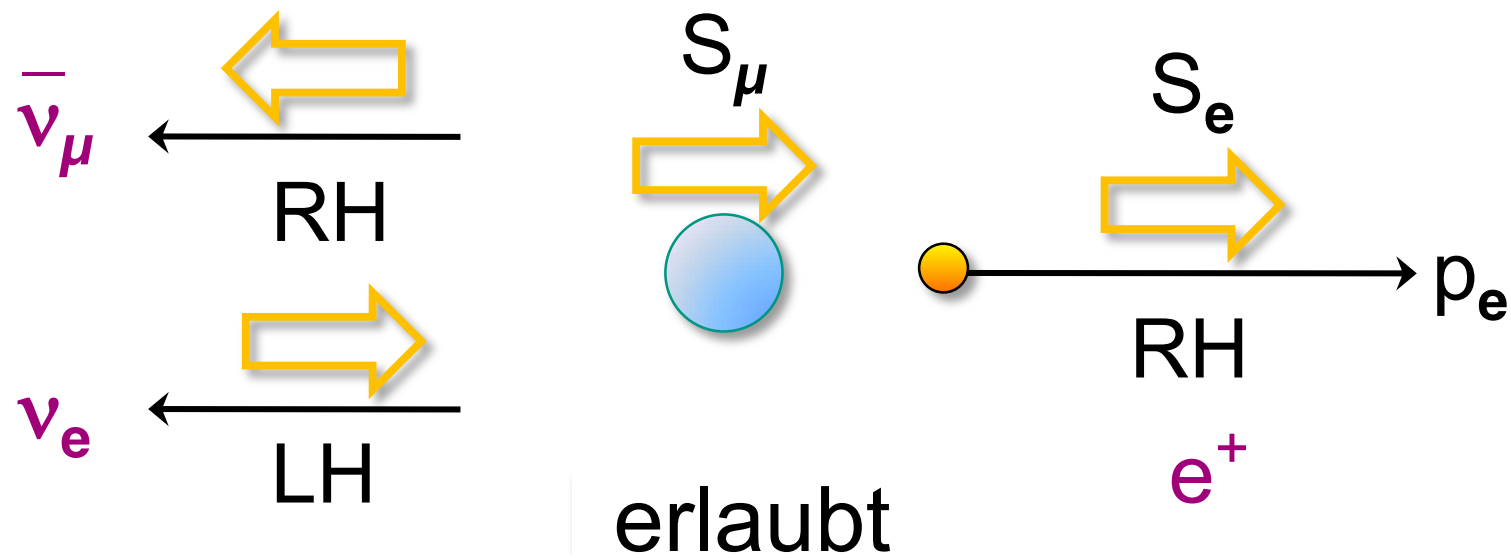
Wu-Experiment



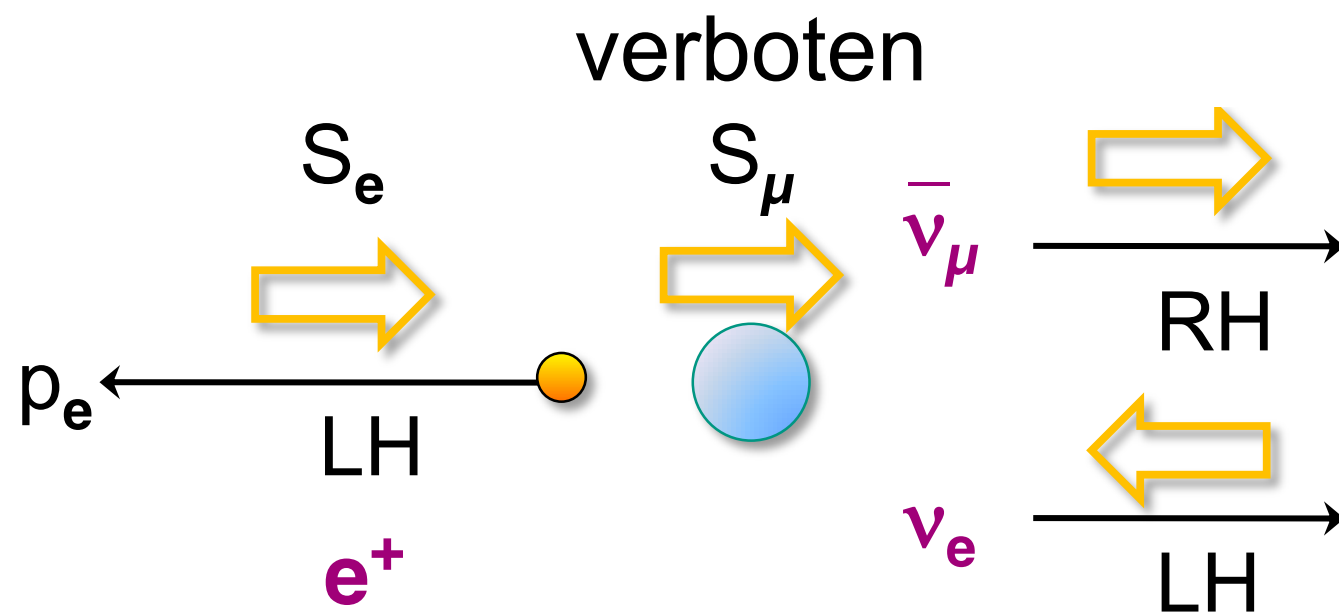
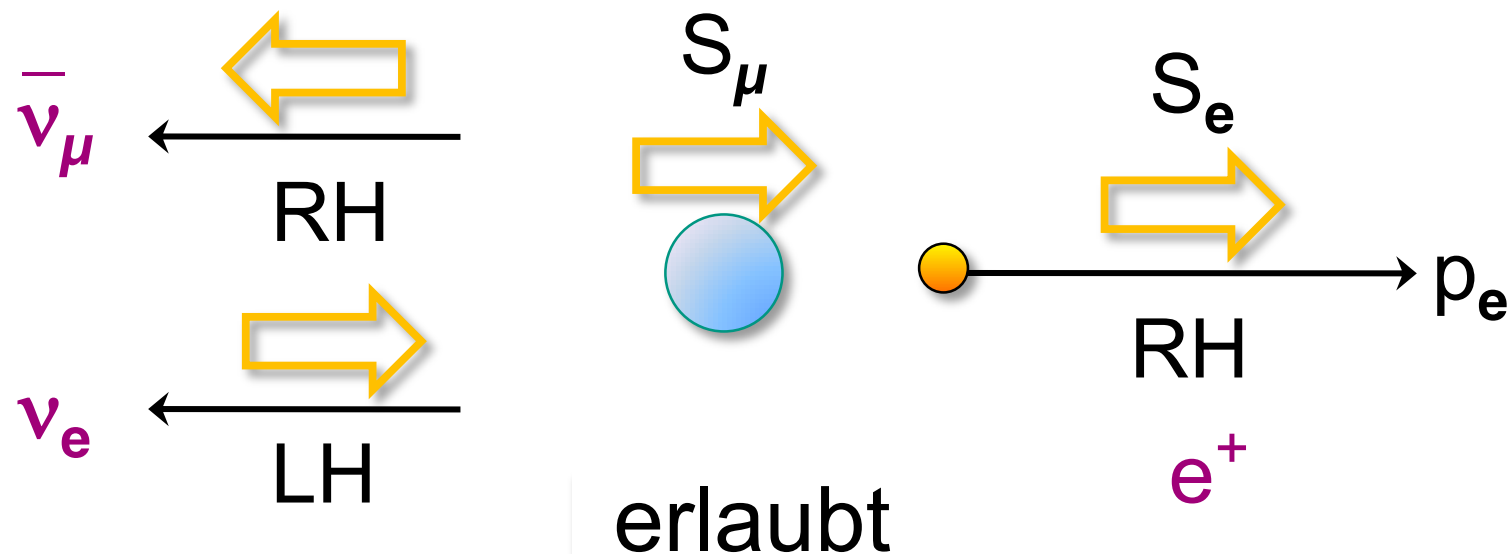
Wu-Experiment



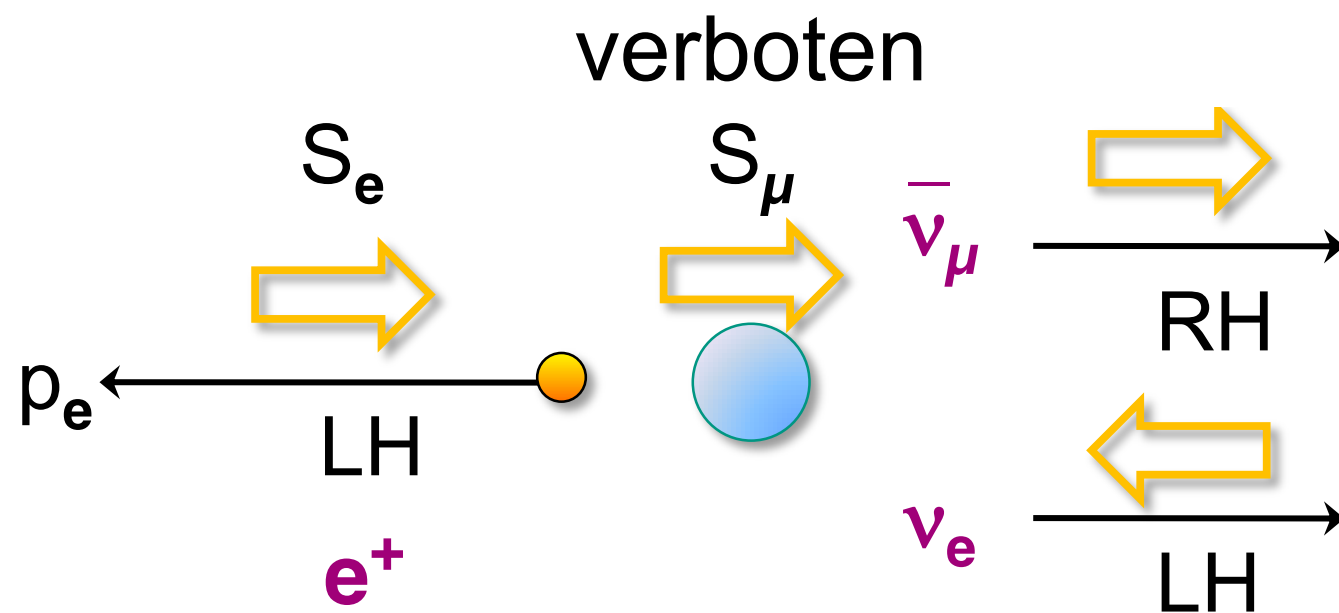
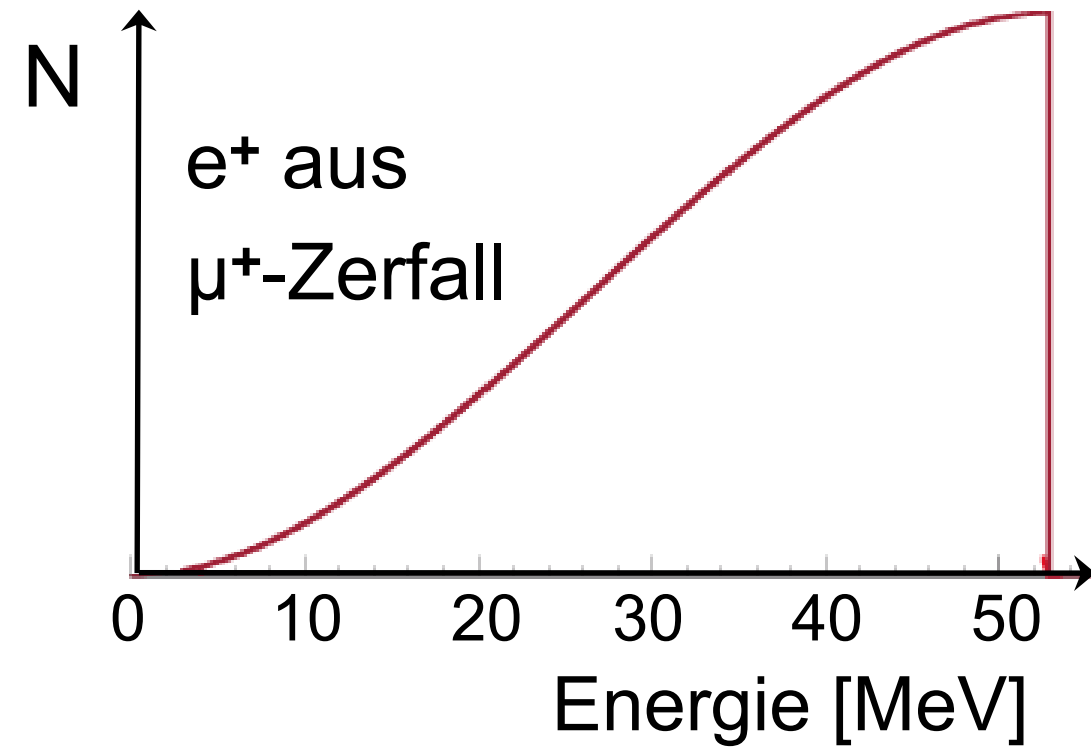
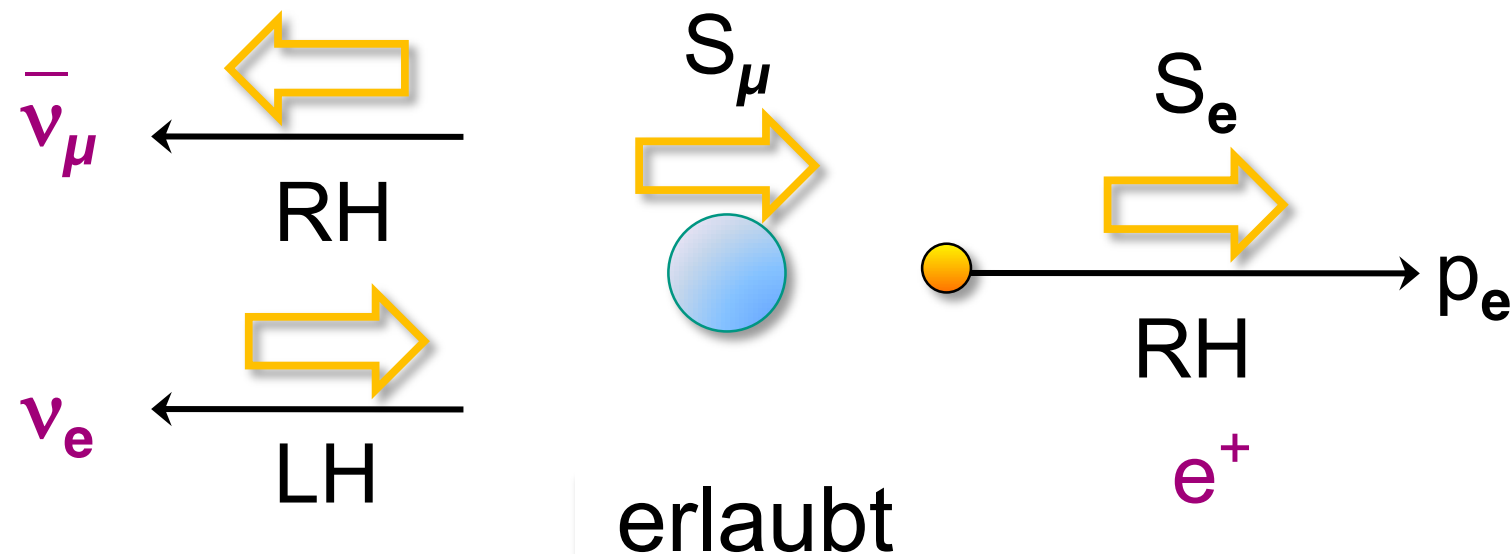
μ^+ -Zerfall



μ^+ -Zerfall

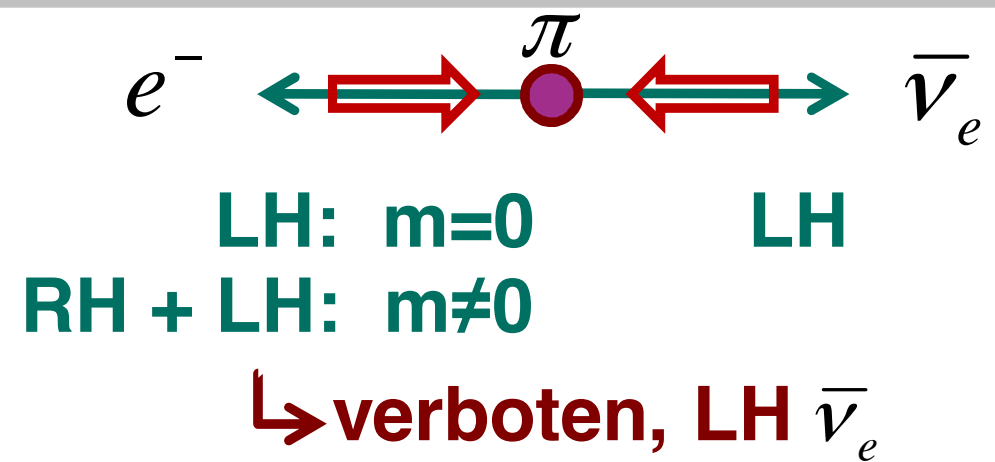
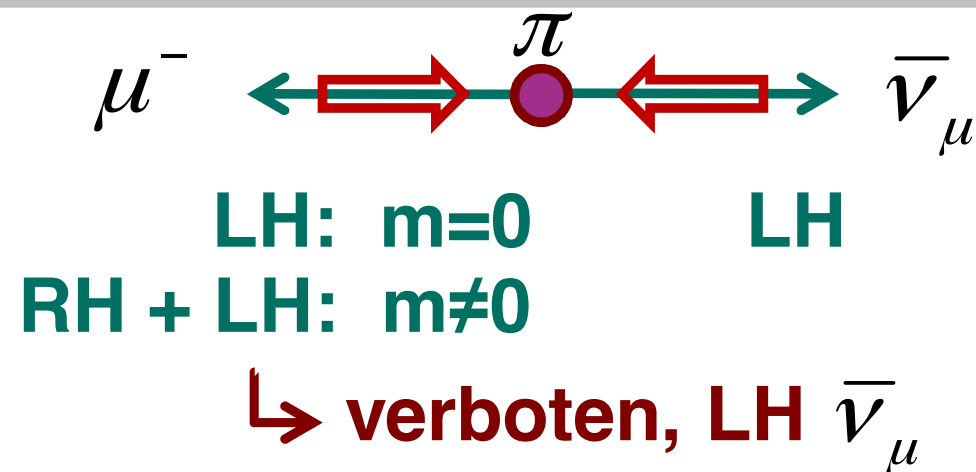
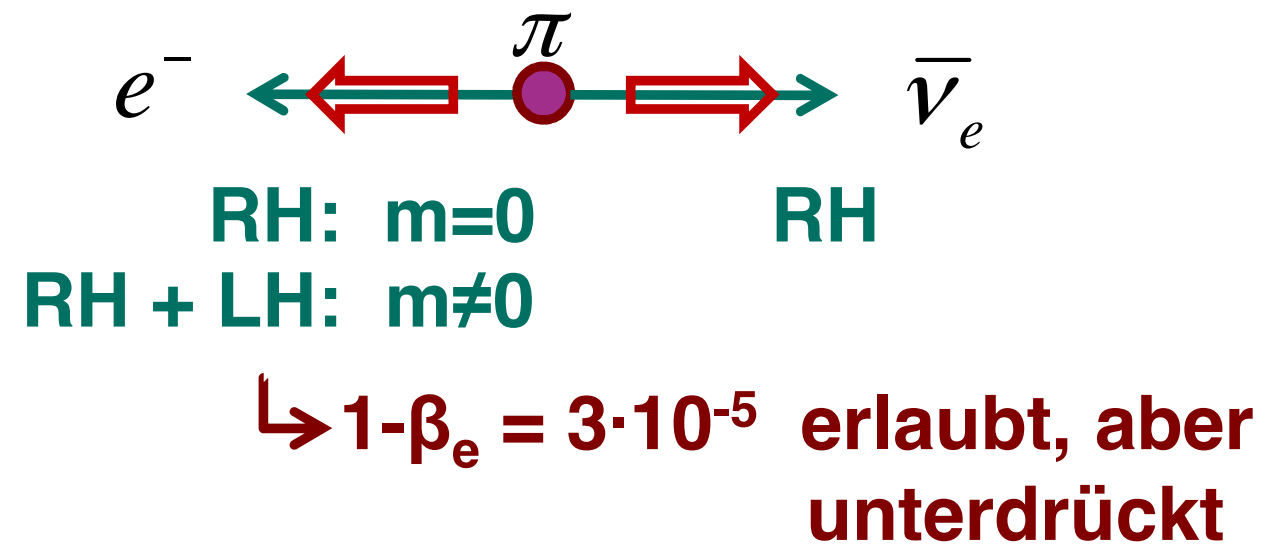
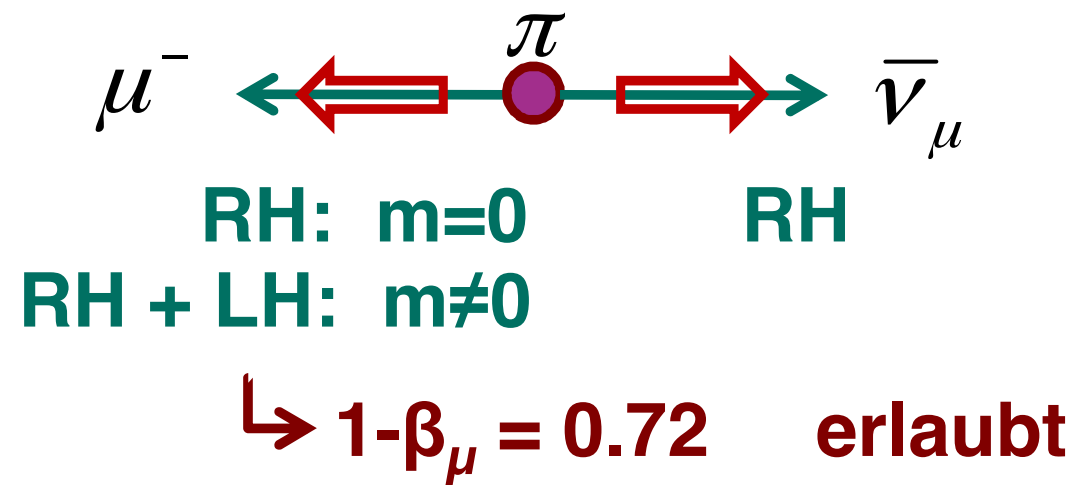


μ^+ -Zerfall



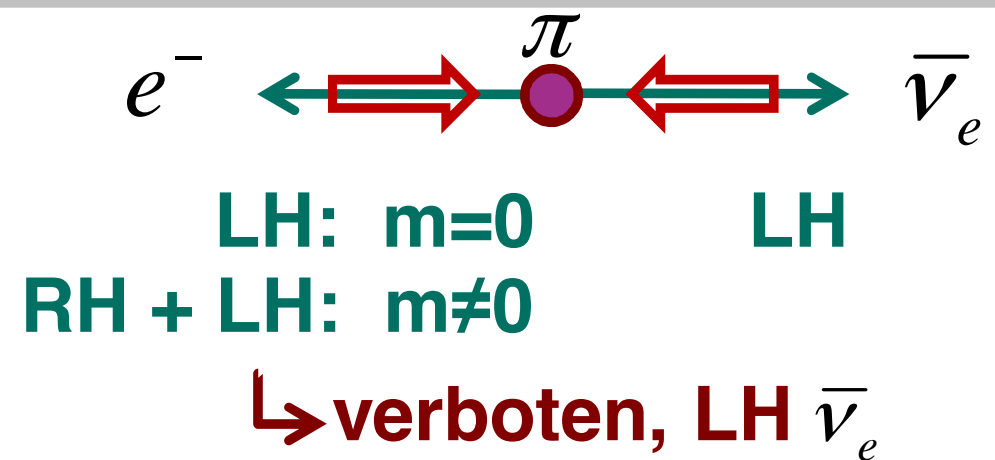
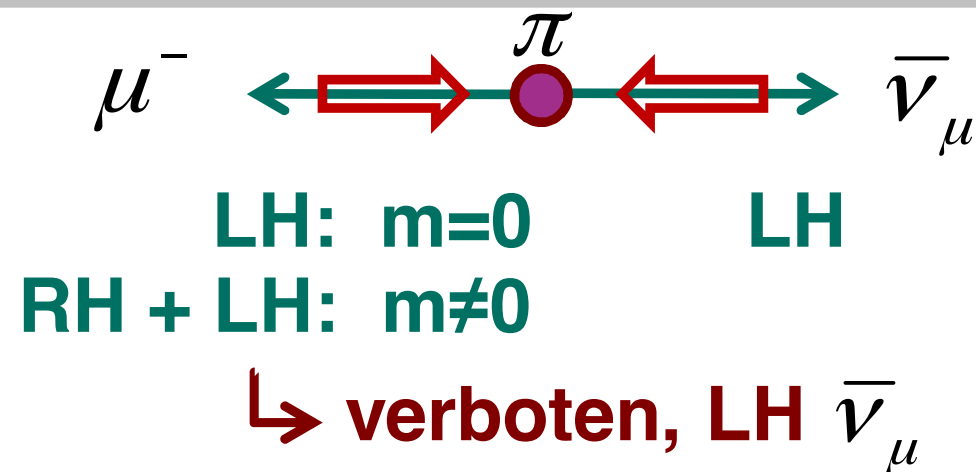
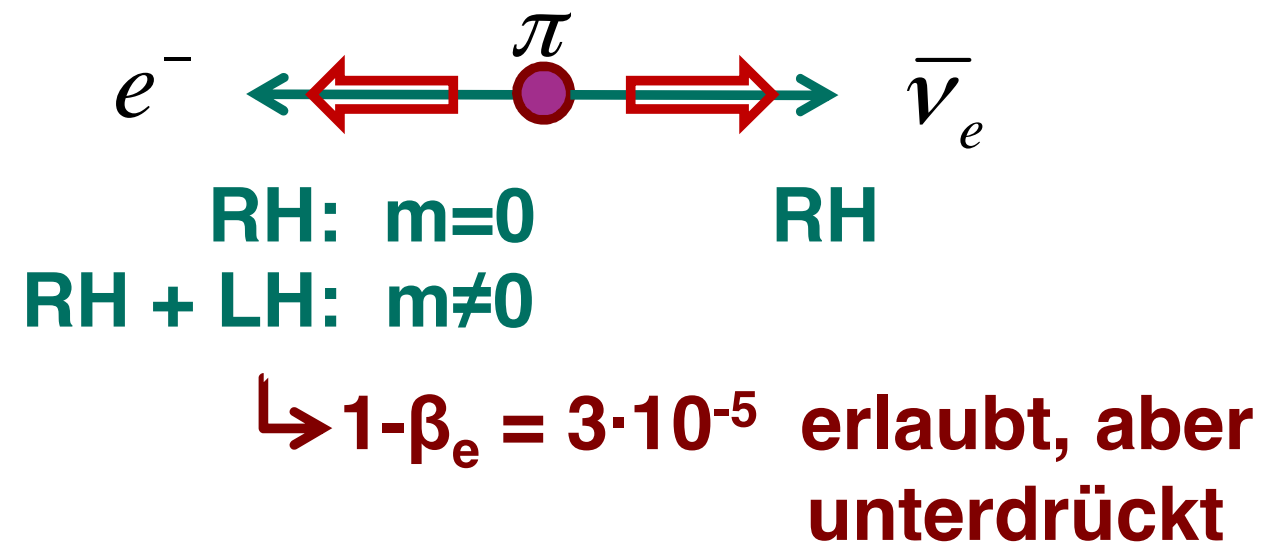
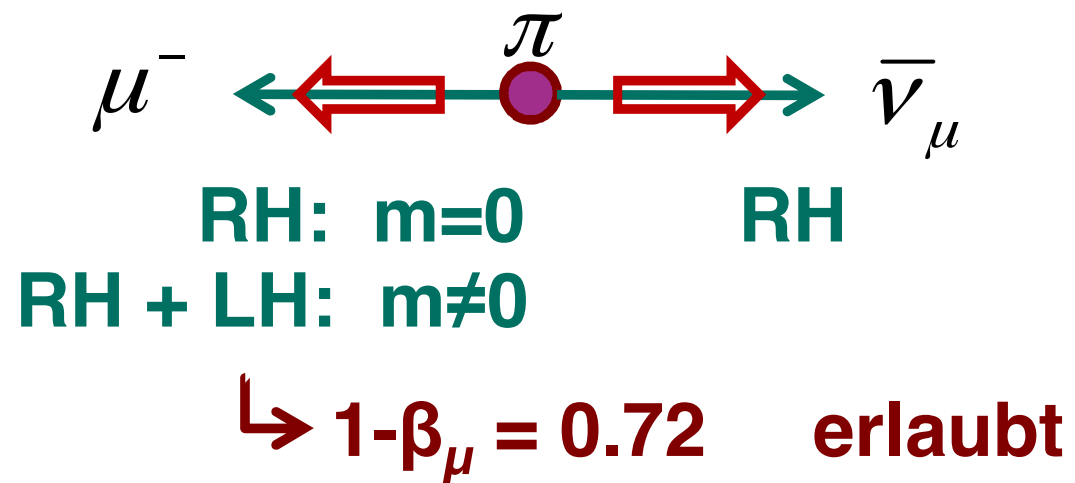
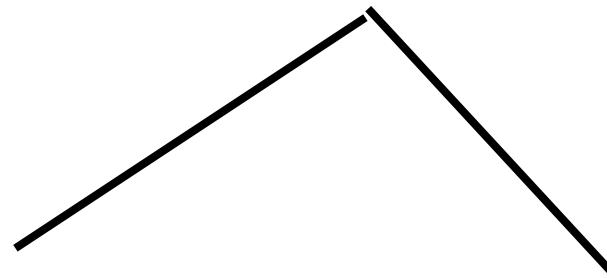
Spektrum: " e^+ geht bevorzugt mit max. Energie entgegen den Neutrinos weg"

Pionzerfall



Pionzerfall

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \frac{1}{8000}$$



Ladungskonjugation

Ladungskonjugation C (C-Parität) : diskrete Symmetrie $\Leftrightarrow$ multiplikative Quantenzahl, C angewandt auf Felder/Kräfte: $\vec{B} \rightarrow -\vec{B}$, $\vec{E} \rightarrow -\vec{E}$, $\vec{F} \rightarrow \vec{F}$

Teilchen-Antiteilchen Transformation mit der Änderung von allen ladungsartigen Quantenzahlen: $+Q \leftrightarrow -Q$, $+\mu \leftrightarrow -\mu$, $+B \leftrightarrow -B$, $+S \leftrightarrow -S$, ...
 $\Rightarrow$ alle Teilchen mit $B, S, Q \neq 0$ sind keine Eigenzustände von C

selbst-konjugierte Zustände

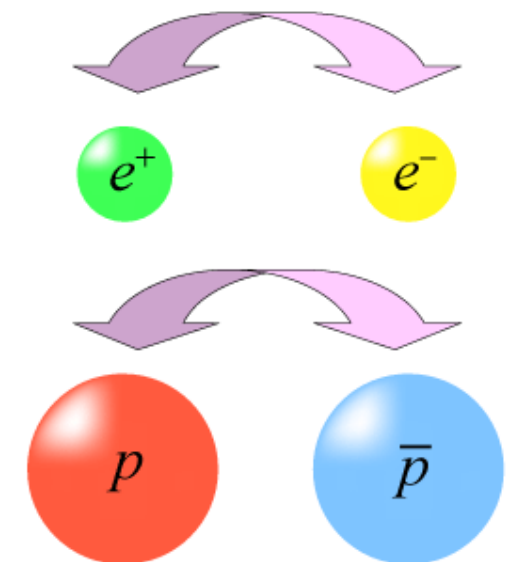
neutrale Teilchen ($Q = B = S = L = 0$) sind Eigenzustände von C mit der **Eigenparität +1, -1** da $C^2 |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$

Photon γ :

$C |\gamma\rangle = - |\gamma\rangle$ da Potenziale ($\phi \rightarrow -\phi$, $\vec{A} \rightarrow -\vec{A}$) bei $+Q \rightarrow -Q$
 $J^{PC} (\gamma) = 1^{--}$

neutrales π^0 :

$C |\pi^0\rangle = + |\pi^0\rangle$ da $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ (kein $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \gamma$, b.r. $< 3 \cdot 10^{-8}$)
 $J^{PC} (\pi^0) = 0^{-+}$



Ladungskonjugation

C-Parität von Teilchen - Antiteilchenpaaren :

in Teilchenreaktionen werden oft Teilchen-Antiteilchen-Paare $T\bar{T}$ erzeugt, diese sind selbstkonjugiert und Eigenzustände von C

$$C(T\bar{T}) = (-1)^{\ell+s} \quad \text{relativer Bahndrehimpuls } \ell, \text{ Spin } s$$

$$|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle) \quad \text{pseudoskalares Pion mit } s = 0, \ell = 0 \quad C = (-1)^0 = +1$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} + u\bar{u}\rangle \quad \omega\text{-Vektormeson mit } s = 1, \ell = 0 \quad C = (-1)^1 = -1$$

Zeitumkehr (1): in e.m. und starker WW erhalten

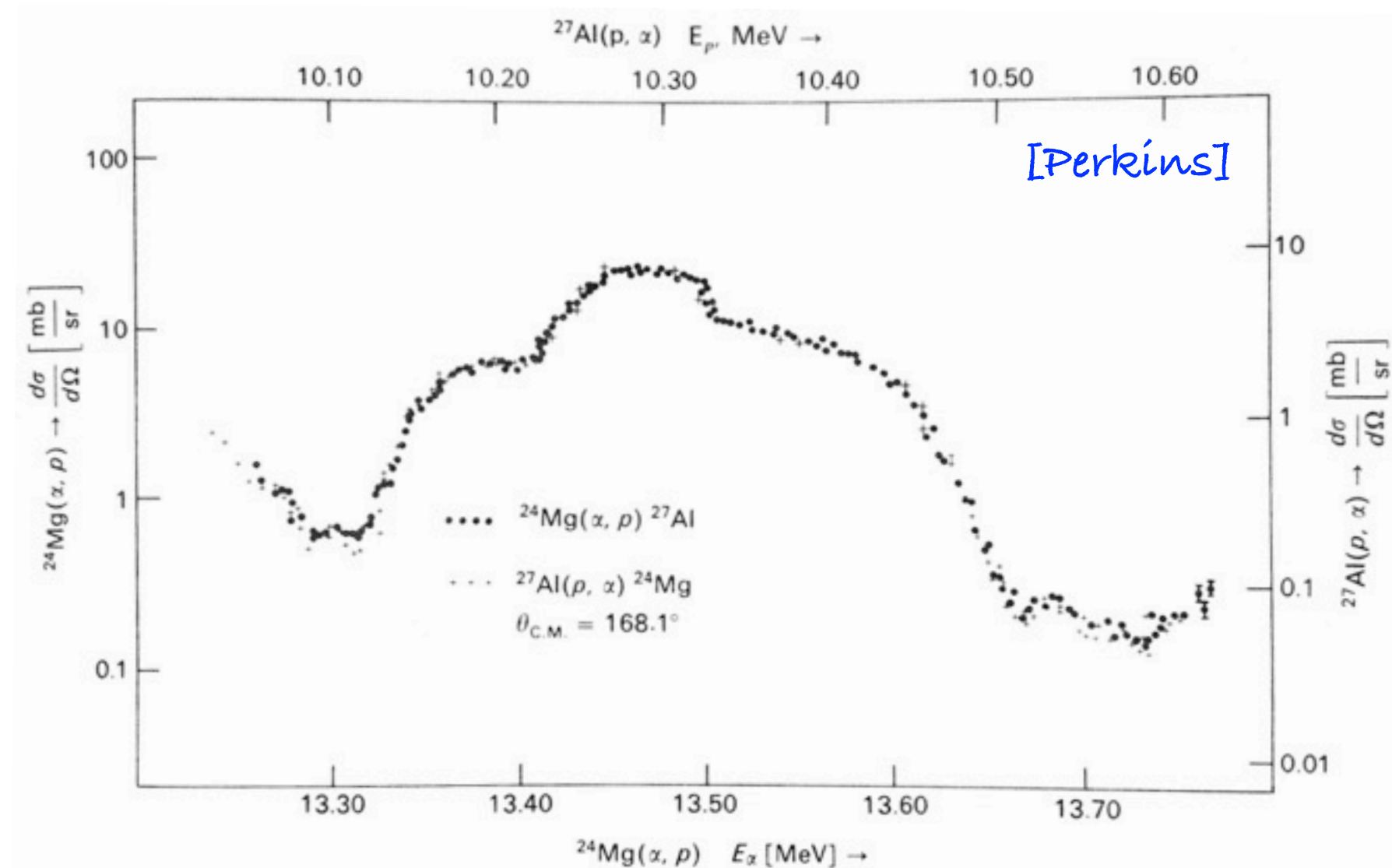
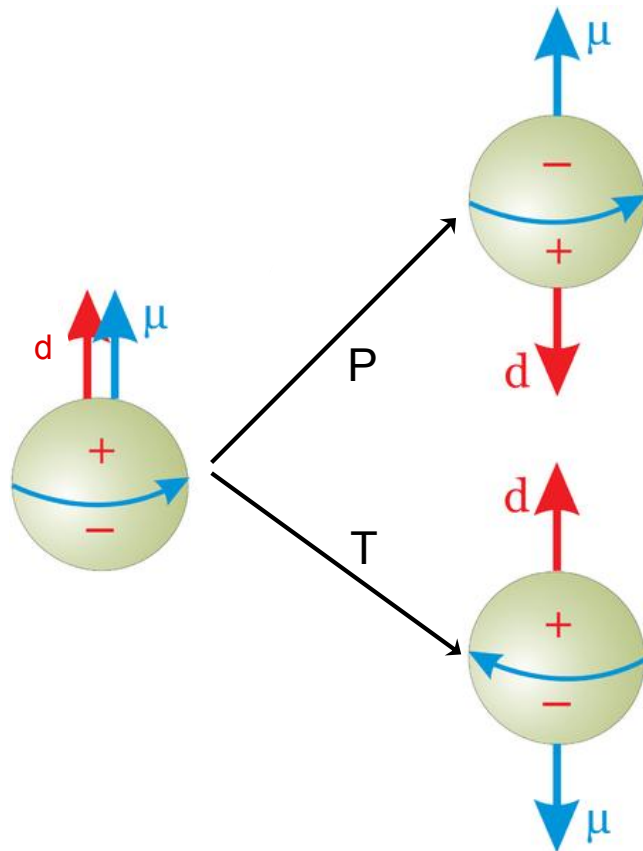


Abbildung 3.9 Der differentielle Wirkungsquerschnitt für die Reaktion $^{24}\text{Mg}(\alpha, p)^{27}\text{Al}$ und die Umkehrreaktion, gemessen von Von Witsch et al., (1968).

*T-verletzende-Amplitude < 0.3% der
T-erhaltenden Amplitude*

ein elektrisches
Dipolmoment (EDM) eines
kugelsymmetrischen
Teilchens wäre T-
verletzend, Limit für
Neutronen < 3e-26 e cm