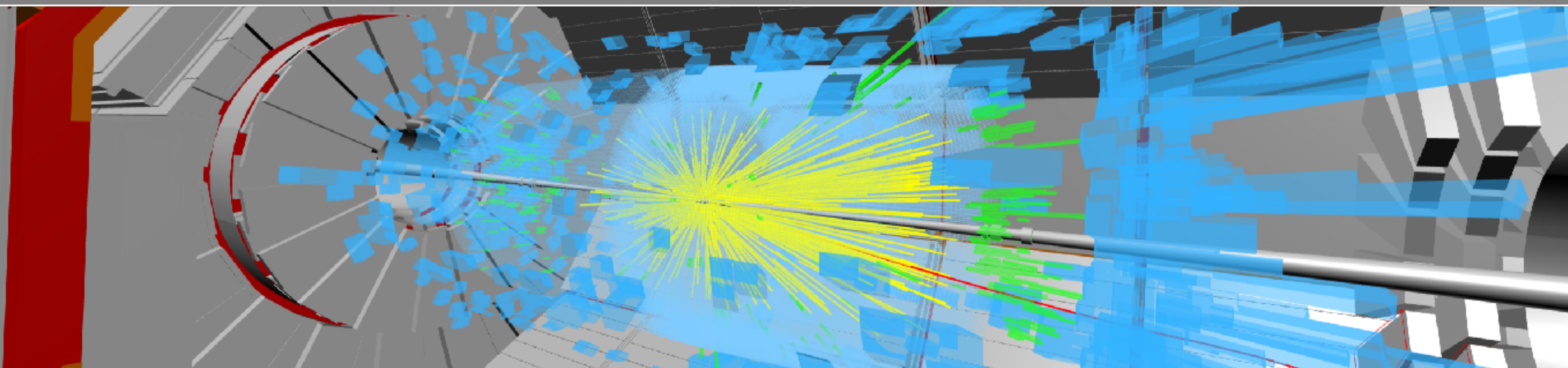


# Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

**Karlsruher Institut für Technologie**  
**Sommersemester 2020 – 10. Vorlesung (Teil 1)**

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



# Wiederholung: Symmetrien & Quantenzahlen

- Symmetrien: **diskret** vs. **kontinuierlich**, **global** vs. **lokal**
- Noether-Theorem: Verbindung von Symmetrien und **Erhaltungssätzen**
- Quantenmechanik: Verbindung von Symmetrien mit **Quantenzahlen**
- Symmetrien und Quantenzahlen im Standardmodell:
  - **Eichsymmetrien**: lokale kontinuierliche Symmetrien → Dynamik
  - **Diskrete** Symmetrien C, P, T und Kombinationen
  - **Intrinsische** Quantenzahlen der Quarks, Hadronen und Leptonen:  
Ladung, schwacher Isospin, schwache Hyperladung, Farbladung,  
Baryonenzahl, Leptonen(familien-)zahl, Flavorquantenzahlen

# Wiederholung: diskrete Symmetrien

- Ladungskonjugation C: **Teilchen  $\leftrightarrow$  Antiteilchen**
  - Eigenzustände: neutrale Teilchen und Teilchen-Antiteilchen-Paare
- Parität P: **Punktspiegelung am Ursprung**
  - Eigenwerte für Skalar:  $P = +1$ , Pseudoskalar:  $P = -1$ , Vektor:  $P = -1$ , Axialvektor:  $P = +1$
  - Fundamentale Teilchen: **Eigenparität** (absolutes Vorzeichen: Konvention)
  - **Helizität und Chiralität** ( $\rightarrow$  nächste Folie)
- Zeitumkehr T: **derselbe Wirkungsquerschnitt** für Hin-/Rückreaktion
- Diskrete Symmetrien C, P, T: **erhalten in starker und elektromagnetischer Wechselwirkung, verletzt in schwacher Wechselwirkung**

# Wiederholung: Helizität & Chiralität

	Helizität	Chiralität
relevante Größe	relative Ausrichtung von Spin und Impuls	Kopplung ans W-Boson
Operator	$h = (\mathbf{s} \cdot \mathbf{p})/ \mathbf{s}  \mathbf{p} $	$\gamma^5$
Interpretation	Drehsinn im physikalischen Raum	abstrakte Händigkeit in Raum der Spinoren
Paritätstransformation	$LH \leftrightarrow RH$ (nicht lorentzinvariant)	$L \leftrightarrow R$ (lorentzinvariant)

- Helizität  $\neq$  Chiralität für massive Teilchen
- Helizität und Chiralität identisch für masselose Teilchen

# Auflösung Aufgabe 18

- Welche Aussagen über die C-, P- und T-Symmetrie sind korrekt?
- A. Neutrale Teilchen sind Eigenzustände der Ladungskonjugation, Teilchen mit ladungsartigen Quantenzahlen ungleich Null nicht.
  - B. Ist eine physikalische Theorie nicht zeitumkehrinvariant, sind die Wirkungsquerschnitte für Hin- und Rückreaktion unterschiedlich.
  - C. Die Eigenparität von Teilchen und Antiteilchen ist gleich.
  - D. Im Grenzfall masseloser Teilchen sind Chiralität und Helizität gleich.
  - E. Die Chiralität ist eine gute Quantenzahl, aber nicht lorentzinvariant.

## Kapitel 5

# Symmetrien und Erhaltungssätze

## Kapitel 5.3

# Schlüsselexperimente zur C-, P- und CP-Verletzung

# Theta-Tau-Rätsel

- Annahme (ca. 1950): alle Wechselwirkungen **erhalten** Parität
- Beobachtung zweier unterschiedlicher (?) „seltsamer“ Teilchen (d. h. relativ lange Lebensdauer) → historische Namen:  $\theta^+$ ,  $\tau^+$ 
  - Teilchen **auf gleiche Weise** produziert (in starker Wechselwirkung), mit **derselben Masse** ( $493,7 \text{ MeV}/c^2$ ) und **Lebensdauer** ( $1,24 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ )
  - Zerfall (in schwacher Wechselwirkung) in Endzustände mit **unterschiedlicher Parität**
- Heute:
  - $\theta^+$  und  $\tau^+$  sind **identisch** ( $K^+$ ), aber Parität **verletzt**
  - Historische Namen für andere Teilchen wiederverwendet, z. B. Tau-Lepton

# Theta-Tau-Rätsel

- Beobachtung:  $\theta^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  und  $\tau^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+$

- Paritäten:

- Mit  $P(\pi) = -1$ :  $P(\pi_1 \pi_2) = (-1)^2 \cdot (-1)^{l_{1-2}} \sim$  relativer Bahndrehimpuls,

$$P(\pi_1 \pi_2 \pi_3) = P(\pi_1 \pi_2) \cdot (-1) \cdot (-1)^{l_{12-3}}$$

- Für Paritäts**erhaltung**:

$$\mathcal{J}(\theta^+) = l_{1-2}, \quad \mathcal{J}(\tau^+) = l_{1-2} + l_{12-3}$$

$$\left. \begin{aligned} \sim P(\theta^+) &= (-1)^{\mathcal{J}(\theta^+)} \\ P(\tau^+) &= (-1) \cdot (-1)^{\mathcal{J}(\tau^+)} \end{aligned} \right\} \theta^+ \overset{?}{\neq} \tau^+$$

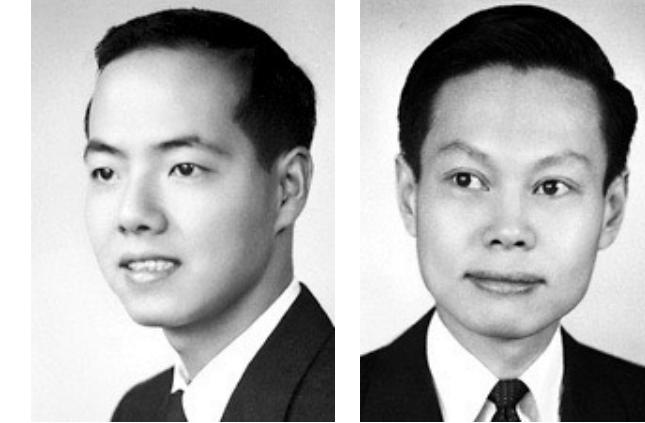
- Ladungskonjugation:

$$\hat{C} |\pi^0\rangle = \hat{C} \frac{1}{\sqrt{2}} |u\bar{u} - d\bar{d}\rangle = + |\pi^0\rangle \sim \hat{C} |\pi^0 \pi^0\rangle = + |\pi^0 \pi^0\rangle$$

$$\hat{C} |\pi^+ \pi^-\rangle = + |\pi^+ \pi^-\rangle$$

# Paritätsverletzung?

- Status vor 1956:
  - Alle bisherigen Experimente zur **starken Wechselwirkung**: Parität erhalten
  - Generelle Erwartung: **Paritätserhaltung** gilt für **alle Wechselwirkungen**, aber: **Theta-Tau-Rätsel** ungelöst
- Idee: (Lee, Yang, Phys. Rev. 104 (1956) 254)
  - Bis 1956: **kein** experimenteller Test der Paritätserhaltung in **schwacher Wechselwirkung**
  - Vorschlag: konstruiere zwei **spiegelbildliche** Experimente zur schwachen Wechselwirkung
  - **Unterschiedliche Resultate → Paritätsverletzung**



T.D. Lee

C.N. Yang

[NobelPrize.org](http://NobelPrize.org)

PHYSICAL REVIEW  
VOLUME 104, NUMBER 1  
OCTOBER 1, 1956

Question of Parity Conservation in Weak Interactions\*

T. D. LEE, Columbia University, New York, New York  
AND  
C. N. YANG,† Brookhaven National Laboratory, Upton, New York  
(Received June 22, 1956)

The question of parity conservation in  $\beta$  decays and in hyperon and meson decays is examined. Possible experiments are suggested which might test parity conservation in these interactions.

PRESENT EXPERIMENTAL LIMIT ON PARITY NONCONSERVATION

If parity is not strictly conserved, all atomic and nuclear states become mixtures consisting mainly of the state they are usually assigned, together with small percentages of states possessing the opposite parity. The fractional weight of the latter will be called  $\delta^2$ . It is a quantity that characterizes the degree of violation of parity conservation.

The existence of parity selection rules which work well in atomic and nuclear physics is a clear indication that the degree of mixing,  $\delta^2$ , cannot be large. From such considerations one can impose the limit  $\delta^2 \leq (r/\lambda)^2$ , where  $r$  is the range of the interaction and  $\lambda$  is the wavelength. In general a less accurate limit obtains for nuclear spectroscopy.

Parity nonconservation implies the existence of interactions which mix parities. The strength of such interactions compared to the usual interactions will in general be characterized by  $\delta$ , so that the mixing will be of the order  $\delta^2$ . The presence of such interactions would affect angular distributions in nuclear reactions. As we shall see, however, the accuracy of these experiments is not good. The limit on  $\delta^2$  obtained is not better than  $\delta^2 < 10^{-6}$ .

To give an illustration, let us examine the polarization experiments, since they are closely analogous to some experiments to be discussed later. A proton beam polarized in a direction  $z$  perpendicular to its momentum was scattered by nuclei. The scattered intensities were compared<sup>2</sup> in two directions  $A$  and  $B$  related to each other by a reflection in the  $x-y$  plane, and were found to be identical to within  $\sim 1\%$ . If the scattering originates from an ordinary parity-conserving interaction plus a parity-nonconserving interaction (e.g.,  $\sigma \cdot r$ ), then the scattering amplitudes in the directions  $A$  and  $B$  are in the proportion  $(1+\delta^2)/(1-\delta^2)$ , where  $\delta$  represents the ratio of the strengths of the two kinds of interactions in the scattering. The experimental result therefore requires  $\delta^2 < 10^{-2}$ , or  $\delta^2 < 10^{-4}$ .

The violation of parity conservation would lead to an electric dipole moment for all systems. The magnitude of the moment is

moment  $\sim e\delta \times (\text{dimension of system})$ . (1)

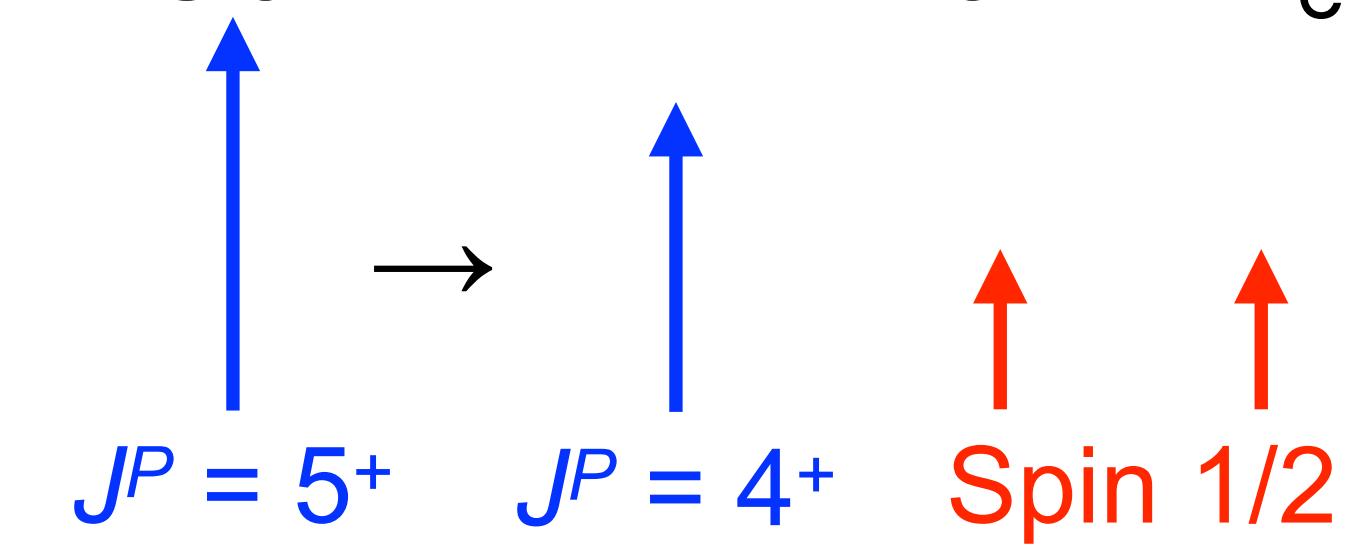
\* Work supported in part by the U. S. Atomic Energy Commission.  
† Permanent address: Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey.

<sup>1</sup> Whitehead, Stork, Perkins, Peterson, and Birge, Bull. Am. Phys. Soc. Ser. II, I, 184 (1956); Barkas, Heckman, and Smith, Bull. Am. Phys. Soc. Ser. II, I, 184 (1956).  
<sup>2</sup> Harris, Orear, and Taylor, Phys. Rev. 101, 932 (1955); V. Fitch and K. Motley, Phys. Rev. 101, 496 (1956); Alvarez, Craveiro, Goett, and Goldhaber, Phys. Rev. 101, 528 (1956).  
<sup>3</sup> R. Delta Phil. Mag. 44, 1068 (1953); E. Fabri, Nuovo Cimento 11, 479 (1954). See Orear, Harris, and Taylor [Phys. Rev. 102, 1676 (1956)] for recent experimental results.  
<sup>4</sup> See, e.g., Report of the Sixth Annual Rochester Conference on High Energy Physics (Interscience Publishers, Inc., New York, to be published).  
<sup>5</sup> See, e.g., Chamberlain, Segre, Tripp, and Ypsilantis, Phys. Rev. 93, 1430 (1954).

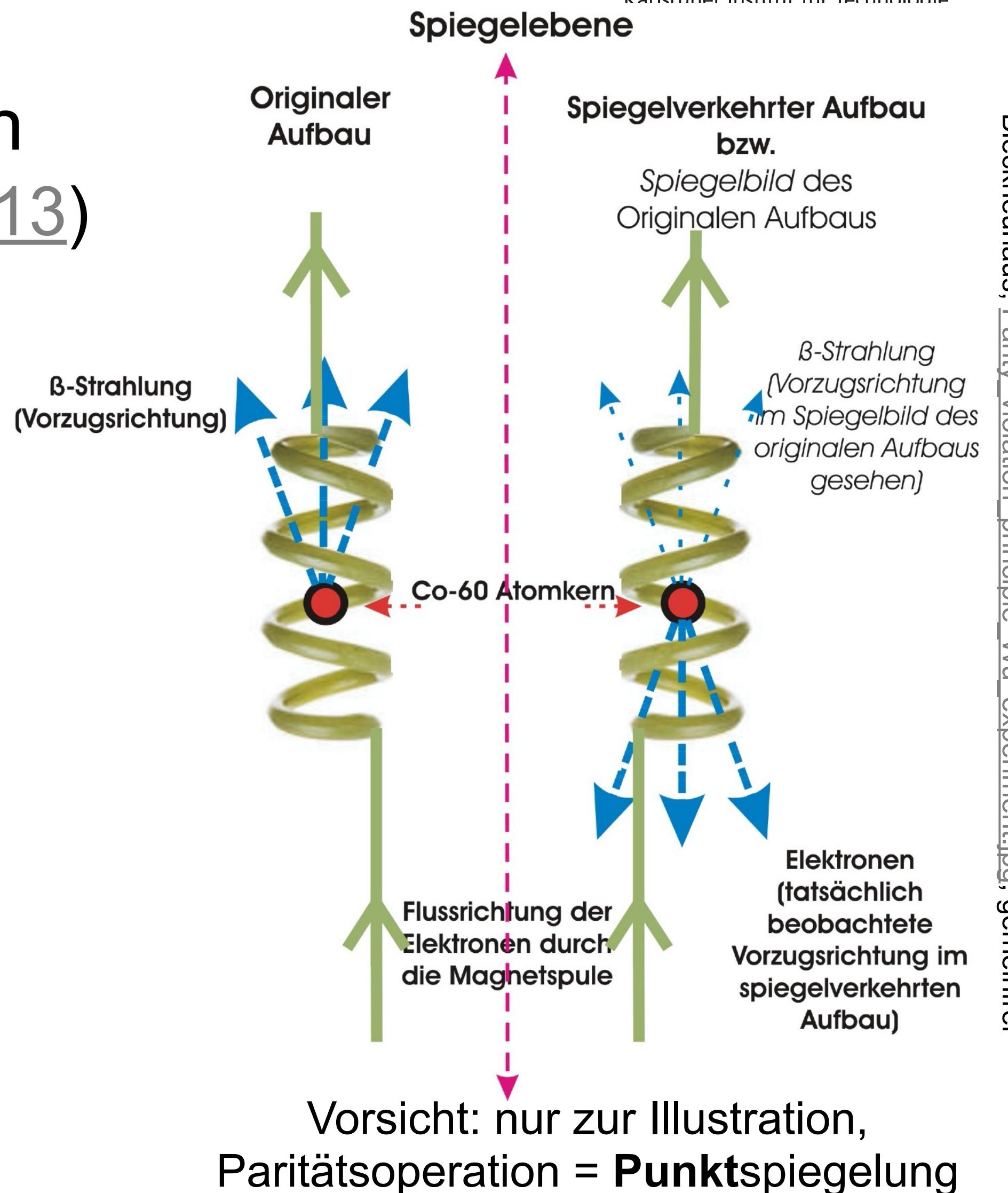
# Wu-Experiment

- Test der Paritätserhaltung im **Betazerfall** von  $^{60}\text{Co}$  (C. S. Wu et al., Phys. Rev. 105 (1957) 1413)

■ Prozess:  $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}^* + e^- + \bar{\nu}_e$



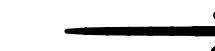
- Frage: **Vorzugsrichtung** der emittierten Elektronen relativ zum Spin des  $^{60}\text{Co}$ -Kerns?  
Falls ja: **Parität verletzt**.
- **Messgröße:** Skalarprodukt aus Kernspin  $\mathbf{J}_K$  und Elektronenimpuls  $\mathbf{p}_e \rightarrow$  **pseudoskalar**



# Wu-Experiment: Spin und Impuls

Original:

$$\vec{p}_K = 0$$



$$\vec{p}'_K \approx 0$$

+

$$\begin{array}{c} \vec{p}_{\bar{\nu}_e} \\ \text{RH} \\ + \\ \vec{p}_e \\ \text{LH} \\ \downarrow \\ \vec{p}_{\nu_e} \end{array}$$



Nach  $\vec{p}$ -Operation:

$$\vec{p}_K = 0$$



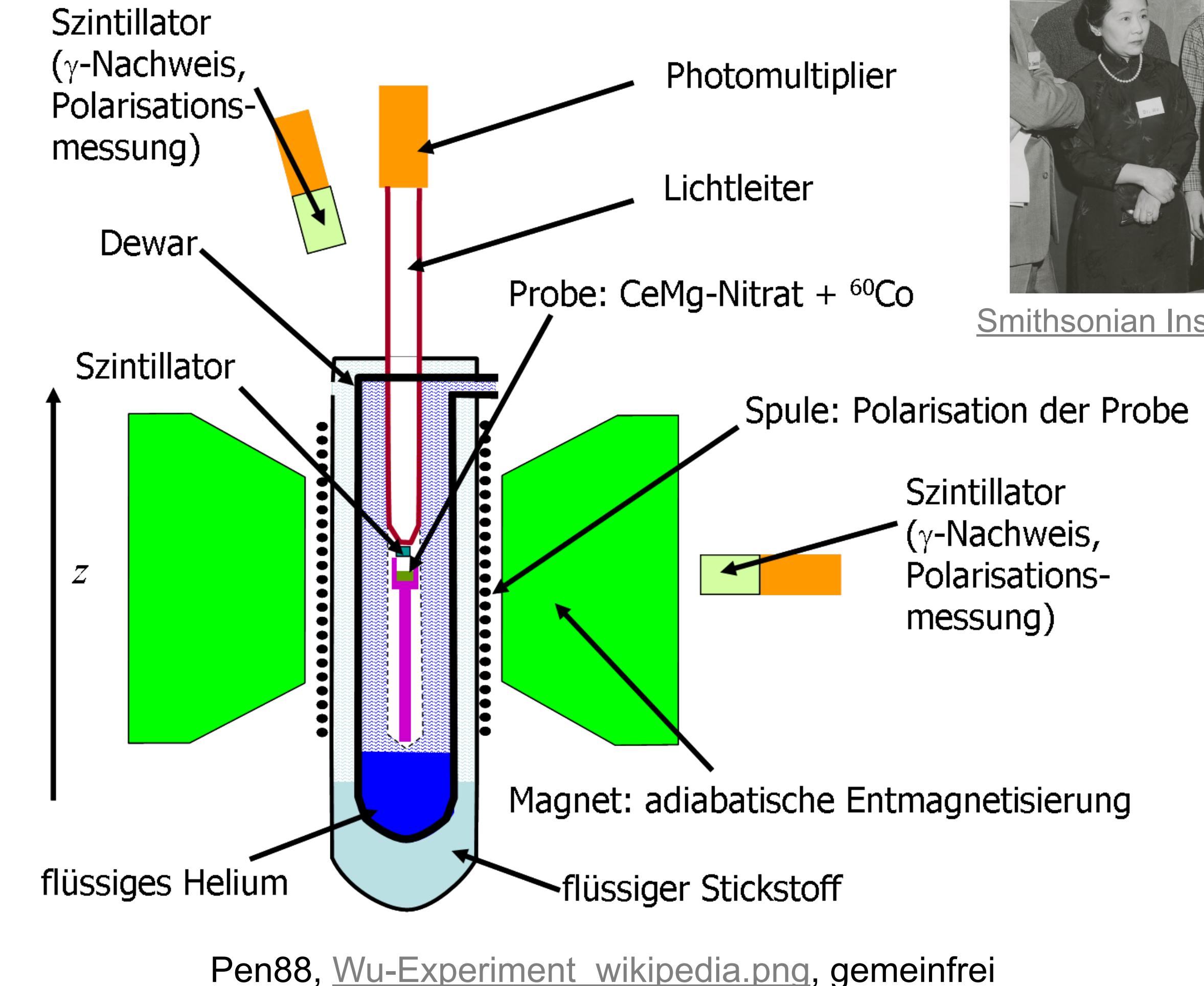
$$\vec{p}'_K \approx 0$$

+

$$\begin{array}{c} \vec{p}_e \\ \text{RH} \\ + \\ \vec{p}_{\bar{\nu}_e} \\ \text{LH} \\ \downarrow \\ \vec{p}_{\nu_e} \end{array}$$

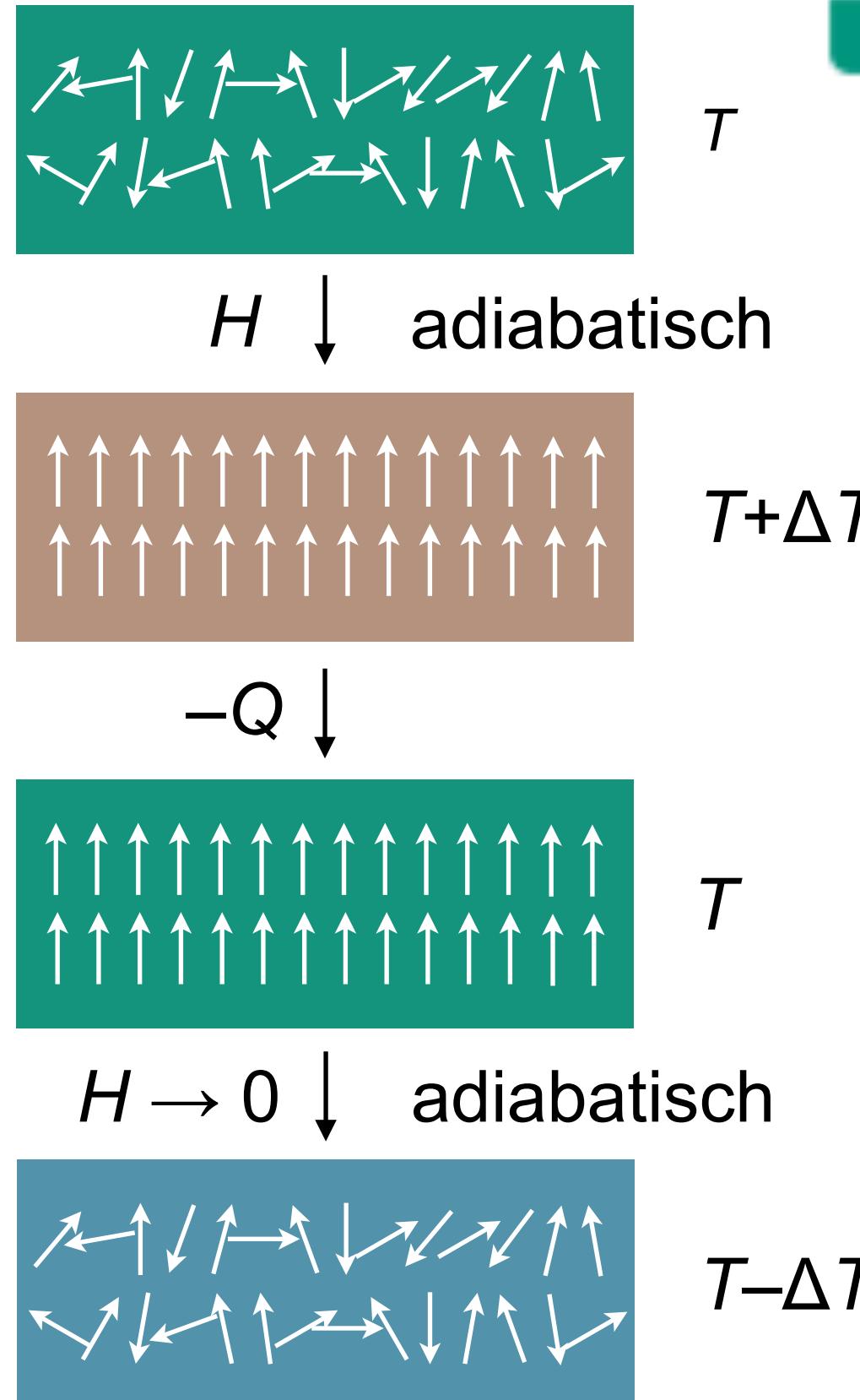
# Wu-Experiment: Aufbau

- Experimentelle Herausforderung:  
Ausrichtung der Kernspin
- Kernmagneton:  
 $\mu_N \approx 3,15 \cdot 10^{-8} \text{ eV/T}$   
→ Temperatur **O(mK)**, sonst  
Spinausrichtung durch  
thermische Effekte behindert
- Abkühlung der Probe auf 10 mK  
durch **adiabatische Entmagnetisierung**
- Spinausrichtung in **Magnetfeld**  
(CeMg-Nitrat paramagnetisch  
mit stark anisotropem g-Faktor)



Smithsonian Institution

# Adiabatische Entmagnetisierung



- Physikalischer Prozess: **magnetokalorischer Effekt**
- $^{60}\text{Co}$ : dünner Film auf Substrat aus **paramagnetischem Salz** mit anisotropem Landé- $g$ -Faktor (Ce-Mg-Nitrat)
- Flüssiges Helium  $\rightarrow$  **Kühlung** auf  $T \approx 1 \text{ K}$  und **Abkopplung** vom Wärmebad durch Abpumpen des Heliums
- **Externes horizontales Magnetfeld  $H$** : Ausrichtung der Elektronenhülle des Salzes  
 $\rightarrow$  leichte Temperaturerhöhung, durch Kühlung kompensiert
- **Herunterregeln** des Magnetfelds: Magnetisierung geht verloren  $\rightarrow$  Kühlung auf  $O(\text{mK})$  durch **Transfer der thermischen auf magnetische Entropie**

# Wu-Experiment: Resultate

- Messung des **Polarisationsgrads** von  $^{60}\text{Co}$ : Anisotropie der Raten des Gammazerfalls von  $^{60}\text{Ni}^*$  (elektromagnetisch → paritätserhaltend) mit **Szintillationszählern** (NaI) in äquatorialer und polarer Position
- Messung der **Zählrate der Elektronen** für unterschiedliche **Polung** des Magnetfelds (= Spinausrichtung  $^{60}\text{Co}$ )
  - Detektor: Szintillationszähler (Anthracen)
  - **Vorzugsrichtung** der Elektronen: **entgegen** der Spinausrichtung
  - Elektronenspin parallel zu Kernspin  
→ überwiegend **linkshändige** Elektronen

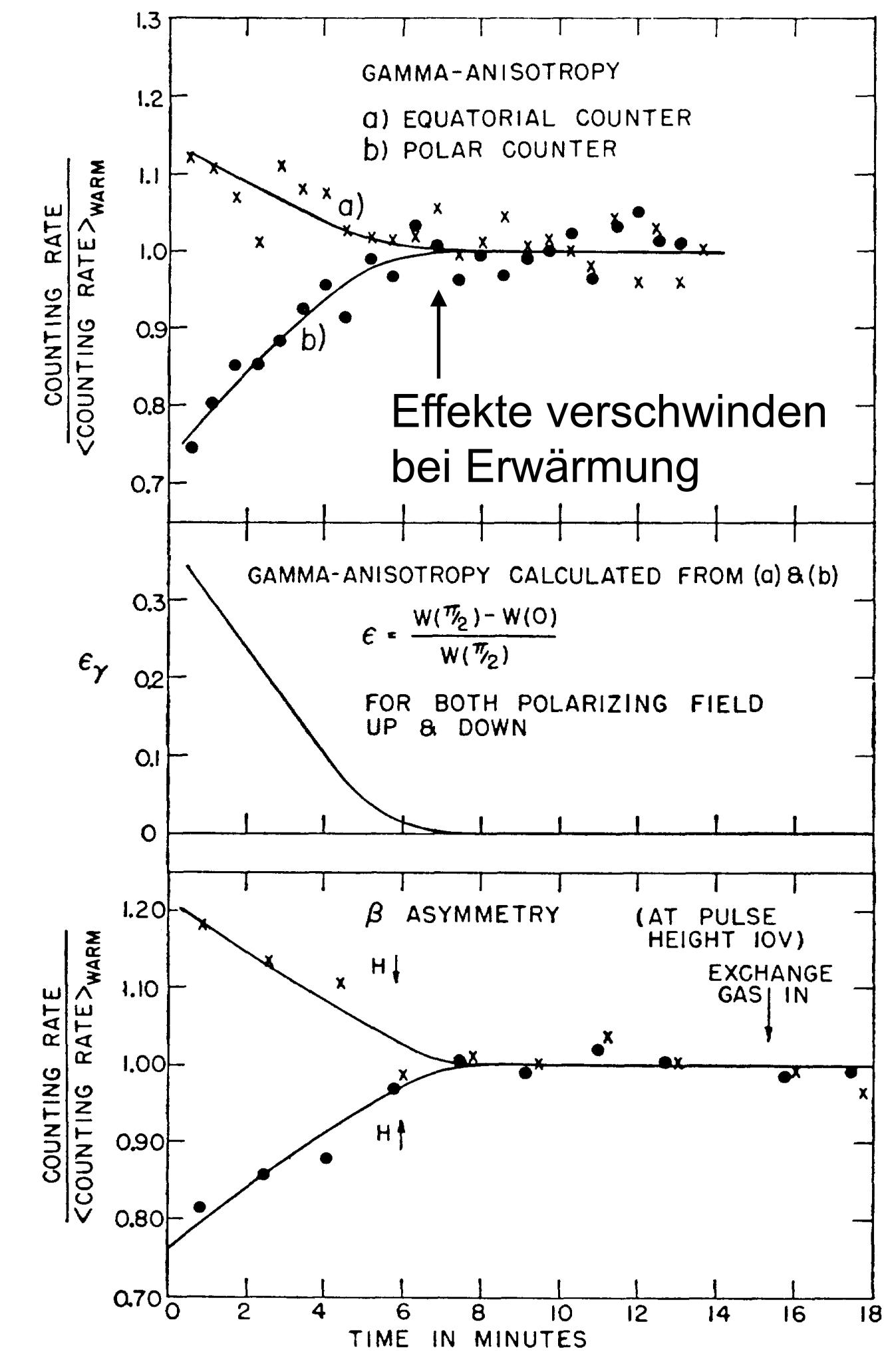
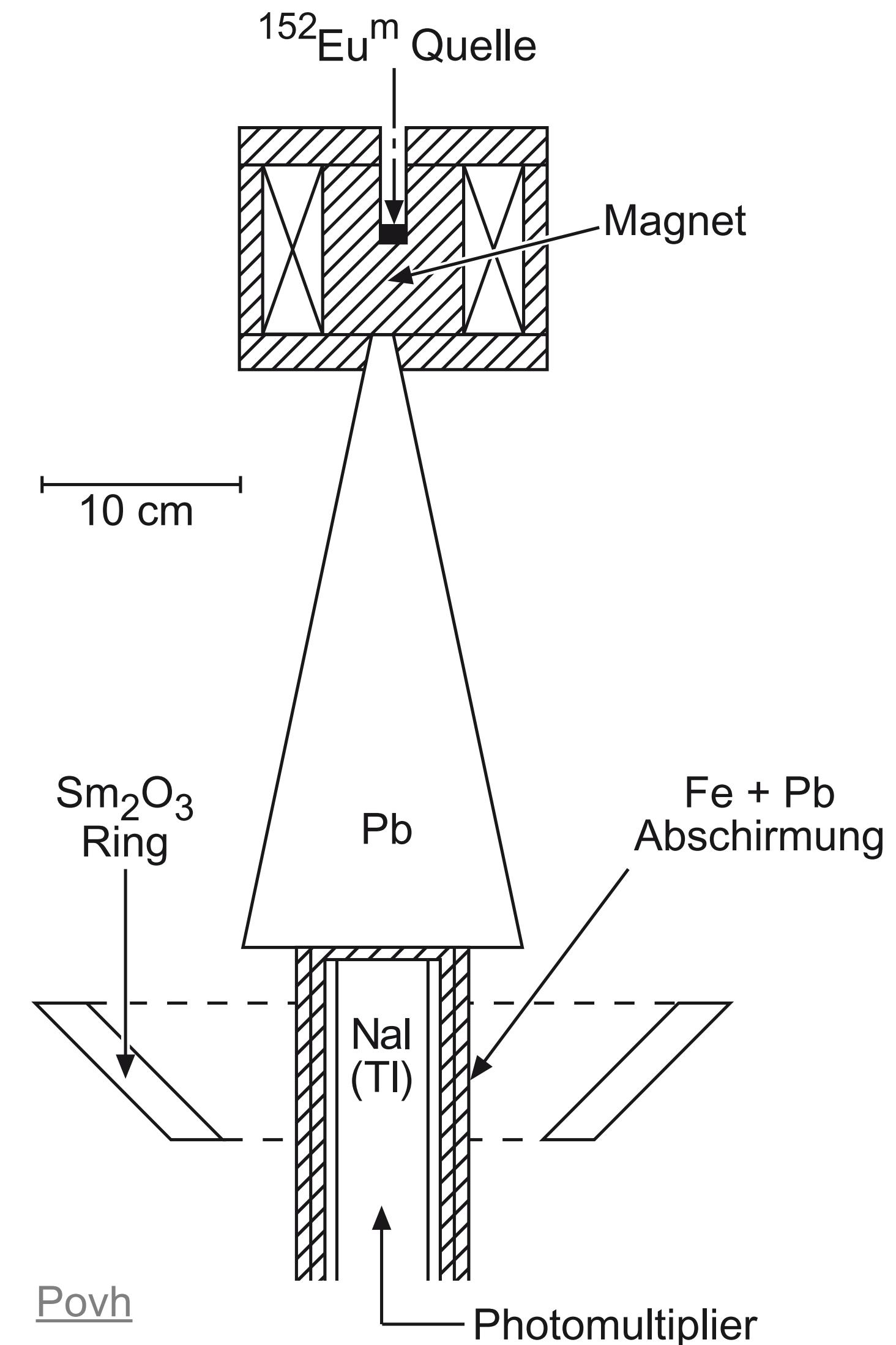


FIG. 2. Gamma anisotropy and beta asymmetry for polarizing field pointing up and pointing down.

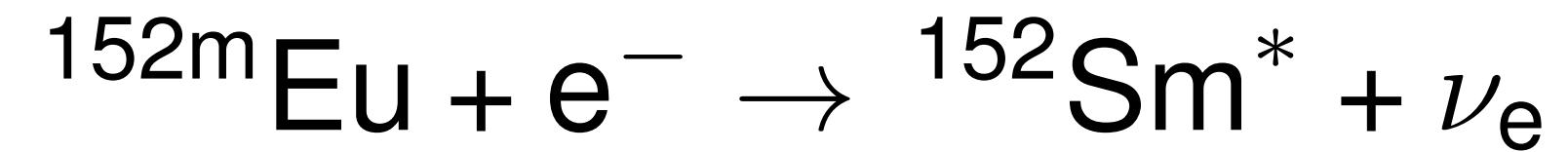
# Goldhaber-Experiment

- Frage: **wie stark** ist die Paritätsverletzung in elektroschwacher Wechselwirkung?  
→ Messung der **Helizität des Neutrinos**  
(Goldhaber, Grodzins, Sunyar, Phys. Rev. 109 (1958) 1015)
- Goldhaber-Experiment: bestimme Flugrichtung des Neutrinos aus **Kernrückstoß**, Spin aus **Spinstruktur des Zerfalls** →  $h = (\mathbf{s} \cdot \mathbf{p})/|\mathbf{s}||\mathbf{p}|$

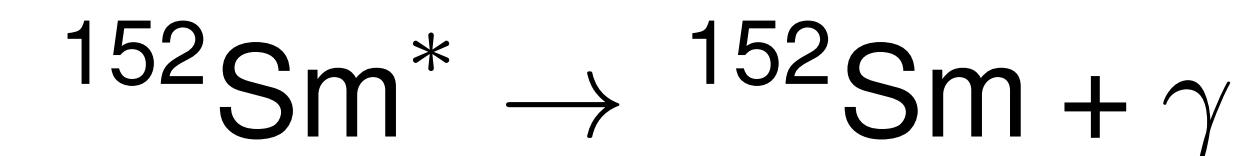


# Goldhaber-Experiment

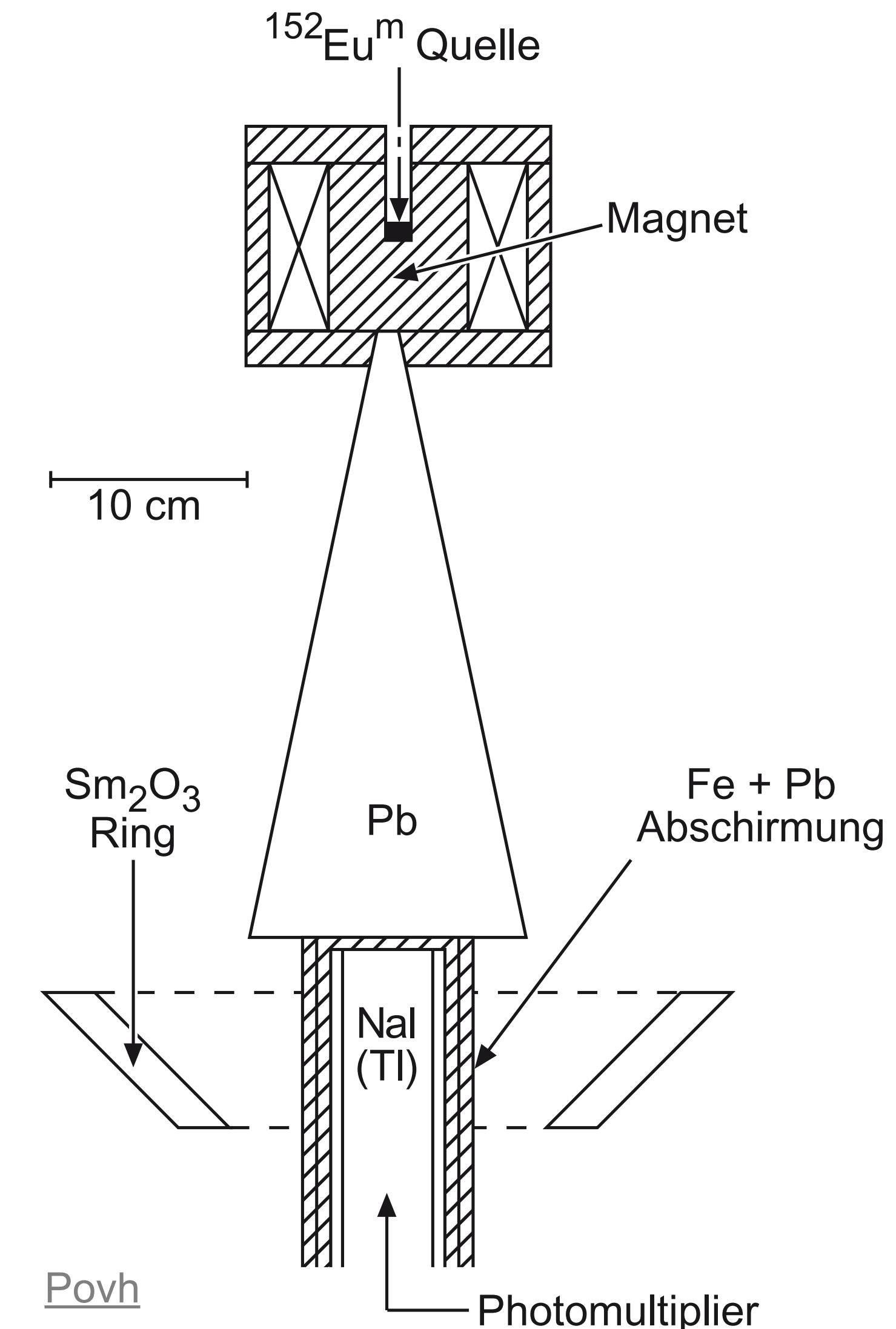
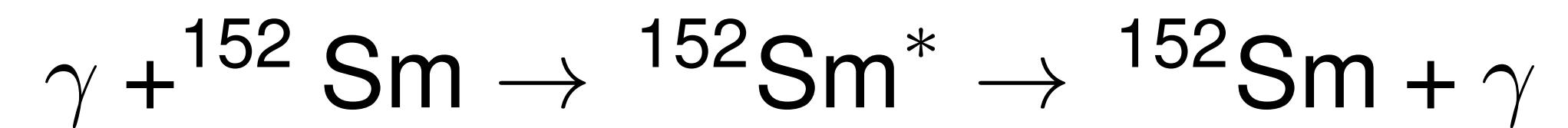
- Geeignetes Element: Kernisomer  $^{152m}\text{Eu}$  (Elektroneneinfang)



- Abregung von  $^{152}\text{Sm}^*$  durch  $\gamma$ -Strahlung:

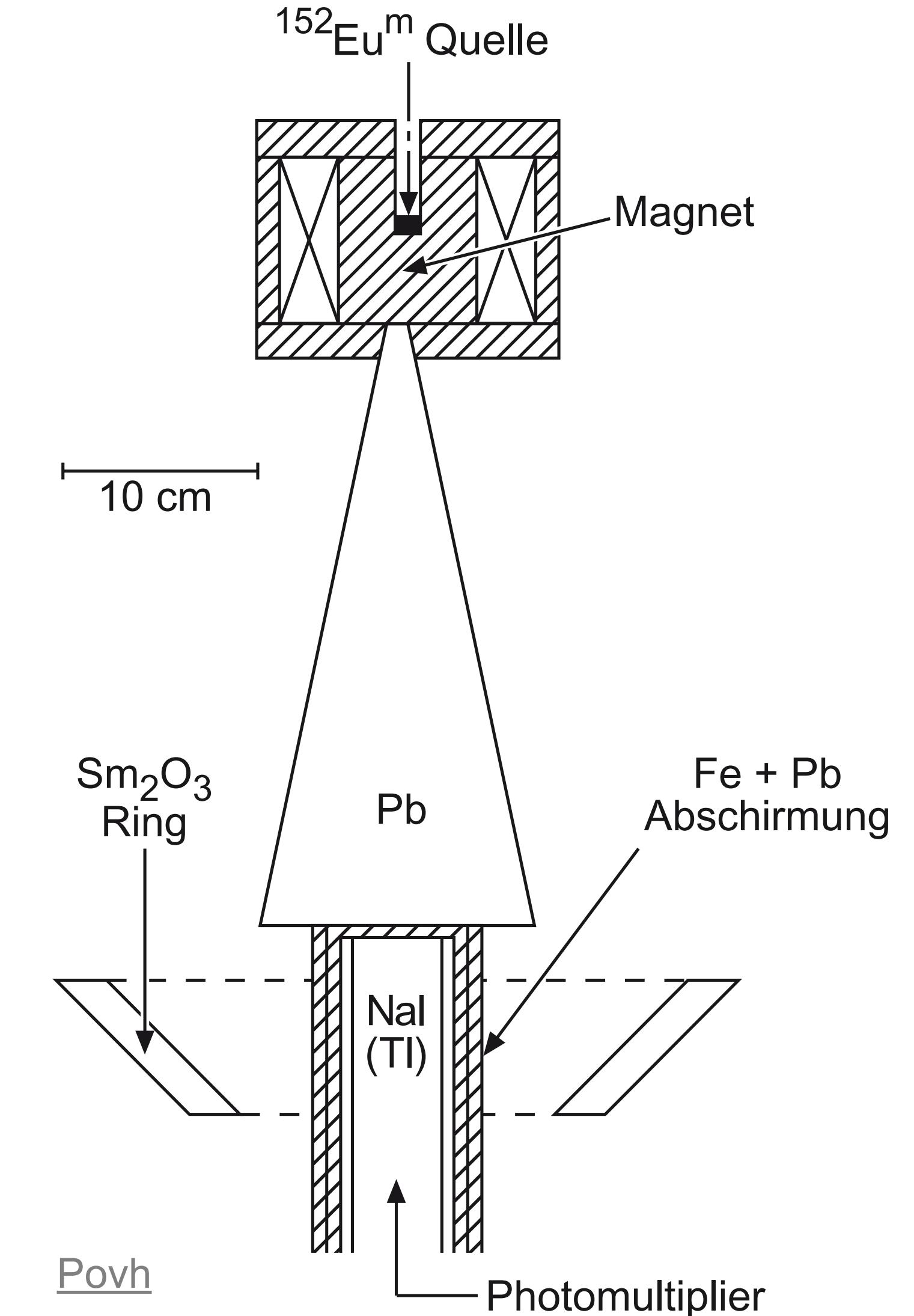


- Nachweis: **Kernresonanzfluoreszenz** der Photonen in  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ -Absorber



# Goldhaber: Neutrinorichtung

- Bestimmung der Neutrinorichtung mittels **Kernresonanzfluoreszenz**:
  - Geringe natürliche Linienbreite  $\Gamma \approx 10 \text{ meV}$ , aber Rückstoßenergie bei Absorption des Photons ca. 3 eV → keine Resonanzfluoreszenz möglich
  - Kurze Lebensdauer der Anregung  $O(10^{-14} \text{ s})$ : emittierender Sm-Kern **bewegt** (keine Relaxation durch Gitterwechselwirkung)
  - Resonanzbedingung nur erfüllt, wenn **Rückstoß in Richtung Absorber** („nach unten“) und Neutrinoenergie „passend“  
→ Neutrino „nach oben“ emittiert



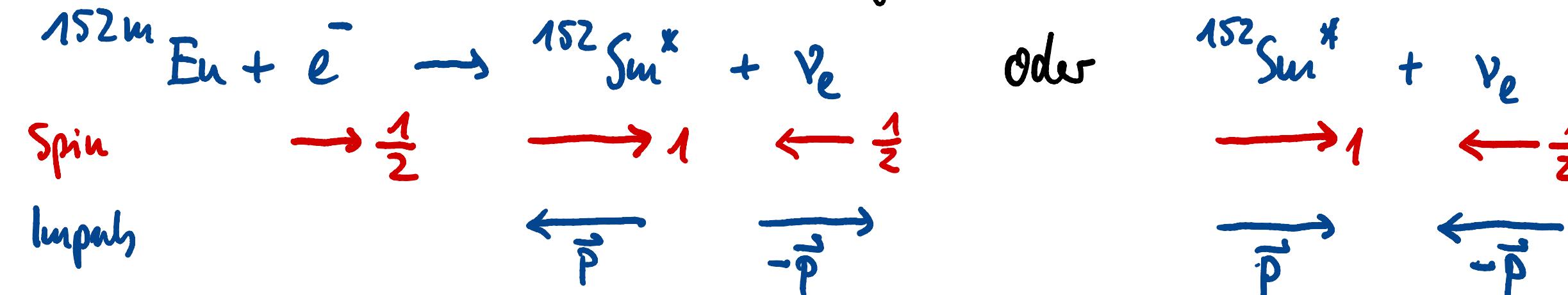
# Goldhaber-Experiment: Spinstruktur

- Elektroneneinfang:

- Gamow-Teller-Übergang:  $J^P(\text{Eu}) = 0^- \rightarrow J^P(\text{Sm}^*) = 1^-$

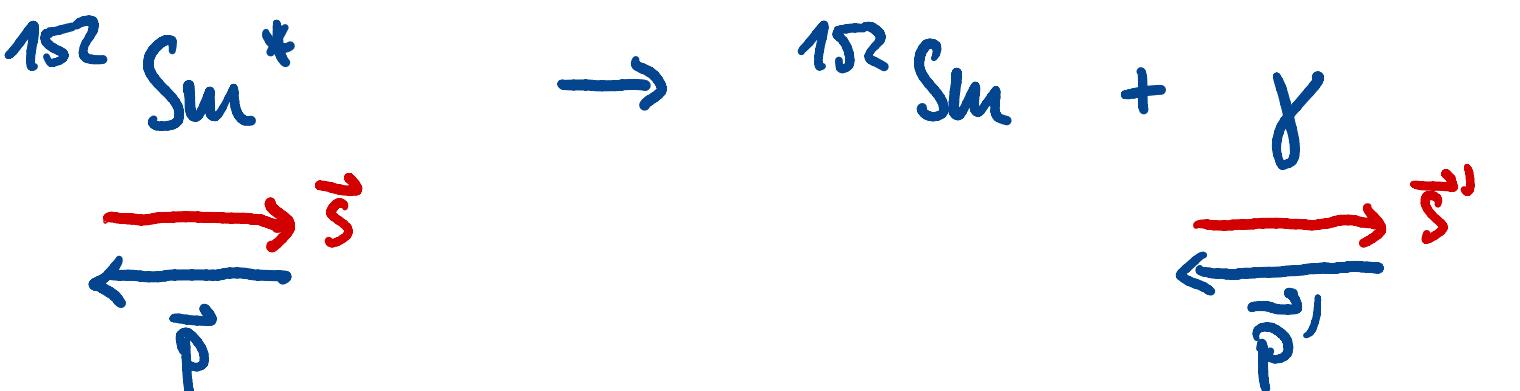
- Einfang aus K-Schale:  $l=0 \rightarrow J_i = \frac{1}{2}$  (Spin  $e^-$ )

- Impuls- und Drehimpulserhaltung:



$\rightarrow \nu_e$  und  $\text{Sm}^*$ : dieselbe Helizität

- Photonenemission:  $J^P = 1^- \rightarrow J^P = 0^+$



$\rightarrow \text{Sm}^*$  und  $\gamma$ : dieselbe Helizität

$\Rightarrow$   $\nu_e$  und  $\gamma$ : dieselbe Helizität

# Goldhaber: Helizität der Photonen

- Photonen: Helizität entspricht **zirkularer Polarisation (LH/RH)**
- Messidee: Wirkungsquerschnitt für Compton-Streuung stark abhängig von **Polarisierung des Targets**
  - Magnetisierter Eisenblock um  $^{152}\text{Eu}$ -Quelle → **Energieverlust** gestreuter Photonen abhängig von deren zirkularer Polarisation
  - **Keine Resonanzabsorption** in  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  für Photonen mit Energieverlust
- Resultat:
  - Photonen mit **negativer** Helizität, zirkulare Polarisation von **(68±14)%**
  - Erwartung aus Winkelabhängigkeit der Photonenpolarisation: ca. 75%
  - Schlussfolgerung: Messung verträglich mit Neutrinos mit 100% negativer Helizität → nur **linkshändige Neutrinos**, Parität **maximal verletzt**

# Aufgabe 19

- Welche der folgenden Aussagen zur Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung sind korrekt?
  - A. Das Wu-Experiment hat gezeigt, dass die Parität maximal verletzt ist.
  - B. Um im Wu-Experiment die Kernspins von Kobalt auszurichten, werden tiefe Temperaturen und Einbettung in ein paramagnetisches Salz benötigt.
  - C. Aufgrund der Paritätsverletzung nehmen nur Teilchen (Antiteilchen) mit negativer (positiver) Helizität an der schwachen Wechselwirkung teil.
  - D. Im Goldhaber-Experiment schließt man über die Helizität des Photons auf die Helizität des Neutrinos.
  - E. Das Theta-Tau-Rätsel hat gezeigt, dass es zwei unterschiedliche Teilchen mit gleichen Massen, Ladungen und Spins geben kann.
- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:  
[https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold\\_1080516&client\\_id=produktiv](https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv)

# Kurze Zusammenfassung

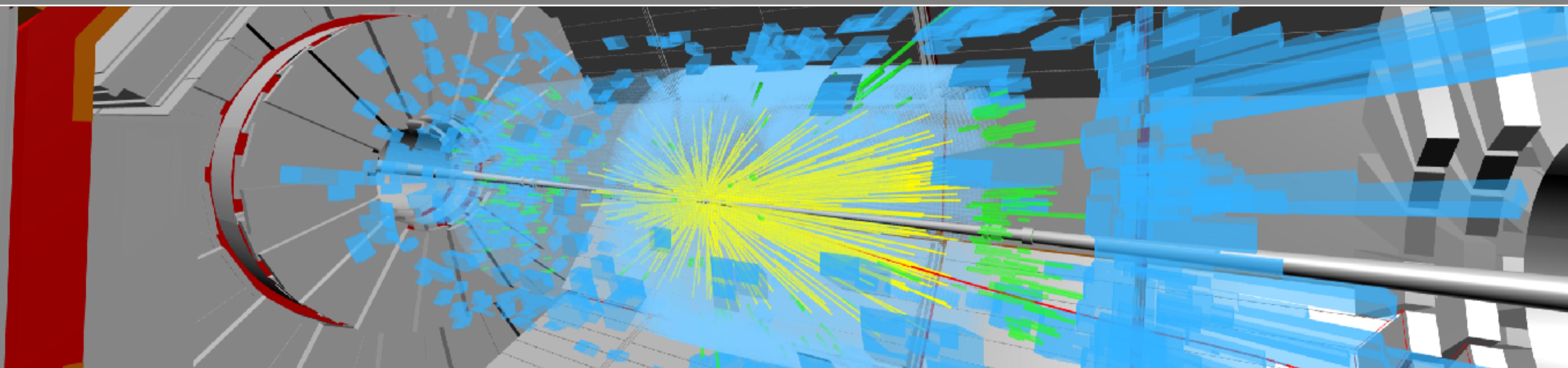
- Theta-Tau-Rätsel: Zwei unterschiedliche Teilchen ( $\theta^+$ ,  $\tau^+$ ) mit derselben Masse?
- Vorschlag: Test der **Paritätsverletzung** in schwacher Wechselwirkung  
(Lee, Yang, 1956)
- Wu-Experiment (1957):
  - **Vorzugsrichtung** des Elektronenimpulses relativ zum Kernspin im Betazerfall von  $^{60}\text{Co}$  → **Paritätsverletzung**
  - Experimentell: Ausrichtung des Kernspins durch adiabatische Entmagnetisierung
- Goldhaber-Experiment (1958):
  - Messung der **Neutrino helizität** bei Elektroneneinfang von  $^{152\text{m}}\text{Eu}$   
→ C und P **maximal verletzt**
  - Experimentell: Kernresonanzfluoreszenz

# Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

**Karlsruher Institut für Technologie**  
**Sommersemester 2020 – 10. Vorlesung (Teil 2)**

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



# Auflösung Aufgabe 19

- Welche der folgenden Aussagen zur Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung sind korrekt?
- A. Das Wu-Experiment hat gezeigt, dass die Parität maximal verletzt ist.
  - B. Um im Wu-Experiment die Kernspins von Kobalt auszurichten, werden tiefe Temperaturen und Einbettung in ein paramagnetisches Salz benötigt.
  - C. Aufgrund der Paritätsverletzung nehmen nur Teilchen (Antiteilchen) mit negativer (positiver) Helizität an der schwachen Wechselwirkung teil.
  - D. Im Goldhaber-Experiment schließt man über die Helizität des Photons auf die Helizität des Neutrinos.
  - E. Das Theta-Tau-Rätsel hat gezeigt, dass es zwei unterschiedliche Teilchen mit gleichen Massen, Ladungen und Spins geben kann.

# Wiederholung: Paritätsverletzung

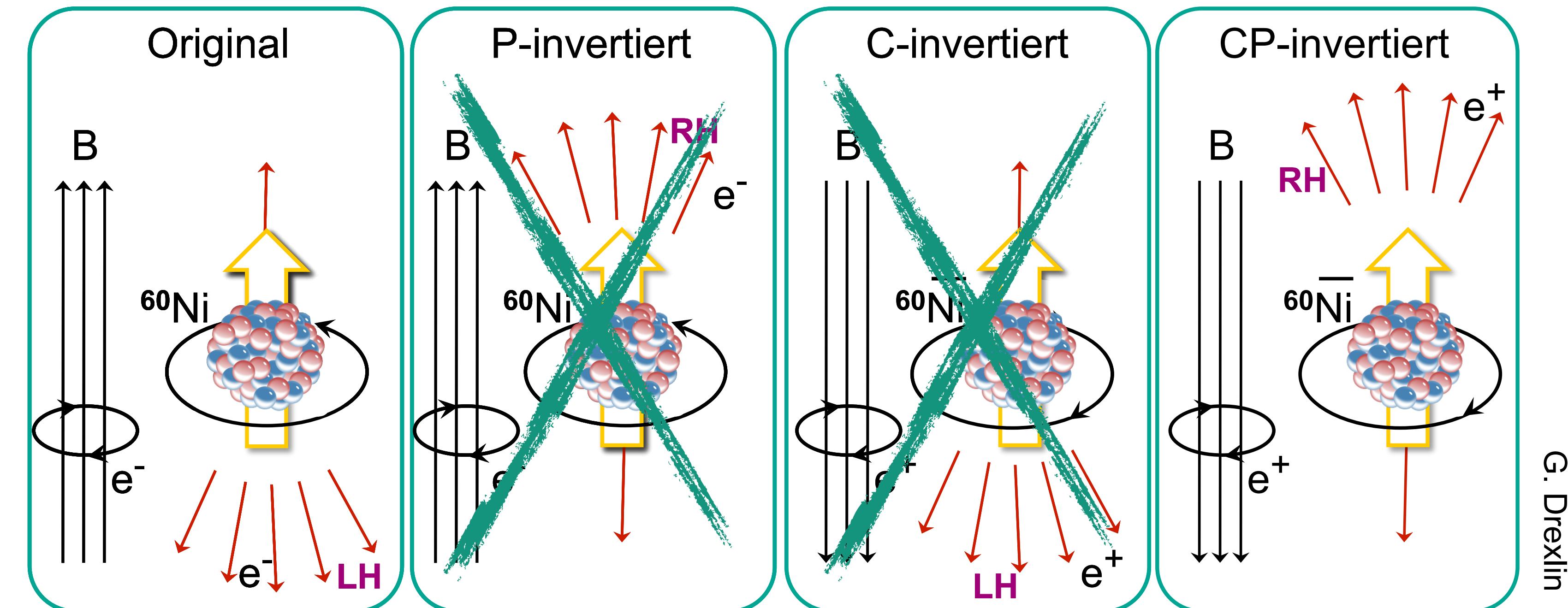
- Theta-Tau-Rätsel: Zwei unterschiedliche Teilchen ( $\theta^+$ ,  $\tau^+$ ) mit derselben Masse?
- Vorschlag: Test der **Paritätsverletzung** in schwacher Wechselwirkung (Lee, Yang, 1956)
- Wu-Experiment (1957):
  - **Vorzugsrichtung** des Elektronenimpulses relativ zum Kernspin im Betazerfall von  $^{60}\text{Co} \rightarrow \text{Paritätsverletzung}$
  - Experimentell: Ausrichtung des Kernspins durch adiabatische Entmagnetisierung
- Goldhaber-Experiment (1958):
  - Messung der **Neutrino helizität** bei Elektroneneinfang von  $^{152\text{m}}\text{Eu}$   
 $\rightarrow \text{C und P maximal verletzt}$
  - Experimentell: Kernresonanzfluoreszenz

## Kapitel 5.3

# Schlüsselexperimente zur C-, P- und CP-Verletzung

# CP-Verletzung?

- Gedankenexperiment: Wu-Experiment im C- und P-„Spiegel“
- **Maximale P-Verletzung:** keine  $e^-$  in Richtung des Kernspins emittiert
- **Maximale C-Verletzung:** keine  $e^+$  unter  $180^\circ$  zu Spin des Antikerns emittiert
- **CP-Symmetrie erhalten:** Antikern emittiert Positronen in Richtung Kernspin



# Bemerkung: Eigenzustände

- Quantenmechanik allgemein: System ist **Eigenzustand** eines Operators  $\hat{O}$ , wenn

$$\hat{O} |\psi_n\rangle = O_n |\psi_n\rangle \quad (O_n: \text{Eigenwerte})$$

- Eigenzustände des **Hamilton-Operators** = stationäre Zustände
- Physikalische Teilchen = **Masseneigenzustände**: stationäre Zustände des Hamilton-Operators für **freie Teilchen** (d. h. ohne Wechselwirkung)
- Elementarteilchen unterliegen elektroschwacher (und ggf. starker) Wechselwirkung:
  - Im allgemeinen **unterschiedliche Eigenzustände** des freien und der Wechselwirkungs-Hamilton-Operatoren, verbunden über unitäre Transformationen („Flavormischung“):

$$|\psi'_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\psi_i\rangle$$

- Hadronen: **starke Eigenzustände** koppeln an Gluonen, **elektroschwache Eigenzustände** koppeln an W- und Z-Bosonen

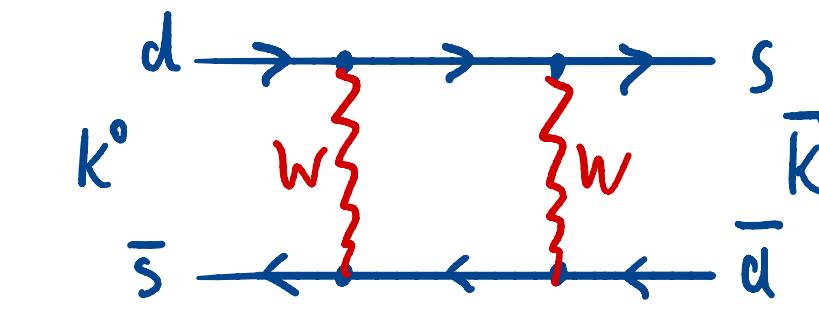
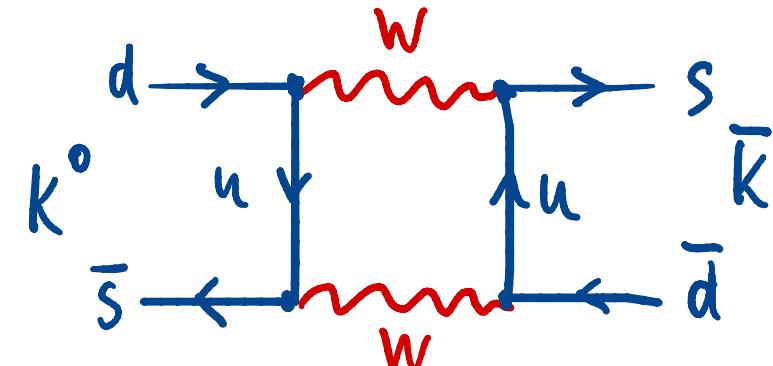
# Neutrale Kaonen und CP-Symmetrie

- Neutrale Kaonen:

- Quarkinhalt:  $|K^0\rangle = |d\bar{s}\rangle$ ,  $|\bar{K}^0\rangle = |s\bar{d}\rangle$

→ starke Eigenzustände

- Schwache Wechselwirkung: Oszillationen  $|K^0\rangle \leftrightarrow |\bar{K}^0\rangle$   
durch „Boxdiagramme“



→ betrachte System aus  $K^0$  und  $\bar{K}^0$

• Eigenparität:  $\hat{P}|K\rangle = -|K\rangle$  (pseudoskalares Teilchen)

• Ladungskonjugation:  $\hat{C}|K^0\rangle = |\bar{d}s\rangle = |\bar{K}^0\rangle$

$$\hat{C}|\bar{K}^0\rangle = |d\bar{s}\rangle = |K^0\rangle$$

→ kein Eigenzustand

- CP-Eigenzustände:

$$|K_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \rightarrow \hat{C}\hat{P}|K_1\rangle = +|K_1\rangle$$

$$|K_2\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \rightarrow \hat{C}\hat{P}|K_2\rangle = -|K_2\rangle$$

• Zerfall in Pionen:  $J^P = 0^- \rightarrow J^P = 0^-$

- relativer Drehimpuls: 0

-  $\hat{C}\hat{P}|\pi\pi\rangle = +|\pi\pi\rangle$  und  $\hat{C}\hat{P}|\pi\pi\pi\rangle = -|\pi\pi\pi\rangle$   
→ CP-erhaltende Zerfälle:  $K_1 \rightarrow \pi\pi$ ,  $K_2 \rightarrow \pi\pi\pi$

- Physische Teilchen (Masseigenzustände):

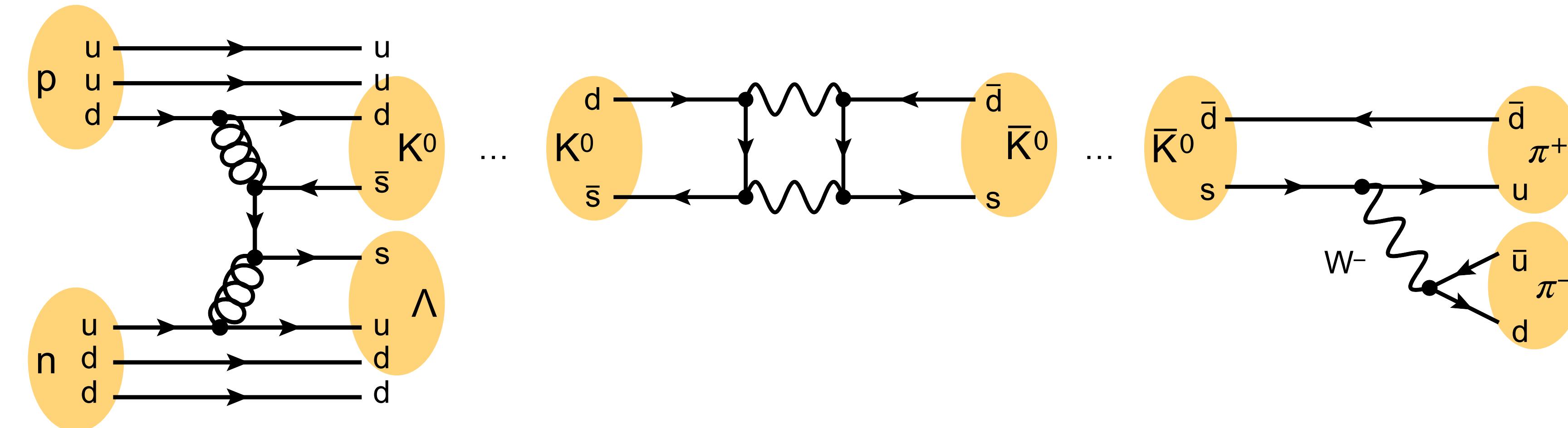
Mischung aus  $K^0$  und  $\bar{K}^0$

$$\left. \begin{aligned} & - K_S^0 \text{ ("K-short")}: \quad \tau \approx 9 \cdot 10^{-11} \text{ s} \\ & - K_L^0 \text{ ("K-long")}: \quad \tau \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ s} \end{aligned} \right\} m_K \approx 498 \text{ MeV}/c^2$$

$$\left. \begin{aligned} & \rightarrow \text{falls CP erhalten: } |K_S^0\rangle \stackrel{!}{=} |K_1\rangle \\ & \quad |K_L^0\rangle \stackrel{!}{=} |K_2\rangle \end{aligned} \right\} \text{Experiment?}$$

# Kaonenstrahlen

- „Lebenszyklus“ eines Strahls neutraler Kaonen:
  - **Produktion:** Protonen auf Target → Eigenzustände der **starken Wechselwirkung**  $K^0, \bar{K}^0$ , **paarweise** Produktion von  $s\bar{s}$  → Strangeness erhalten
  - **Propagation:**  $K^0-\bar{K}^0$ -**Oszillation** durch elektroschwache Wechselwirkung (Boxdiagramme) → physikalische Teilchen  $K^0_L$  und  $K^0_S$
  - **Zerfall** durch **elektroschwache Wechselwirkung** in  $2\pi$  bzw.  $3\pi$



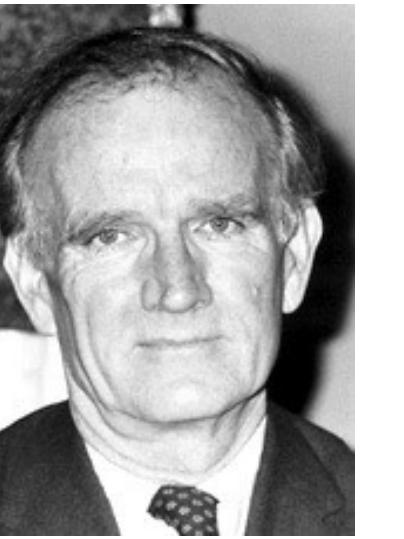
# Cronin-Fitch-Experiment

- Messidee:  
(Christenson, Cronin, Fitch, Turlay, PRL 13 (1964) 138)
  - Falls  $K^0_S = K^0_1$  und  $K^0_L = K^0_2$ :  
**CP erhalten** → Zerfall  $K^0_L \rightarrow \pi\pi$  verboten
  - Suche nach  $\pi^+\pi^-$ -Endzuständen in **reinem  $K^0_L$ -Strahl**
- Präparation  $K^0_L$ -Strahl: (AGS, Brookhaven National Laboratory)
  - 30-GeV-Protonen auf Beryllium-Target → Kaonenstrahl mit Impuls 1,1 GeV
  - Mittlere  $K^0_S$ -Flugstrecke für  $p = 1,1$  GeV:  $L = \beta\gamma c\tau = \frac{p}{m_K c} c\tau \approx 6$  cm  
→ lange Zerfallsstrecke (ca. 20 m)
  - Bemerkung: **Regeneration** der  $K^0_S$  durch unterschiedliche starke Wechselwirkung von  $K_0$  und  $\bar{K}_0$  in Absorber → Untergrund

J.W. Cronin



V.L. Fitch


[NobelPrize.org](https://www.nobelprize.org)

# Cronin-Fitch-Experiment

- Experimenteller Aufbau: Doppelarmspektrometer
- Messgrößen: Impulse der  $\pi^\pm$  (magn. Spektrometer)
- Signal: invariante  $\pi\pi$ -Masse  $m^* \approx 498$  MeV und Winkel des  $\pi\pi$ -Systems relativ zum Strahl  $\cos \theta \approx 1$

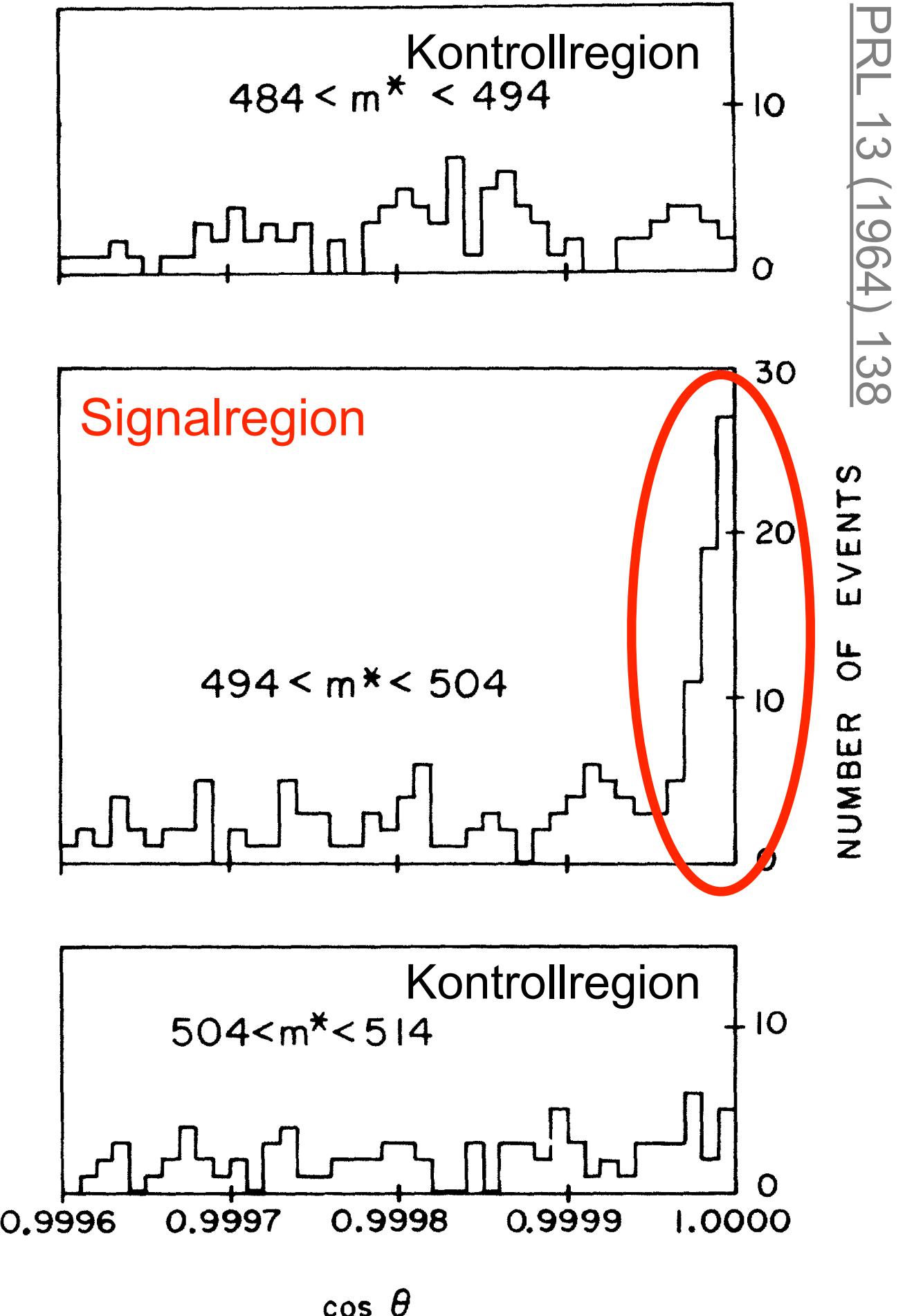
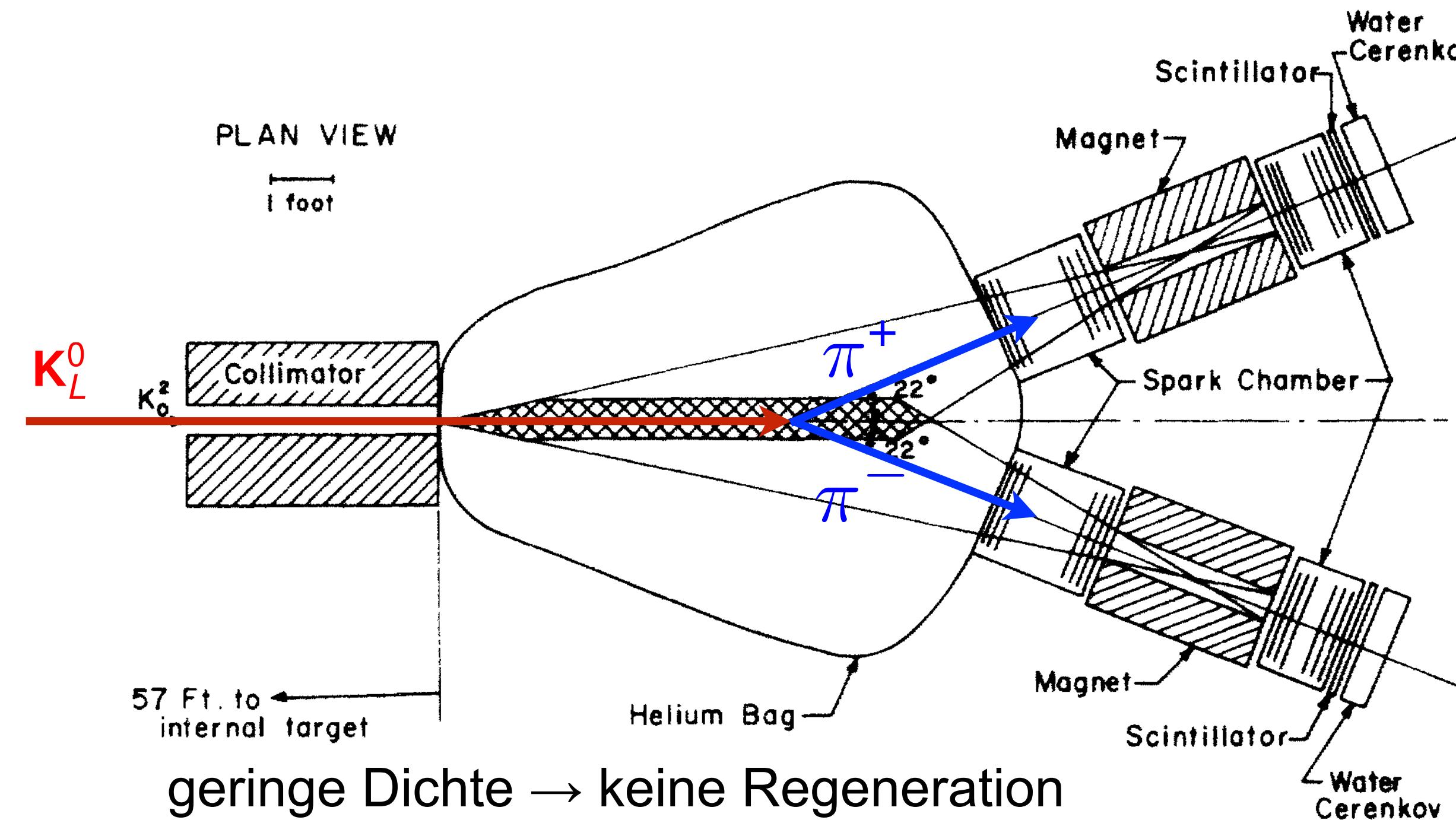


FIG. 3. Angular distribution in three mass ranges for events with  $\cos \theta > 0.9995$ .

# CP-Verletzung im Kaonsystem

- Resultat:  $45 \pm 9$  Kandidaten für  $K^0_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$  in 22.700  $K^0_L$ -Zerfällen
- **CP-Verletzung in der Mischung** von  $K^0$  und  $\bar{K}^0$   
("indirekte CP-Verletzung")
  - Grund: unterschiedliche Raten für Umwandlung  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$  und  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$
  - **Physikalische Zustände**  $K^0_S, K^0_L$  sind **nicht CP-Eigenzustände**  $K^0_1, K^0_2$ , kleine Beimischung (0.2%) des jeweils anderen Zustands:

$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1 + |\varepsilon|^2}} (|K_1^0\rangle + \varepsilon |K_2^0\rangle)$$

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1 + |\varepsilon|^2}} (|K_2^0\rangle + \varepsilon |K_1^0\rangle)$$

mit kleinem (komplexen) Parameter  $\varepsilon$ , PDG 2018:  $|\varepsilon| = 2,228(11) \cdot 10^{-3}$

# CP-Verletzung im Zerfall

- Weiterer Mechanismus: **CP-Verletzung im Zerfall** („direkte CP-Verletzung“)

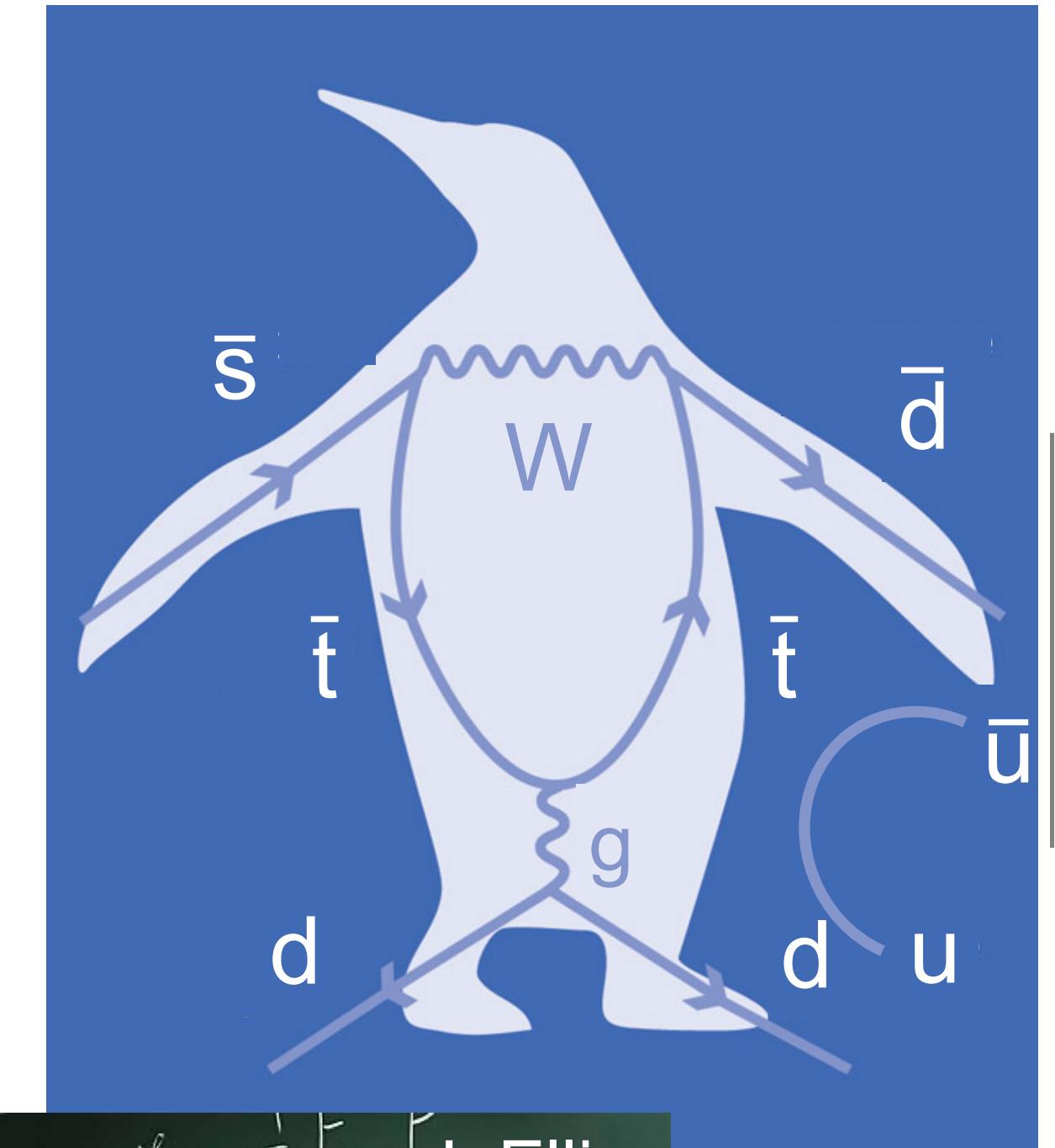
- Unterschiedliche Raten für  $K^0 \rightarrow \pi\pi$  und  $\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi$ ,  $K^0_S$  zerfällt direkt in  $\pi\pi$

- Observable: **Doppelverhältnis** der Zerfallsbreiten

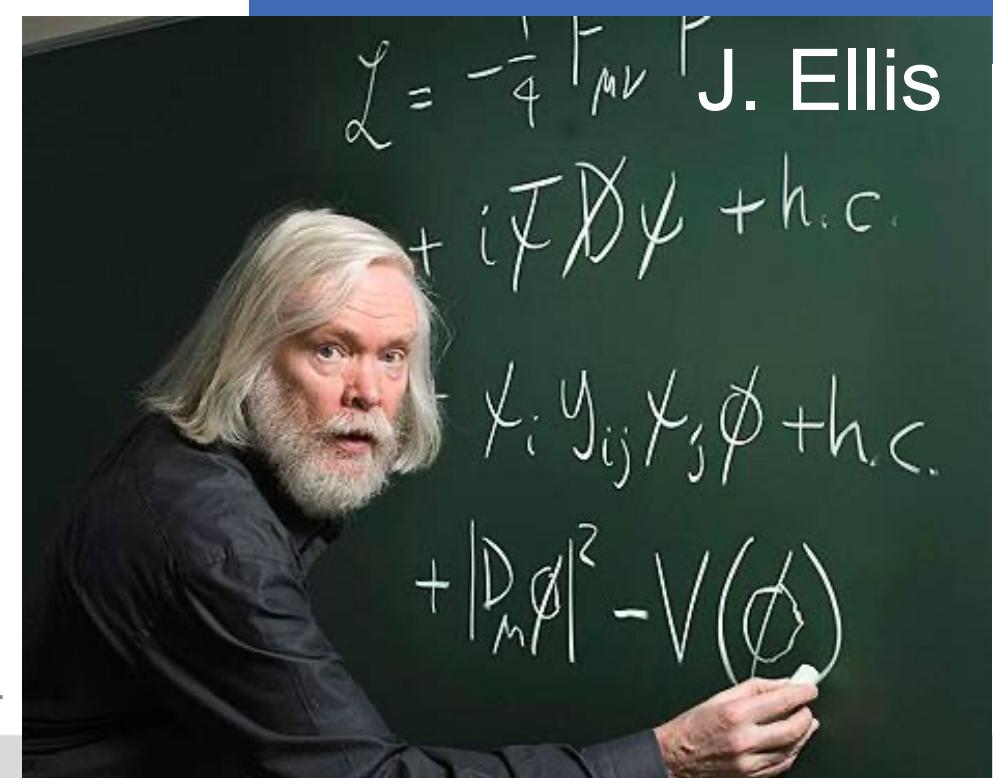
$$R = \frac{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0)/\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0)}{\Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)/\Gamma(K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-)} \approx 1 - 6 \operatorname{Re} \left( \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right)$$

- Trick:  $K_L^0$ - und  $K_S^0$ -Strahl im **selben** Experiment
  - NA31/NA48 (CERN) und E731 (Fermilab)
  - PDG 2019:  $\operatorname{Re}(\varepsilon'/\varepsilon) = 1,66(23) \cdot 10^{-3}$

## Pinguindiagramm



[Open Knowledge Foundation](#),  
CC BY-SA 2.0



# Kurze Zusammenfassung

- System neutraler Kaonen:
  - Mischung von  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  durch schwache Wechselwirkung  
→  $K^0$ - $\bar{K}^0$  Oszillationen
  - Physikalische Teilchen:  $K^0_L$  („K-long”),  $K^0_S$  („K-short”) → CP-Eigenzustände?
- Cronin-Fitch-Experiment (1964):
  - $K^0_L$ -Strahl (BNL) → Nachweis von  $K^0_L \rightarrow \pi\pi$  mit Doppelarmspektrometer
  - Ca. 0.2% der  $K^0_L$  (erwarteter CP-Eigenwert  $-1$ ) zerfallen in  $\pi\pi$  ( $CP = +1$ )  
→ **CP-Verletzung in der Mischung** von  $K^0$  und  $\bar{K}^0$   
(= indirekte CP-Verletzung,  $10^{-3}$ -Effekt)
  - Spätere Experimente: System neutraler Kaonen zeigt auch  
**CP-Verletzung im Zerfall** (= direkte CP-Verletzung,  $10^{-6}$ -Effekt)