

Moderne Experimentalphysik II

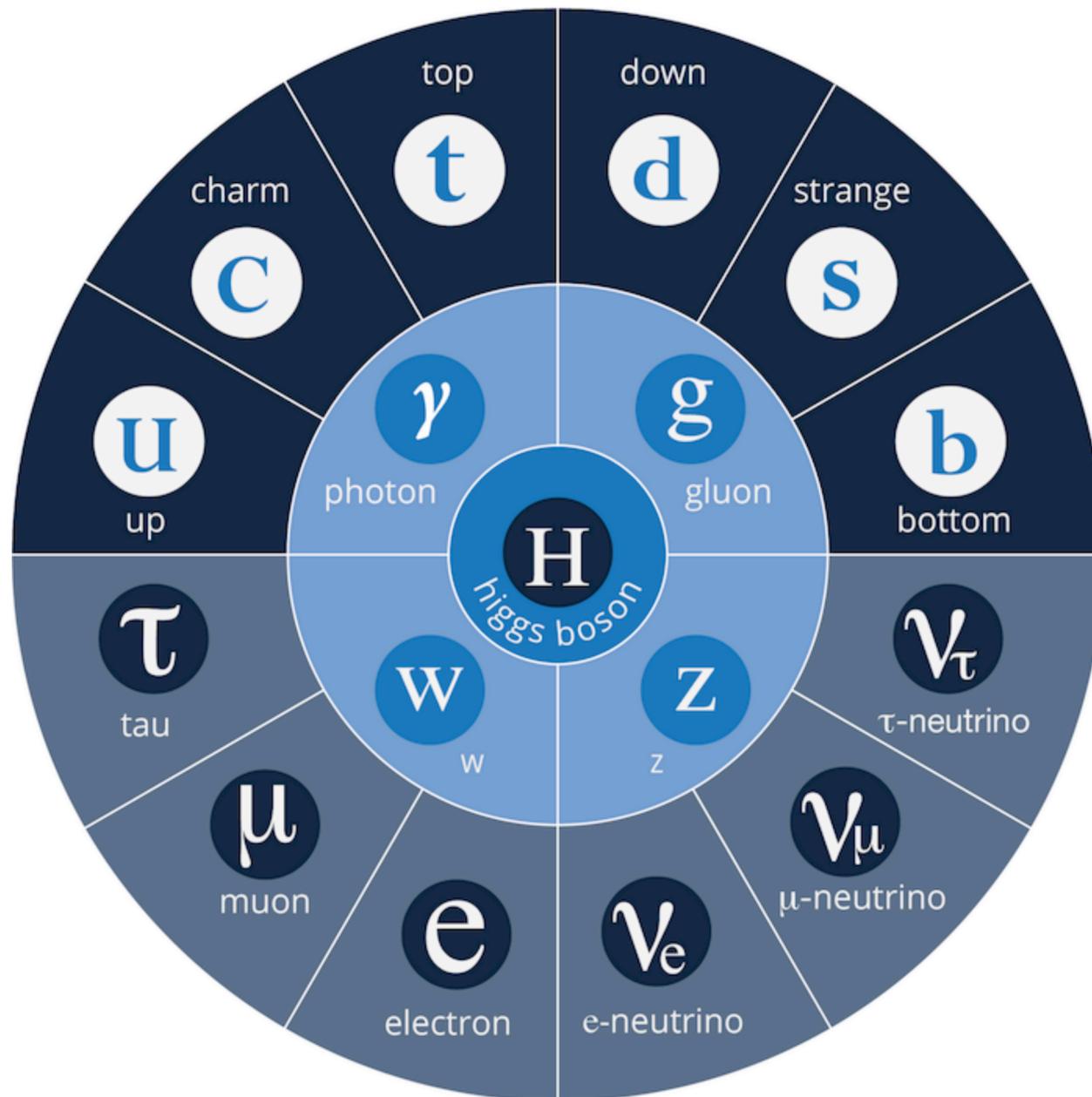
Teilchenphysik - Vorlesung 09

Professor Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu)
Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



■ 4. Symmetrien und Erhaltungssätze

- 4.1 Erhaltungszahlen
- 4.2 Diskrete Symmetrien
- 4.3 Schlüsselexperimente
- 4.4 Supersymmetrie



Recap / Ausblick: Verletzung von P

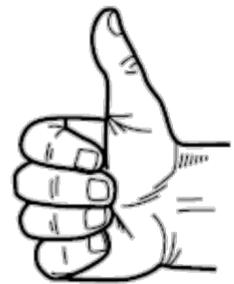
- **Maximale Verletzung der Parität P : Wu & Lederman**
 - Wu-Experiment: Messung eines **Pseudoskalars** aus $\vec{J}_{Kern} \cdot \vec{p}_e$
 - Vorzugsrichtung $\vec{p}_e \uparrow \downarrow \vec{J}_{Kern}$ bei mK -Temperaturen (Kontrolle: E2- γ 's)
 - Helizität h masseloser Neutrinos: $\bar{\nu} = RH$, $\nu = LH$, gibt es sterile Neutrinos?
 - Lederman: Rate von $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ stark bevorzugt gegen $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu$

Helizitätszustände eines Fermions mit $S = 1/2$

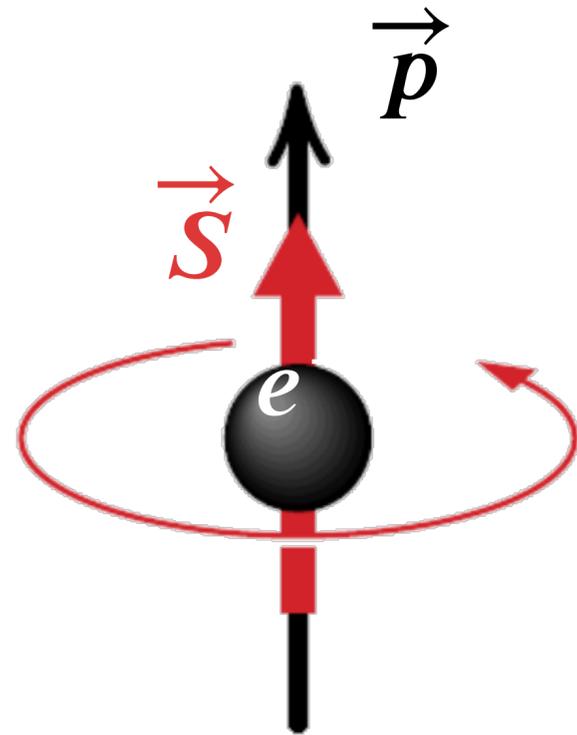
- Helizität: linkshändig/rechtshändig, Teilchen bzw. Antiteilchen

TEILCHEN

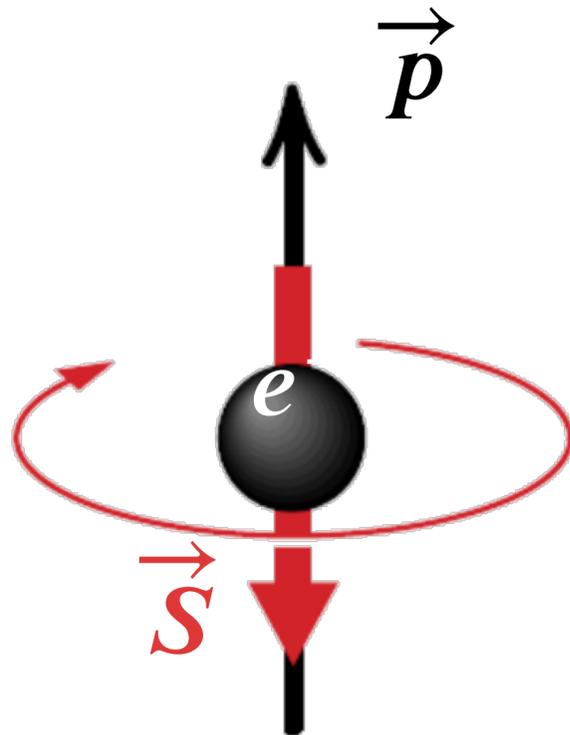
ANTI-TEILCHEN



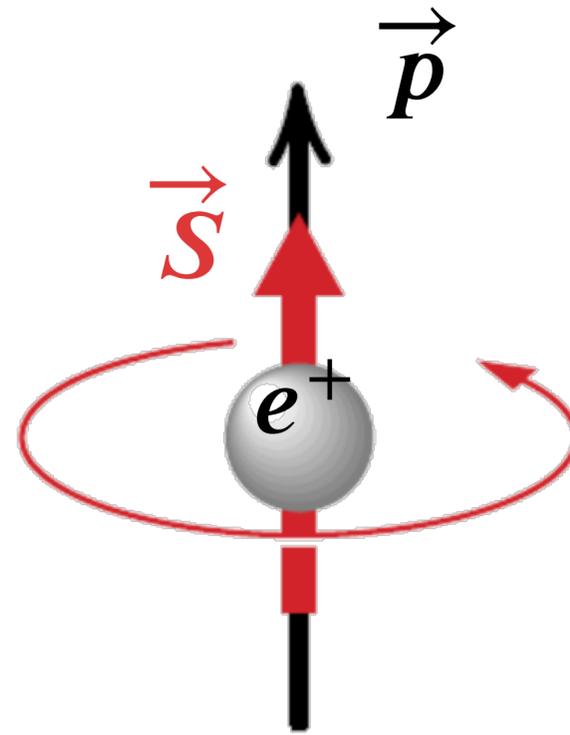
RH



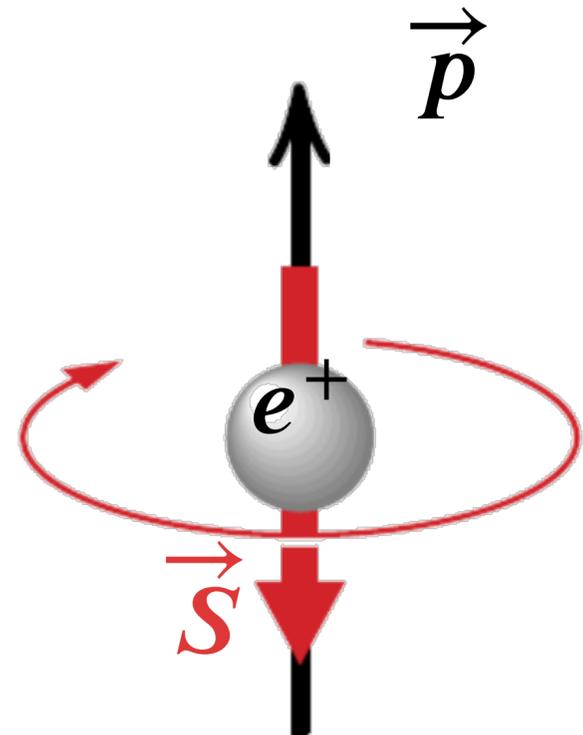
- rechtshändig



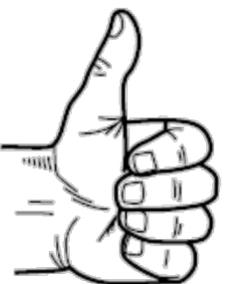
- linkshändig



- rechtshändig



- linkshändig



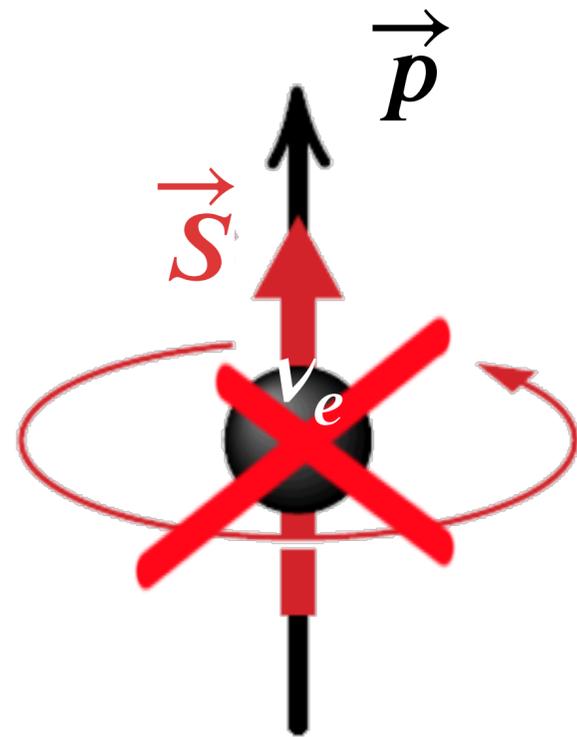
LH

Helizitätszustände von Neutrinos (Goldhaber)

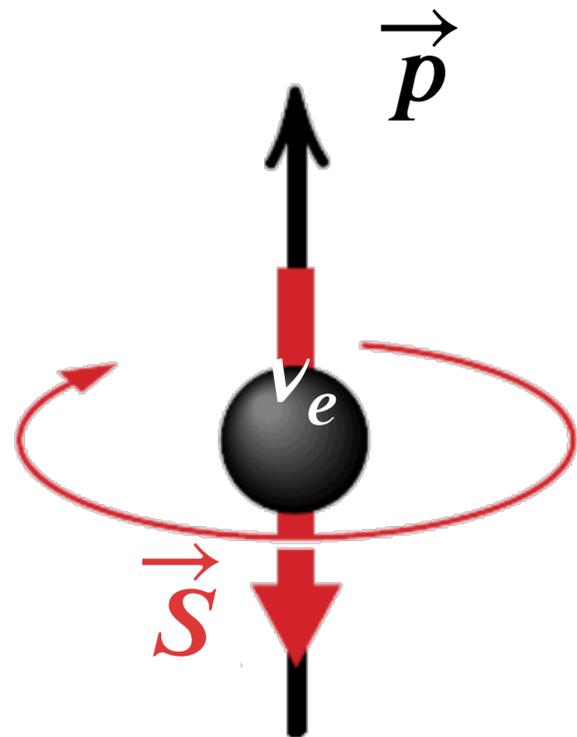
- Helizität: linkshändige Neutrinos und rechtshändige Antineutrinos

Neutrinos

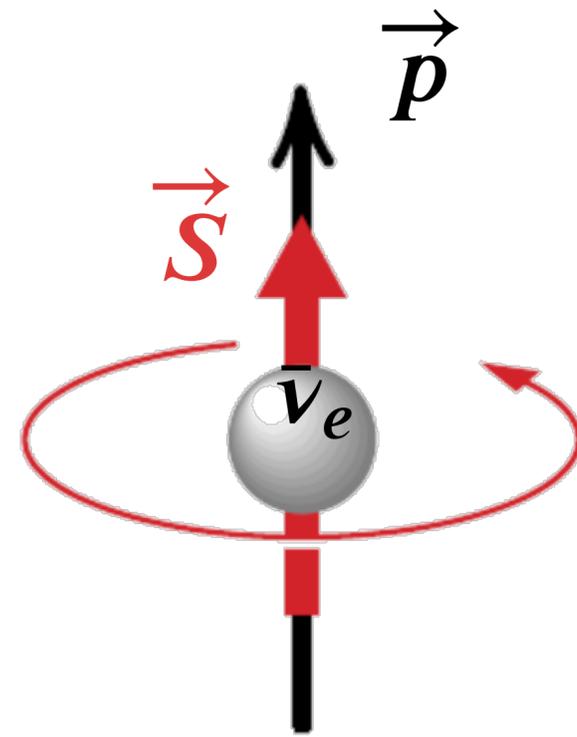
Anti-Neutrinos



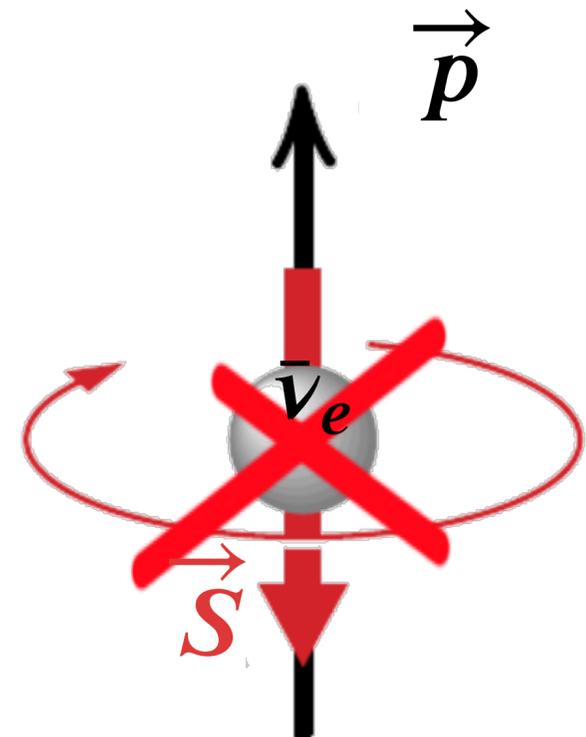
- rechtshändig
„steriles“ ν



- linkshändig



- rechtshändig



- linkshändig
„steriles“ ν

Paritätsverletzung: nur LH Neutrinos im SM

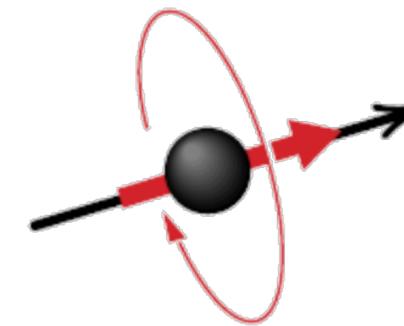
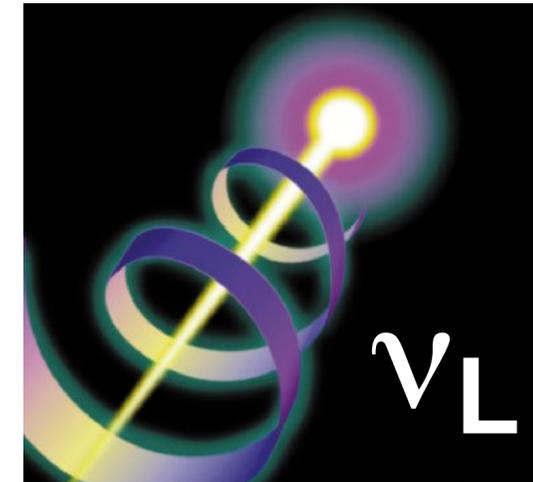
- Neutrinos: rein linkshändige Teilchen $\nu = \nu_L$

- SM: **linkshändige Neutrinos** $\nu = \nu_L$
rechtshändige Antineutrinos $\bar{\nu} = \bar{\nu}_R$

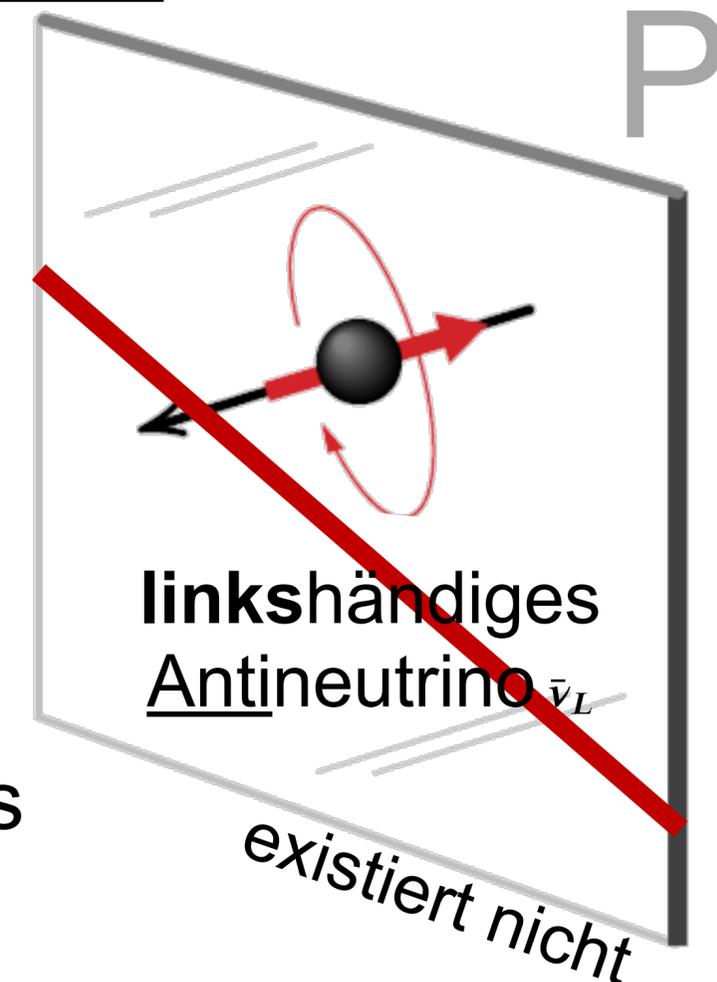
- **linkshändige** $\bar{\nu}_L$ bzw. **rechtshändige** ν_R
existieren nicht im Standardmodell

- Schwache Wechselwirkung besitzt eine Händigkeit:

- sie unterscheidet ob Teilchen **linkshändig** oder **rechtshändig** sind



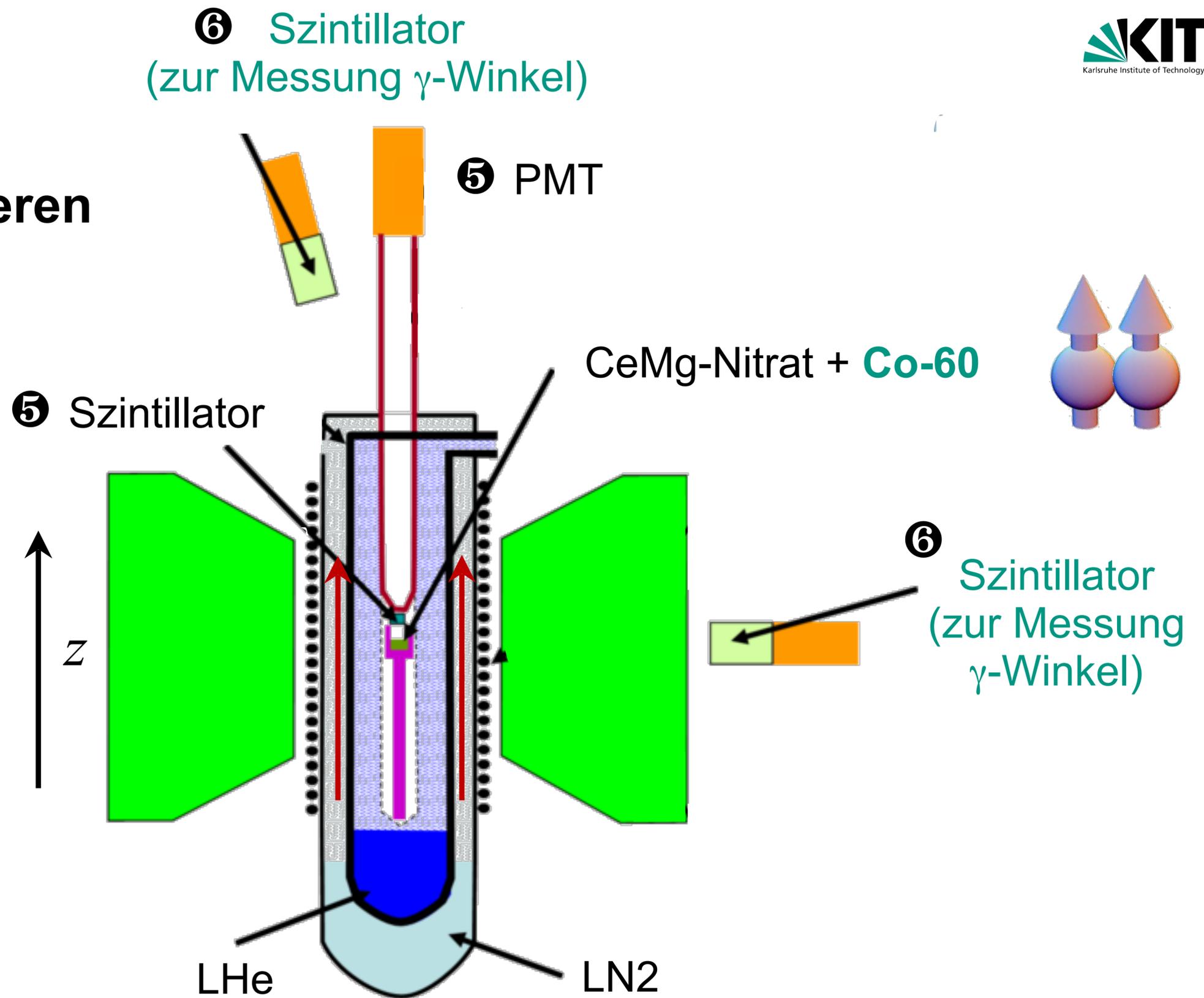
rechtshändiges Antineutrino $\bar{\nu}_R$



Wu-Experiment: Ablauf

■ Phasen beim Experimentieren

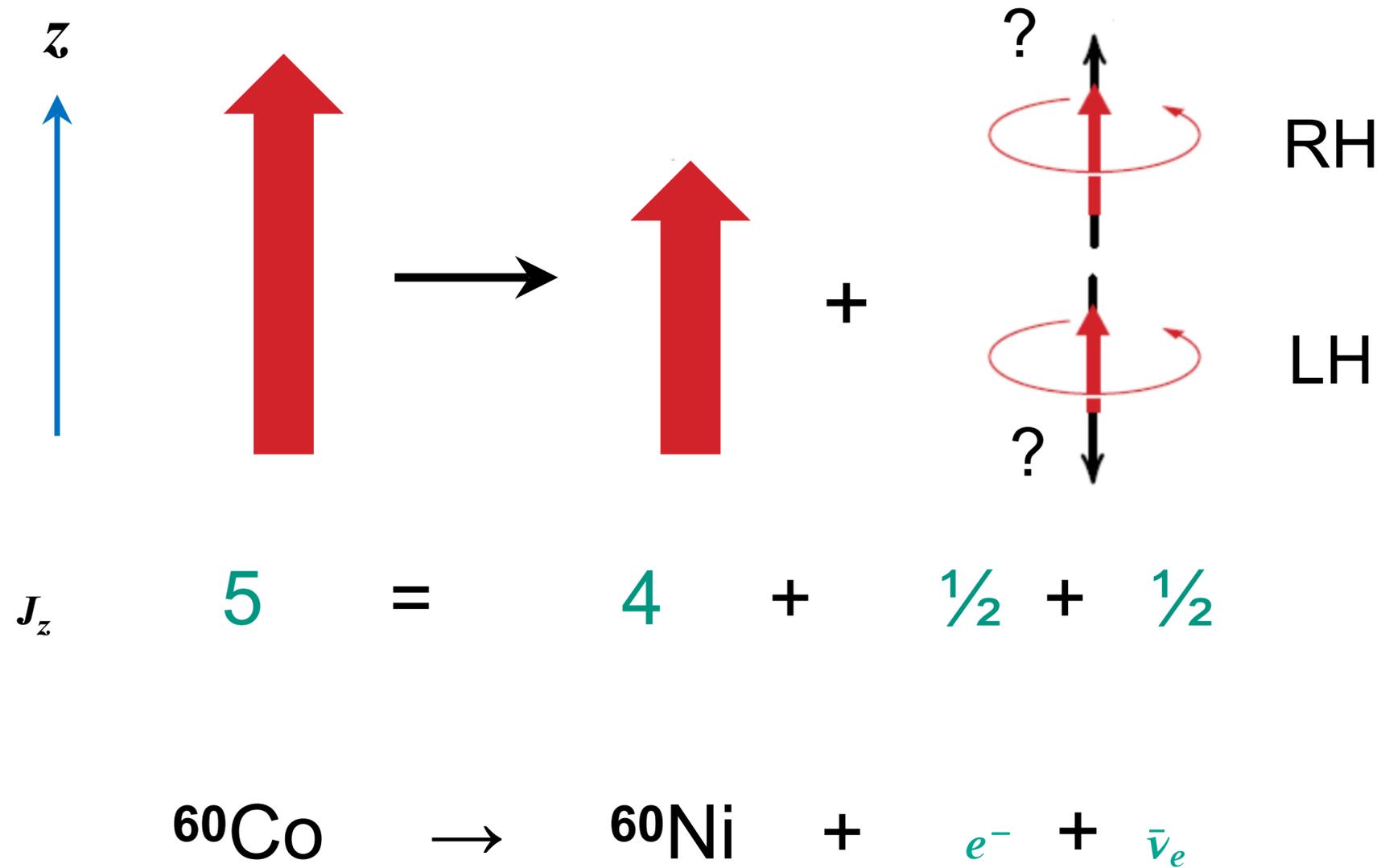
- polarisiere Co-60 mit starkem externen B-Feld
- überprüfe, dass Co-60 Kerne polarisiert sind
- messe die **Richtung der Elektronen** aus β -Zerfall
- bestimme ob Vorzugsrichtung



Q: wikicommons

Wu-Experiment: Bedeutung für Helizität von $e^- \bar{\nu}_e$

Spins beim Co-60 Zerfall (polarisiert)



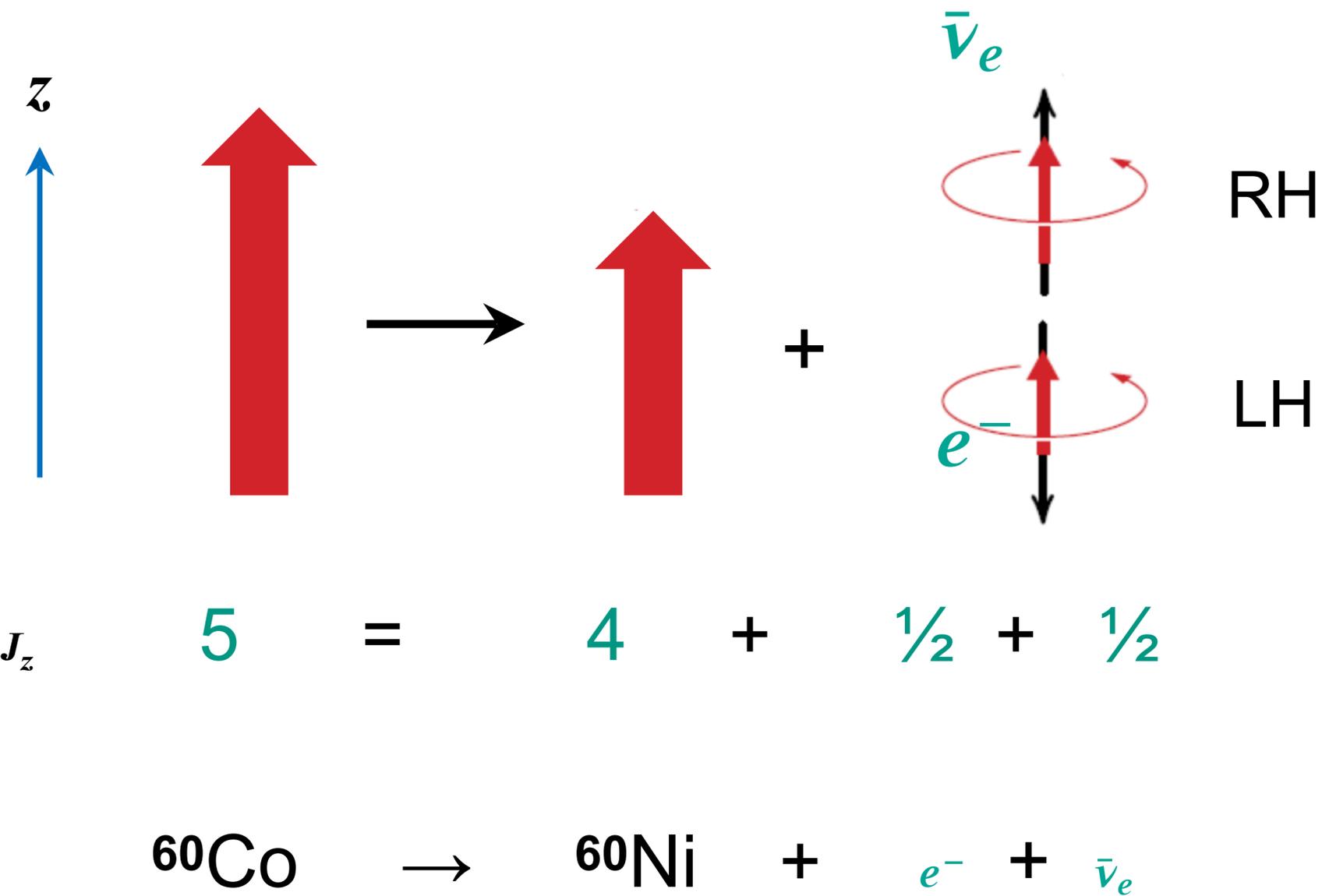
$${}^{60}\text{Co} (5^+) \rightarrow {}^{60}\text{Ni}^* (4^+) + e^- + \bar{\nu}_e$$

- **Impulse** von e^- und $\bar{\nu}_e$ **antiparallel** da β -Zerfall in Ruhe ($\sum \vec{p}_i = 0$)
- **Spins** von e^- und $\bar{\nu}_e$ **parallel** da Kernspins $J_z = 5 \rightarrow J_z = 4$
- ein Teilchen muss daher **RH** & ein Teilchen muss **LH** sein

Q: LANL

Wu-Experiment: Bedeutung für Helizität von $e^- \bar{\nu}_e$

Spins beim Co-60 Zerfall (polarisiert)



- **Händigkeit** des $\bar{\nu}_e$: Bestimmung in unabhängigem Experiment* durch **M. Goldhaber**:



Helizität ($\bar{\nu}_e$) = RH

- Co-60 β -Zerfall: Emission

linkshändiges Elektron
rechtshändiges Antineutrino

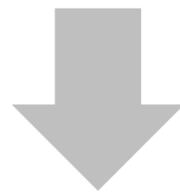
Q: LANL

* [Helicity of Neutrinos \(aps.org\)](http://aps.org)

Wu-Experiment: Result

- β -Elektron wird bevorzugt antiparallel zum Kernspin von Co-60 emittiert

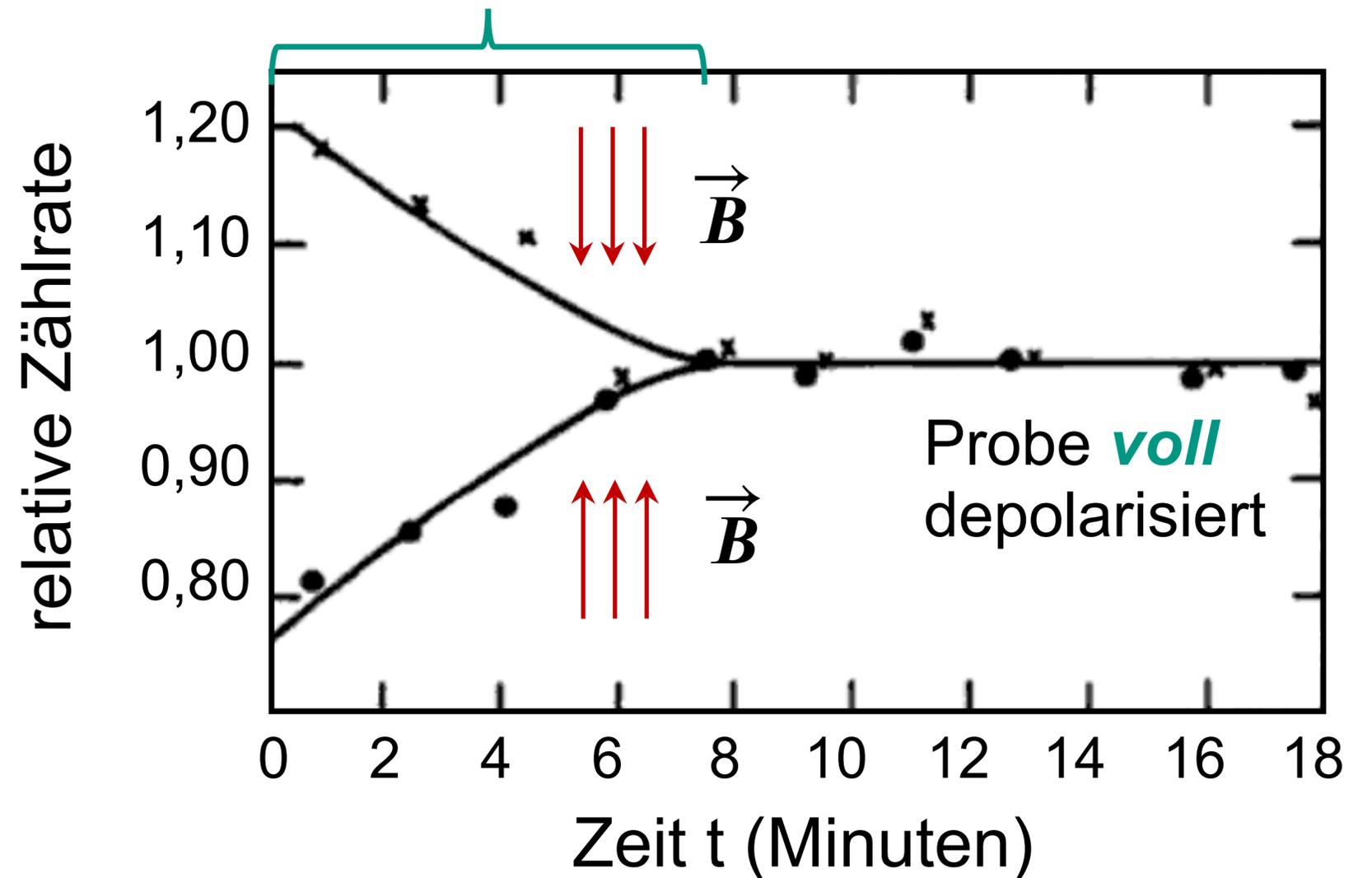
- Nachweis eines **endlichen Erwartungswertes** eines **Pseudoskalars**



- **DIE PARITÄT BEIM β -ZERFALL IST MAXIMAL (ZU 100%!!) VERLETZT**

verletzung!

langsame Proben-Erwärmung \rightarrow \vec{j} depolarisiert (via E2-Übergänge)



Q: CS Wu et al

- **15.1.1957**: Madame Wu & ihr Team reichen die Resultate ihrer Weihnachtmessungen bei *Phys. Rev. Letters* ein (publiziert am **15.2.57**)

Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay*

C. S. WU, *Columbia University, New York, New York*

AND

E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPES, AND R. P. HUDSON,
National Bureau of Standards, Washington, D. C.

(Received January 15, 1957)

IN a recent paper¹ on the question of parity in weak interactions, Lee and Yang critically surveyed the experimental information concerning this question and reached the conclusion that there is no existing evidence either to support or to refute parity conservation in weak interactions. They proposed a number of experiments on beta decays and hyperon and meson decays which would



[Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay \(aps.org\)](https://www.aps.org)

Arbeiten von Lee und Yang & Madame Wu

- 1956: Lee & Yang erhalten den Nobelpreis nur wenige Monate später, **Beweise der Paritätsverletzung wurden beim Nobelpreis leider ignoriert**
 - Madame Wu leider nicht vom Nobelpreiskomitee berücksichtigt...



李政道

杨振宁

Tsung-Dao Lee Chen Ning Yang



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



吴健雄

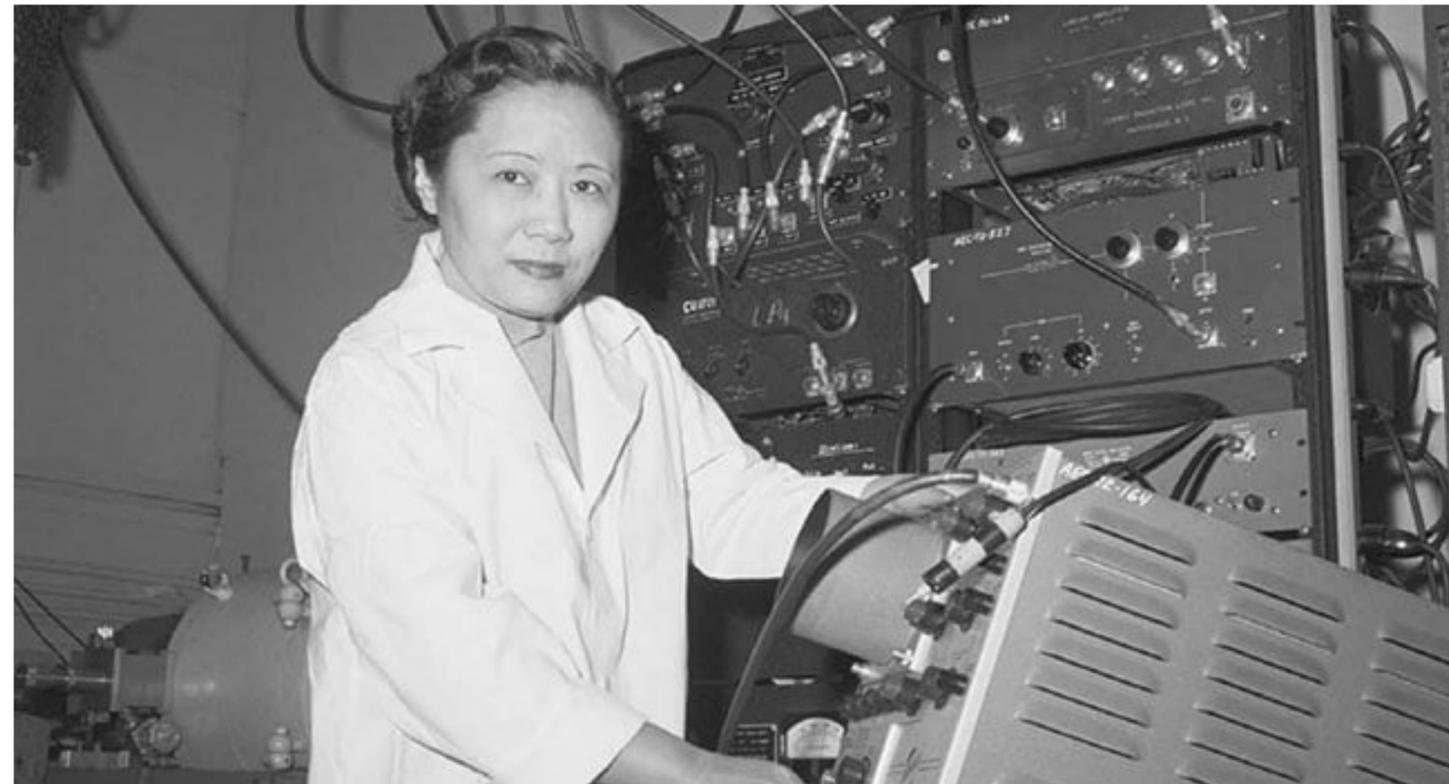
Madame Wu – späte Ehrung

- Madame Wu – 2021 Ehrung via US Postal Stamp



Feb. 1, 2021

Nuclear Physicist Chien-Shiung Wu to be Honored on a U.S. Postal Service Commemorative Forever Stamp

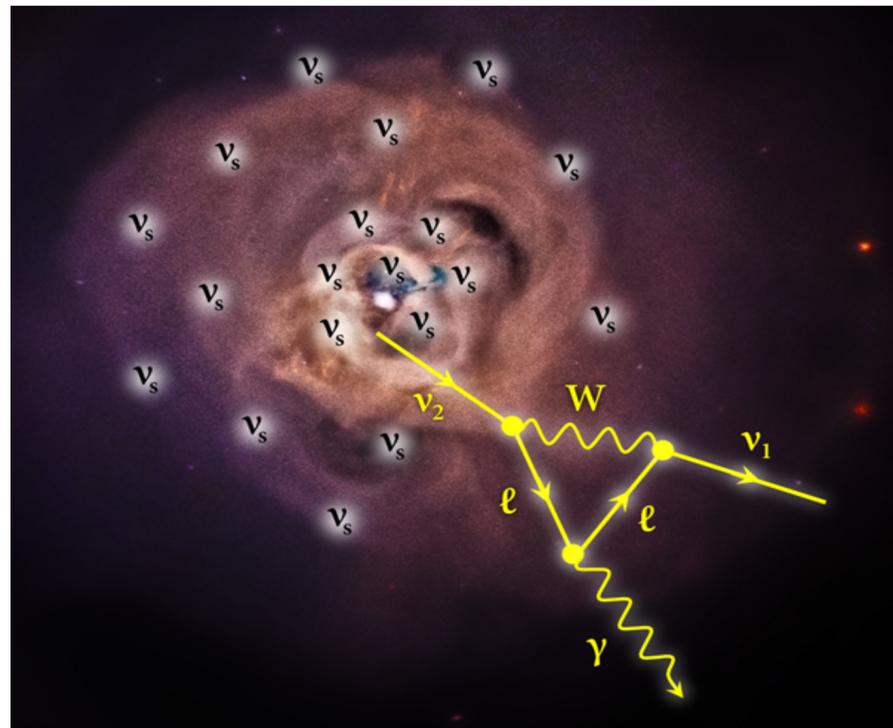


„The First Lady of Physics“

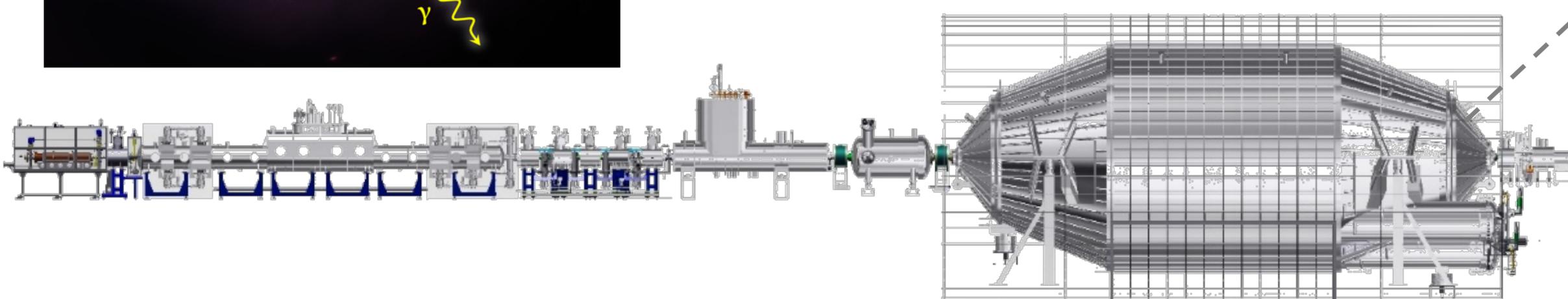
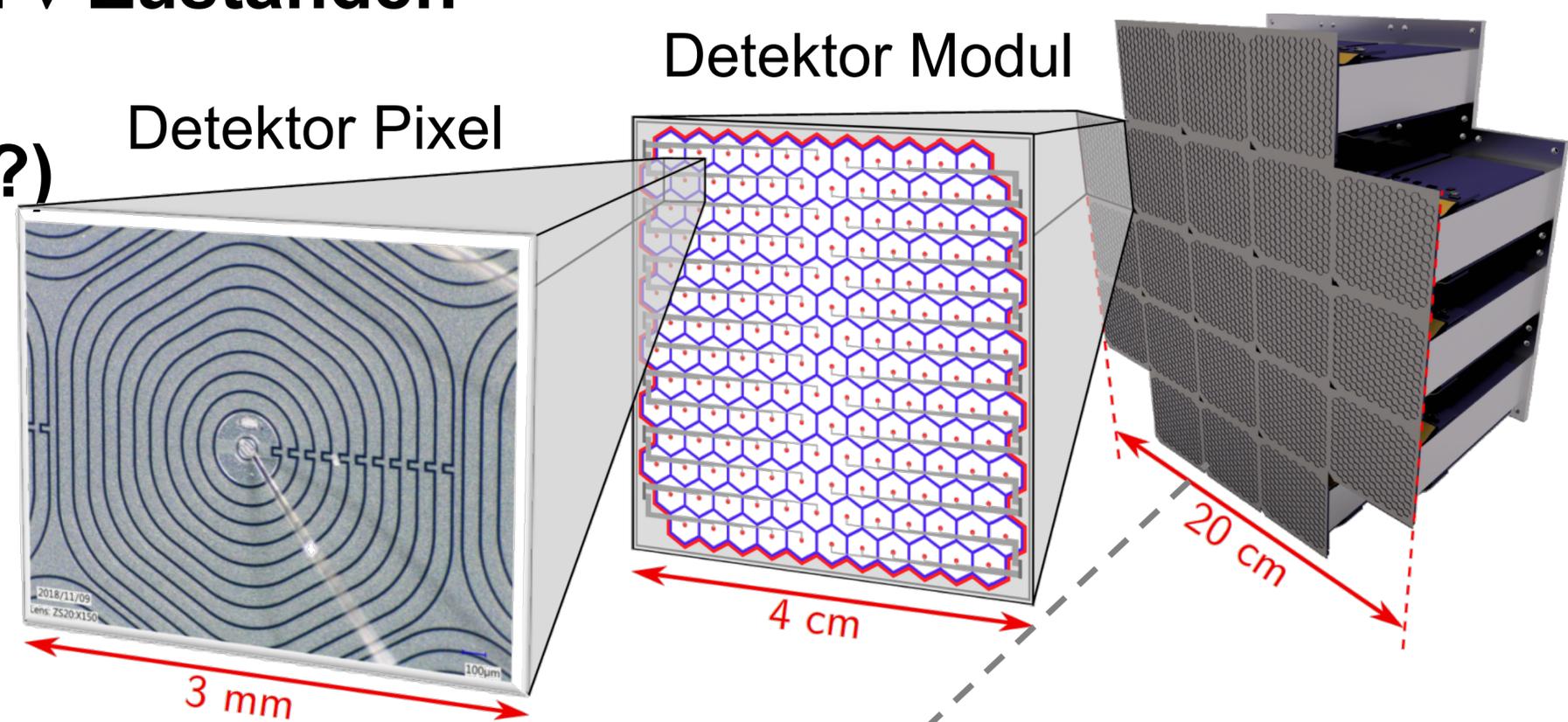
Q: USPS, pionterest

Suche nach 'sterilen' Neutrinos mit KATRIN

- KATRIN sucht nach neuartigen ν -Zuständen (sterile ν 's) im Massenbereich von eV bis keV (Dunkle Materie?)



Evidenz als X-Ray Signal?



TRISTAN – Detektor
TRitium **I**nteraction on
STerile (**A**) **N**eutrinos

Q: LANL, KIT, TUM

Paritätsverletzung: Pion-Zerfall – in μ^+ bzw. e^+

■ **Lederman: Verhältnis der Zerfälle in μ^+ bzw. e^+ gibt Aufschluss über Parität**

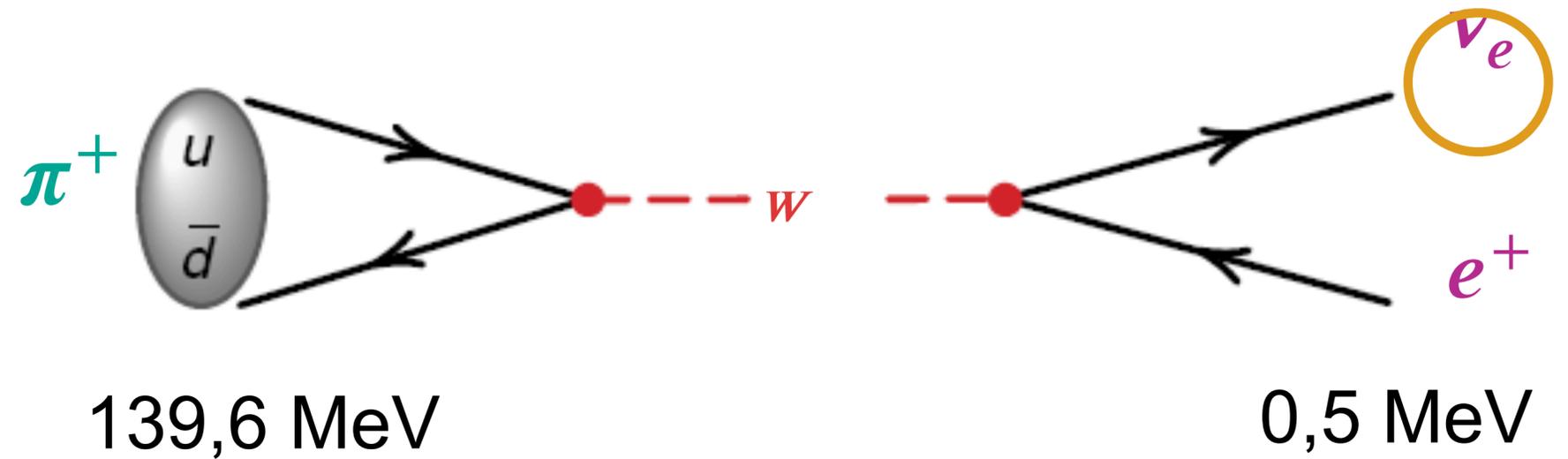
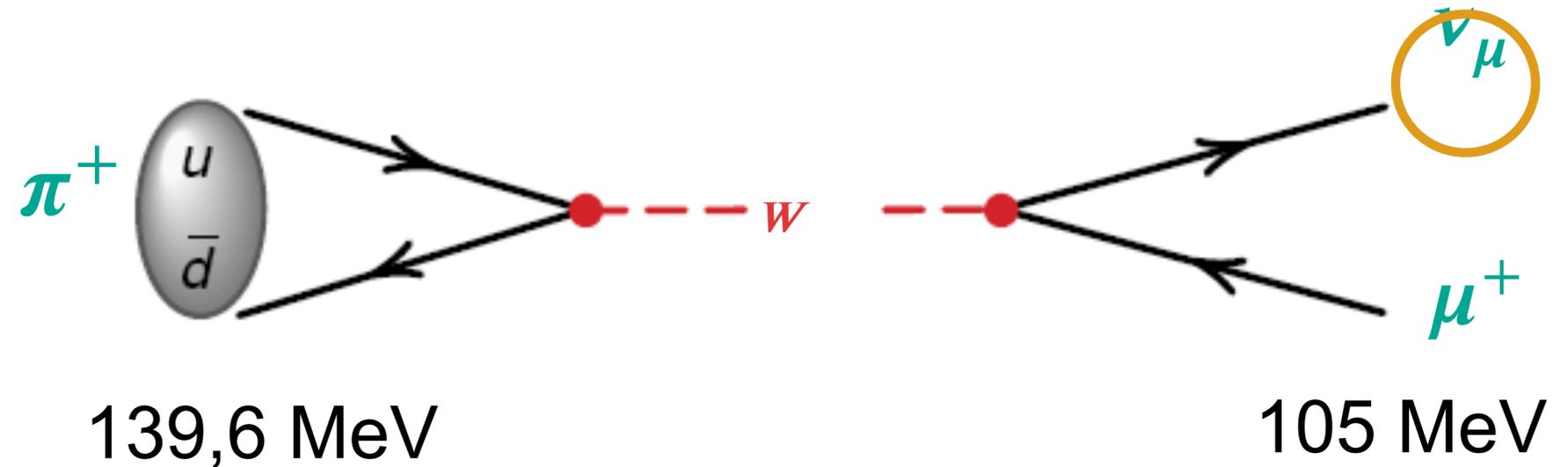
- pseudoskalaras Pion π^+
mit $J^P = 0^-$

- Zerfallsmoden Pion π^+ :

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu$$

- Neutrino $\nu = \text{LH}$
& ultra-relativistisch,
d.h. mit **festgelegter Helizität** $h \cong -1$



Q: LANL, American IoP

Paritätsverletzung: Pion-Zerfall – in μ^+ bzw. e^+

- ultra-relativistisches Neutrino gibt die Helizität des geladenen Leptons vor

- pseudoskalaras Pion π^+ mit $J^P = 0^-$

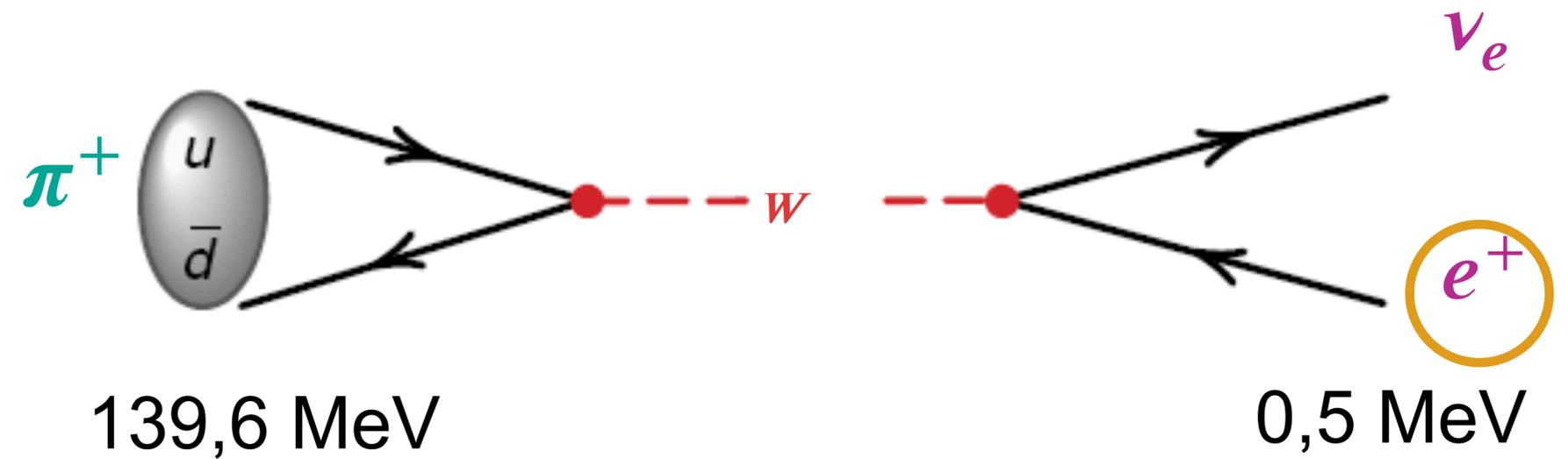
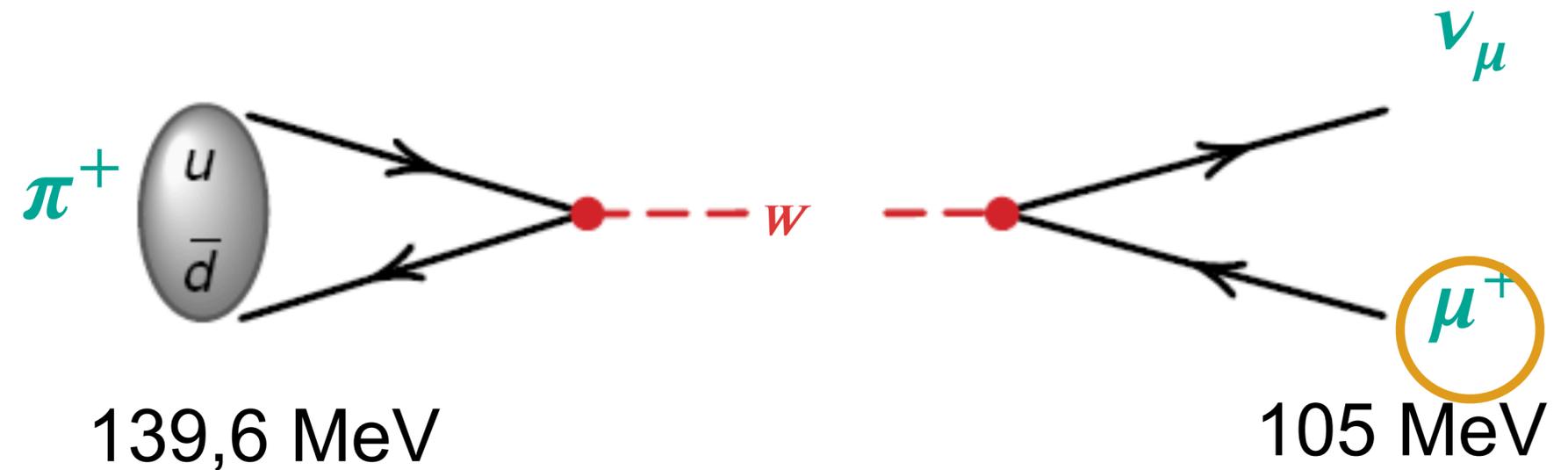
- geladenes Lepton: muss die 'falsche'

Helizität $h = -1$

annehmen

(Recap: für μ^+ bzw.

e^+ erwartet man jedoch den Wert $h \approx +1$!)



Q: LANL, American IoP

Paritätsverletzung: Pion-Zerfall – in μ^+ bzw. e^+

■ Helizität des geladenen Leptons: keine Lorentz-invariante Größe

- massebehaftete Teilchen:

Helizität $h = \pm v/c$

d.h. abhängig von v
(kinet. Energie)

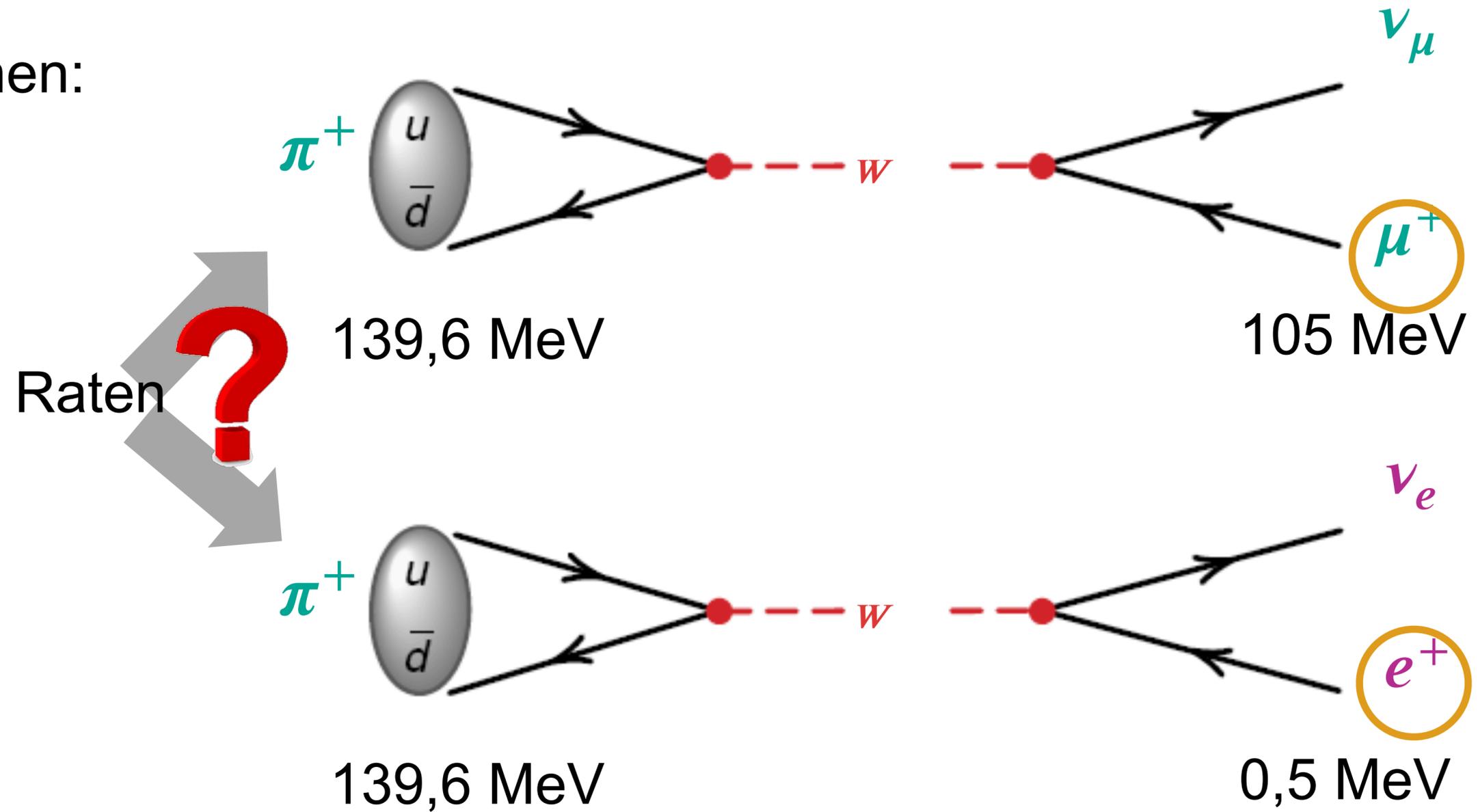
Leptonen (e^-, μ^-)

Helizität $h = -v/c$

Antileptonen (e^+, μ^+)

Helizität $h = +v/c$

- Raten in μ^+ bzw. e^+ ?



Q: LANL, American IoP

Paritätsverletzung: Pion-Zerfall in Ruhe – in μ^+

■ Ausgangszustand $J^P = 0^-$, im π^+ – Ruhesystem muss gelten: $\sum \vec{p}_i = 0$ $\sum \vec{S}_i = 0$

- Zerfall in **schweres** Myon mit $m(\mu^+) = 105 \text{ MeV}$

- 'masseloses' Neutrino:

$$p_\nu = E_\nu = 29,8 \text{ MeV}$$

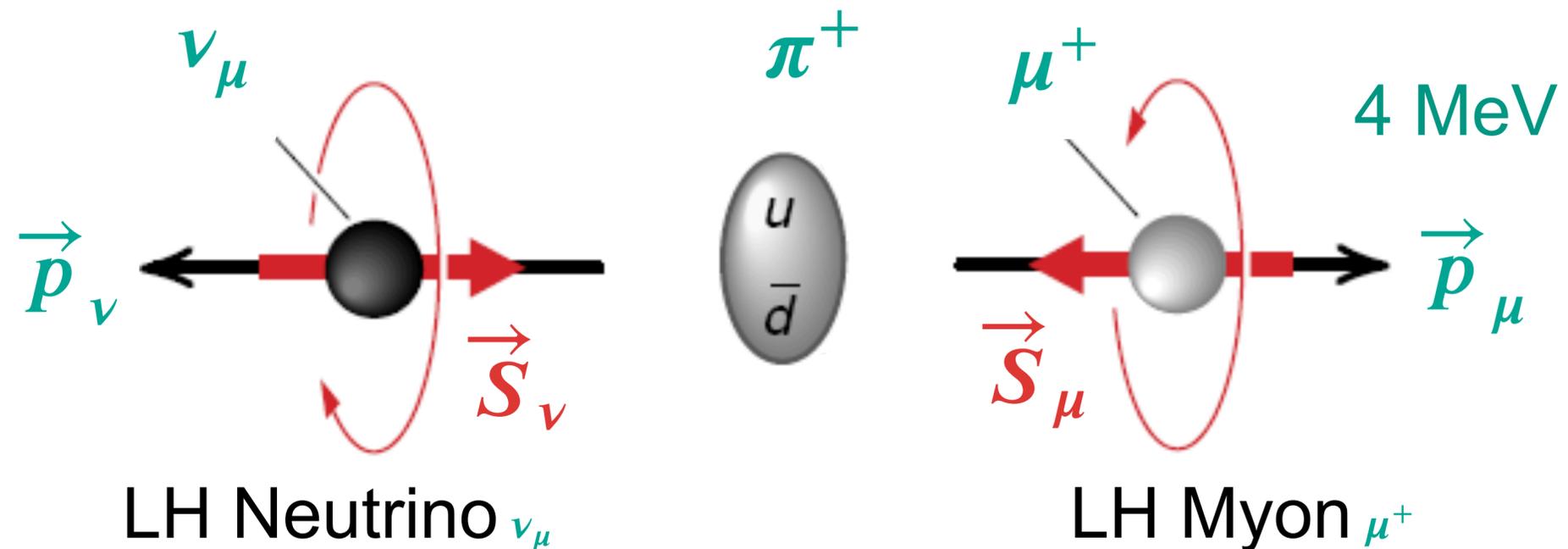
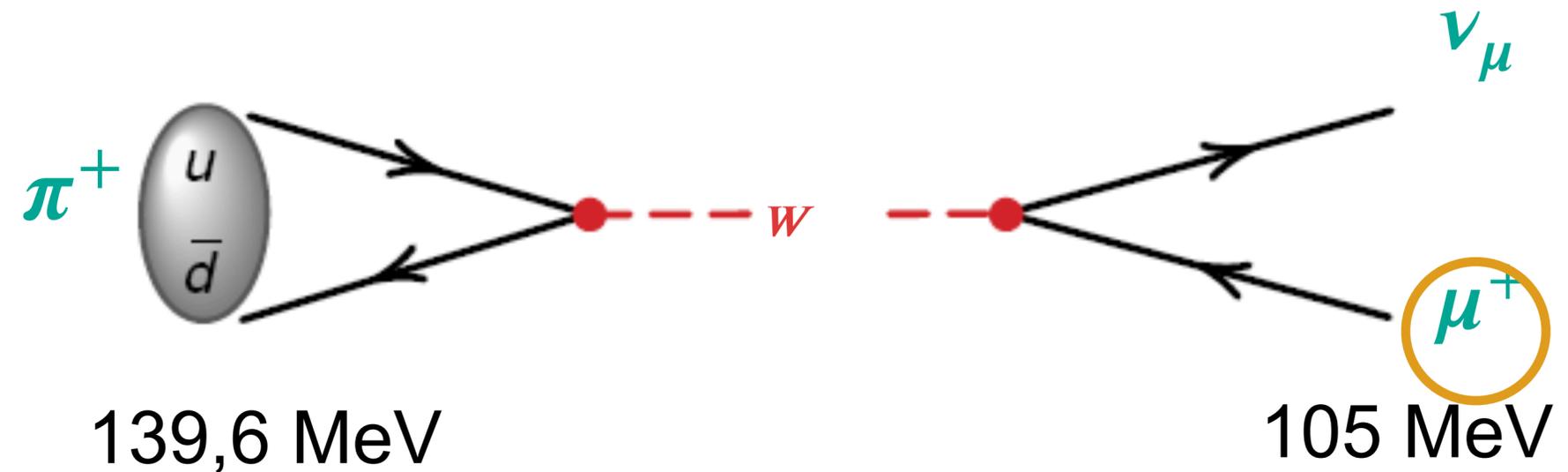
LH Zustand

- **schweres μ^+** : v/c **klein**

$$p_\mu = p_\nu = 29,8 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow E_\mu = 4 \text{ MeV}$$

- **großer Anteil von μ^+ mit „falscher“ (LH) Helizität**



Paritätsverletzung: Pion-Zerfall in Ruhe – in e^+

■ Ausgangszustand $J^P = 0^-$, im π^+ – Ruhesystem muss gelten: $\sum \vec{p}_i = 0$ $\sum \vec{S}_i = 0$

- Zerfall in **leichtes** Positron mit $m(e^+) = 0,5 \text{ MeV}$

- 'masseloses' Neutrino:

$$p_\nu = E_\nu \approx 70 \text{ MeV}$$

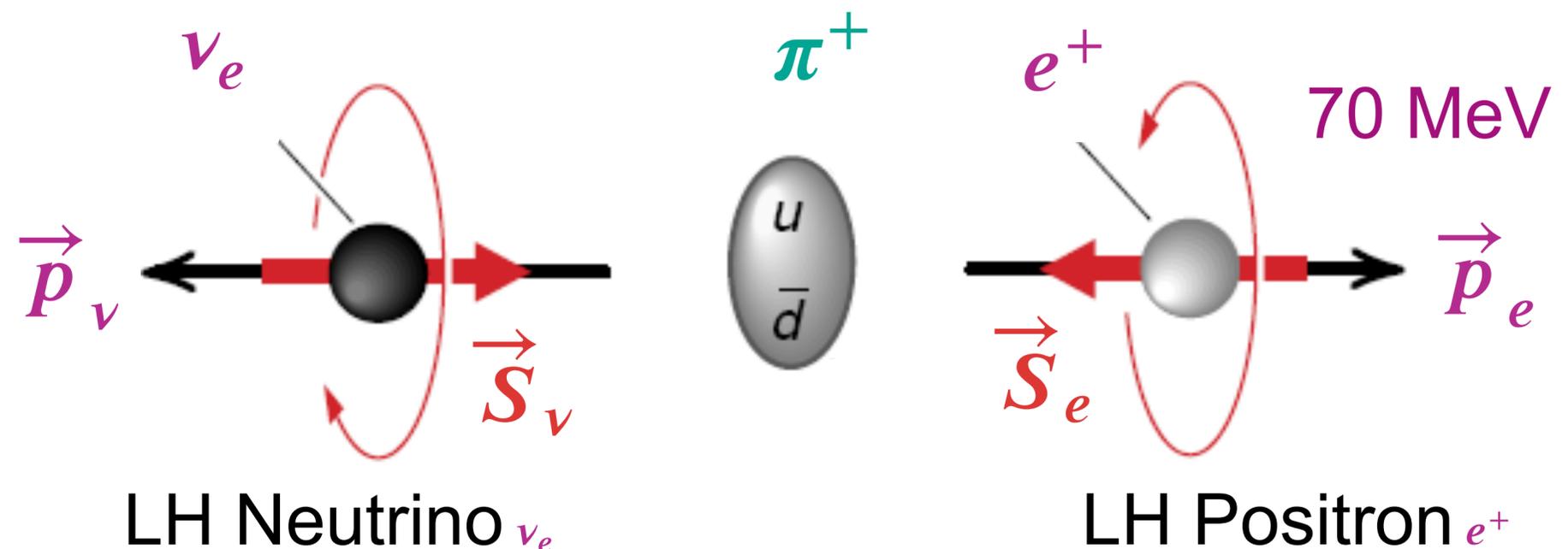
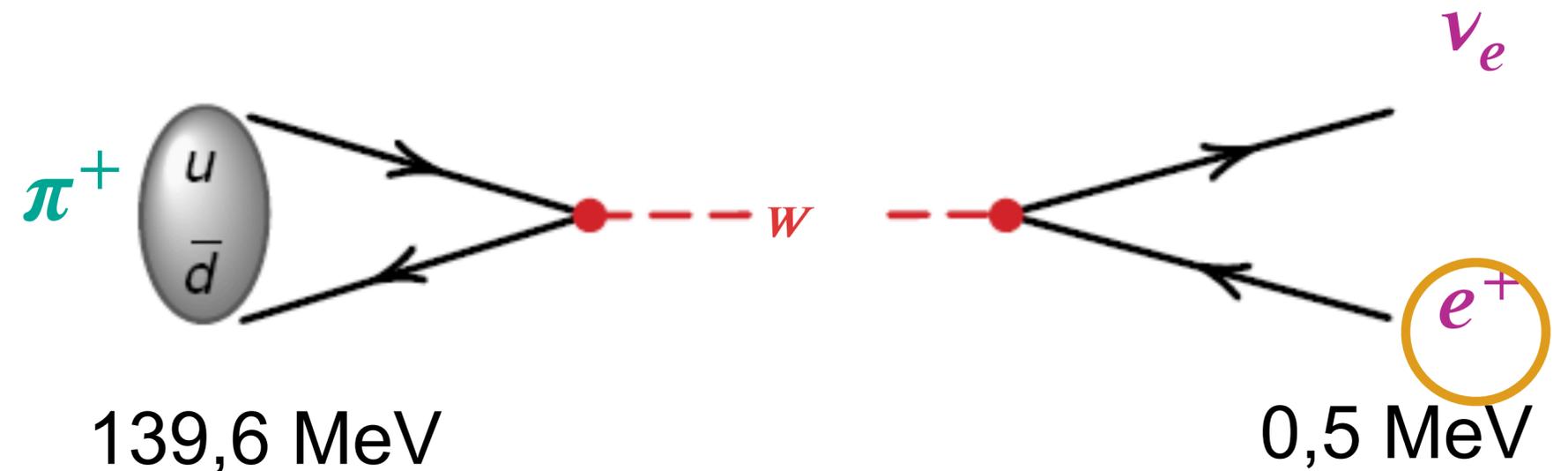
LH Zustand

- **leichtes e^+ : v/c groß**

$$p_e = p_\nu \approx 70 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow E_e \approx 70 \text{ MeV}$$

- **kleiner Anteil von e^+ mit „falscher“ (LH) Helizität**



- Pionzerfall in Ruhe: man beobachtet und erwartet eine starke Bevorzugung des Zerfallskanals $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ gegenüber $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu$

$$R_{theo} = \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)} = \frac{m_e^2}{m_\mu^2} \cdot \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2 = 1,275 \cdot 10^{-4}$$

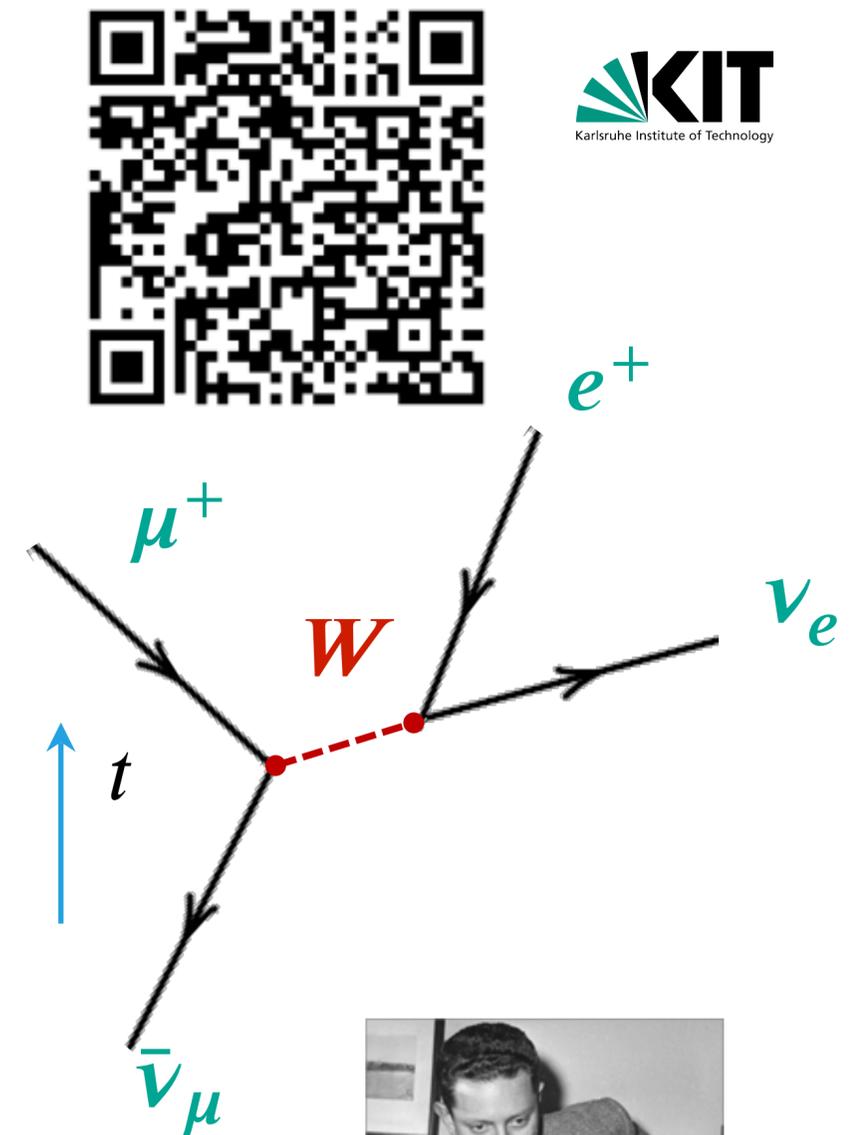
$$R_{exp} = (1,267 \pm 0,023) \cdot 10^{-4}$$

- Pionzerfall in Ruhe: **maximale Paritätsverletzung**
 - gute Übereinstimmung von Theorie & Experimente
 - **Neutrinos ausschließlich LH, Antineutrinos ausschließlich RH**

Paritätsverletzung

■ Was passiert mit P beim nachfolgenden μ^+ - Zerfall ?

- A) die Parität ist nur beim **2-Körper-Zerfall** des Pions verletzt, beim **3-Körper Zerfall** des Myons jedoch nicht, da andere **Kinematik!**
- B) die Parität beim Zerfall des μ^+ nur zu einem kleineren Teil verletzt, da die **Zerfallsenergie** (105 MeV) kleiner ist als beim Zerfall des π^+
- C) die Parität beim Zerfall des μ^+ ist wiederum **maximal verletzt**, genauso wie beim Zerfall des π^+ (schwache Wechselwirkung)



Leon Lederman
& Team

Paritätsverletzung: Zirkularpolarisation Gammas

■ Team 3: Test der Paritäts-Verletzung über zirkular polarisierte Gammas

VOLUME 104, NUMBER 1
OCTOBER 1, 1956
Question of Parity Conservation in Weak Interactions*
T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*



OCTOBER 1, 1956



Herwig Schopper* & Team

...wir messen die Zirkular-Polarisation von Gammas!

...
März 1957

*erster Leiter des ETP in Karlsruhe
später: CERN Generaldirektor

** im März am KIT zum 100 Geburtstag

$\theta^{+-} \tau^+$ Puzzle



Q: American IOP, nobelprize, pinterest

Paritätsverletzung: Zirkularpolarisation Gammas

■ Team '22: Test der Paritäts-Verletzung über zirkular polarisierte Gammas



DIY
DO IT YOURSELF



98
Jahre

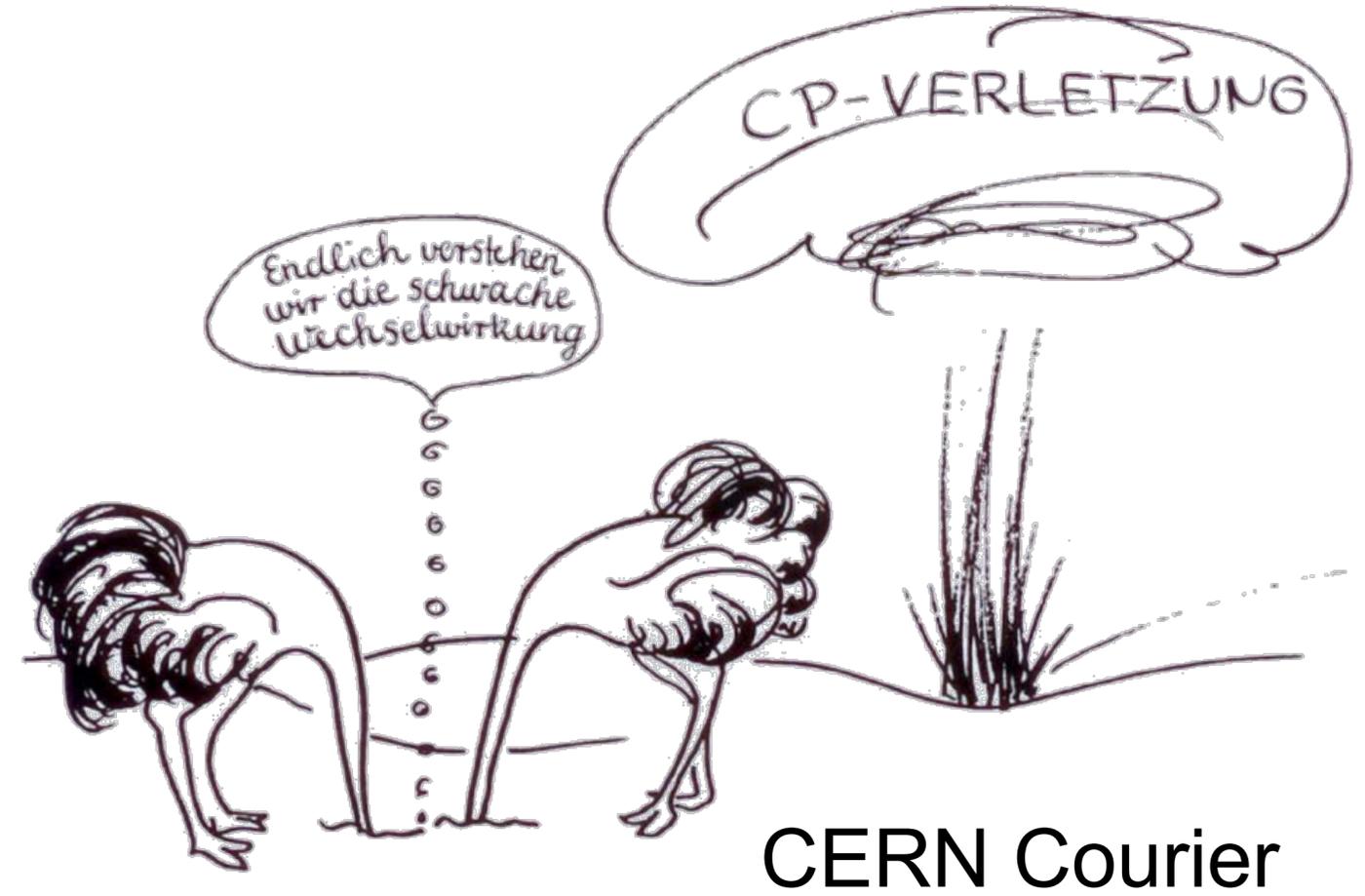
viel
Erfolg!

- von longitudinal polarisierten Elektronen zu zirkular polarisierten Gammas*
- **Original-Herwig-Schopper-Apparatur nur hier im F-Praktikum**
- **Paritätsverletzung selber nachmessen!**

**eines der von Lee & Yang diskutierten Experimente, das damals als undurchführbar angesehen wurde*

Katzen





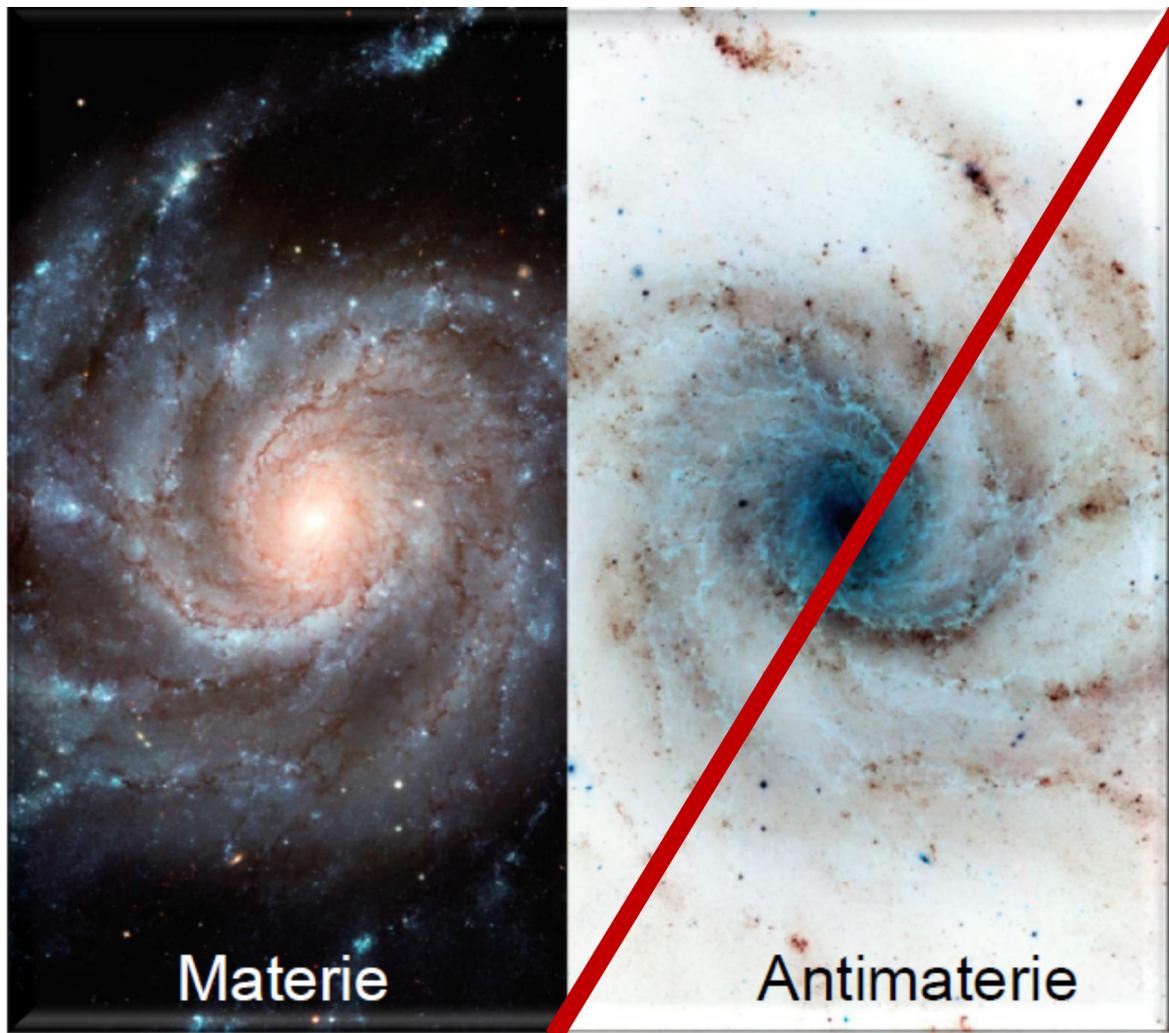
CERN Courier

CP-VERLETZUNG: SELTSAME KAONEN

Sacharov-Kriterien für Baryon-Asymmetrie, Teil-II

- **Universum zeigt Baryon-Asymmetrie: nur Materie, keine Antimaterie**

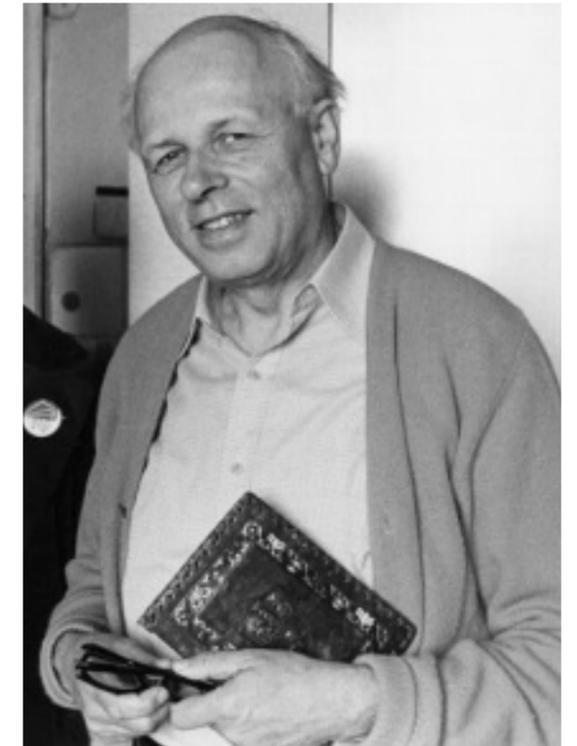
- **drei Sacharov-Kriterien** für eine erfolgreiche **Baryogenese**:



1. Verletzung der
Baryonenzahlerhaltung*

2. Verletzung der **CP-Invarianz**

3. kein thermodynamisches
Gleichgewicht



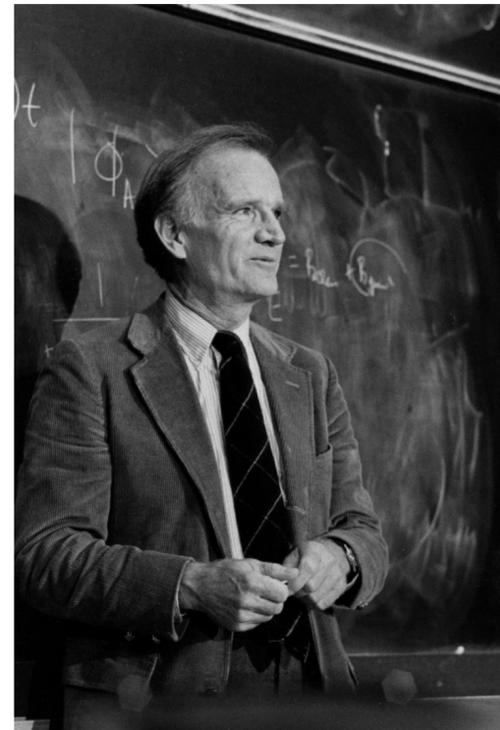
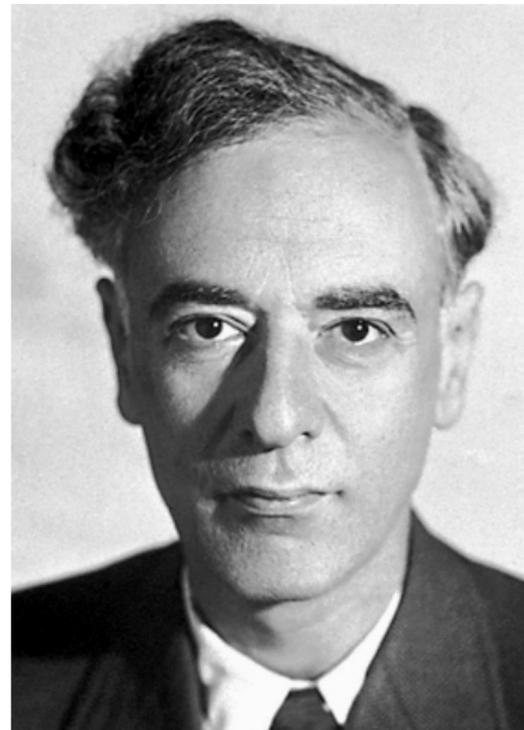
Q: spektrum, wikimedia

Andrej Dmitrijewisch Sacharov (1921-1989)

1967: **Baryon-Asymmetrie**

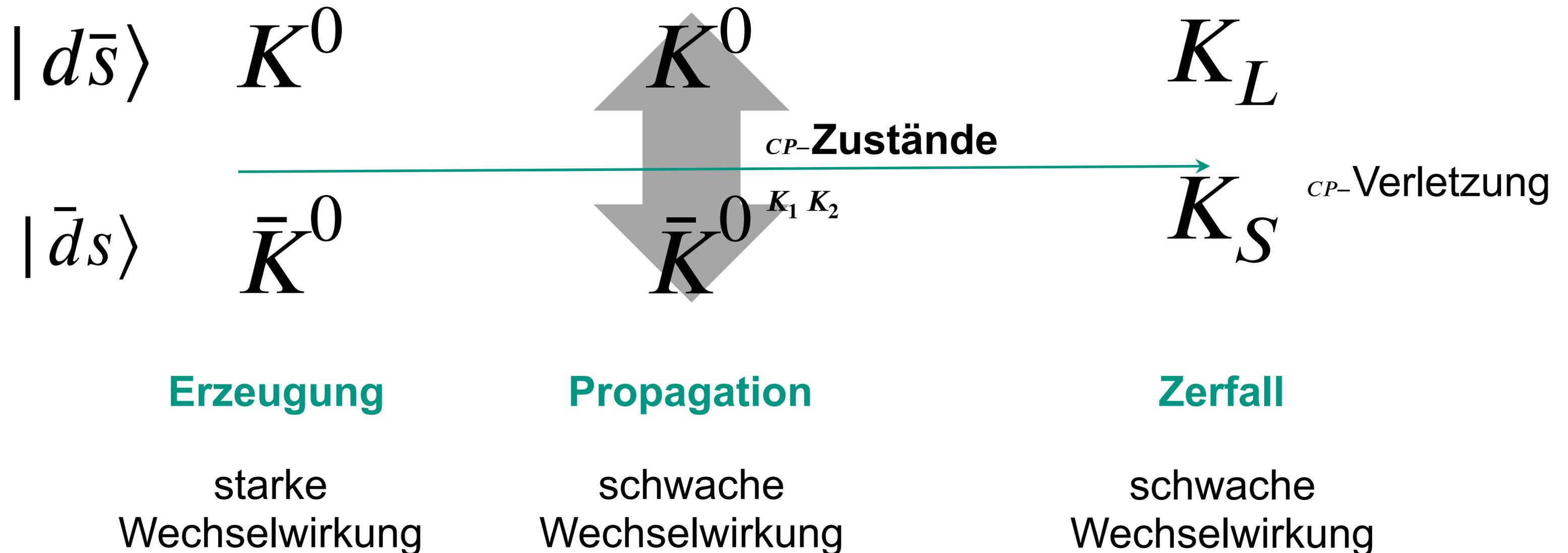
Landau: CP – eine Symmetrie der Natur?

- Lev Landau postuliert zunächst, dass die CP Symmetrie erhalten ist!
 - Landau: Physik invariant, wenn Kombination von **P-Operation** (Spiegelbild) & **Ladungskonjugation C** (Teilchen-Antiteilchen) erfolgt: **CP-Symmetrie**
 - Cronin und Fitch (1964): **CP-Symmetrie** ist **verletzt** im System der neutralen Kaonen durch die schwache Wechselwirkung!



Seltsame Kaonen: Mischungseffekte

- Grundbeobachtung: Teilchen mit identischen Quantenzahlen können bei der Propagation **mischen!** Zustände der **starken** bzw. **schwachen Ww.**



- ein sehr wichtiges System in der Teilchenphysik, nicht nur wegen CP!

- neutrale Kaonen als $q\bar{q}$ Systeme mit Strangeness

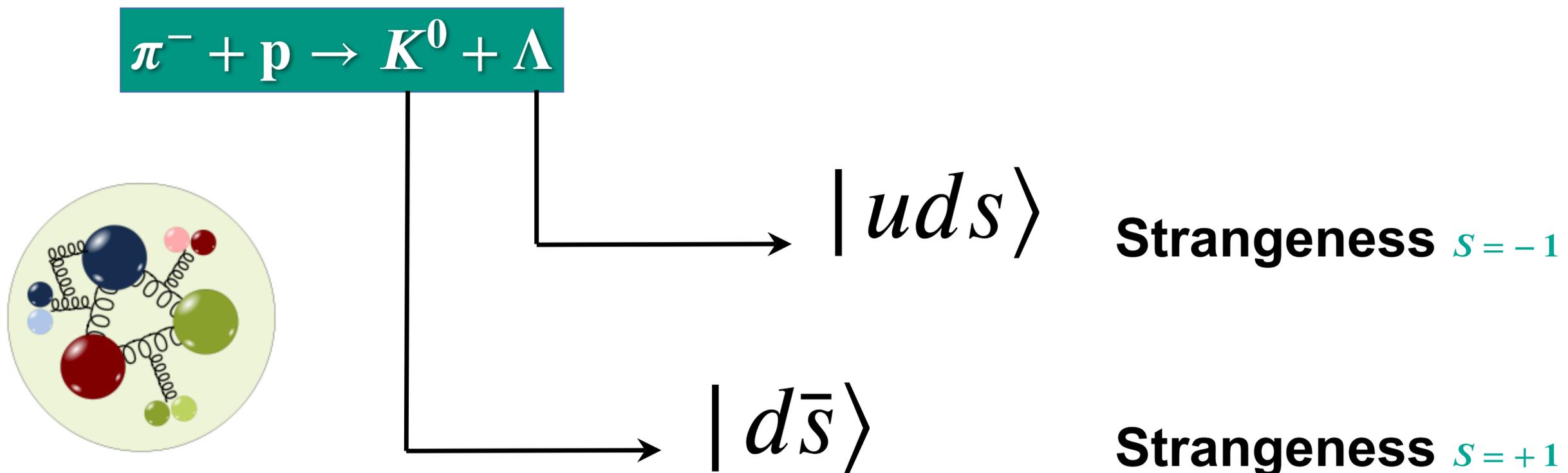


- Masse: 497,6 MeV, instabil mit Lebensdauer τ : $\sim 10^{-10}$ s (K_S), $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ s (K_L)
- Erzeugung über starke Wechselwirkung (Erhaltung der Strangeness)
- Zerfall über schwache Wechselwirkung (Verletzung der Strangeness)

Neutrale Kaonen: Erzeugung

- **Erzeugung** nur über starke Wechselwirkung: Paare mit $S = +1$ $S = -1$

- Beispiel: Wechselwirkung eines energetischen Pions mit Proton



Strangeness-erhaltend

Neutrale Kaonen: Zerfall

- **Zerfall** nur über schwache Wechselwirkung: **Strangeness** $\Delta S = \pm 1$

- Beispiel: Zerfall eines Kaons in 2 Pionen



$$|d\bar{s}\rangle$$

Strangeness $S = +1$

$$|u\bar{d}\rangle$$

Strangeness $S = 0$

$$|\bar{u}d\rangle$$

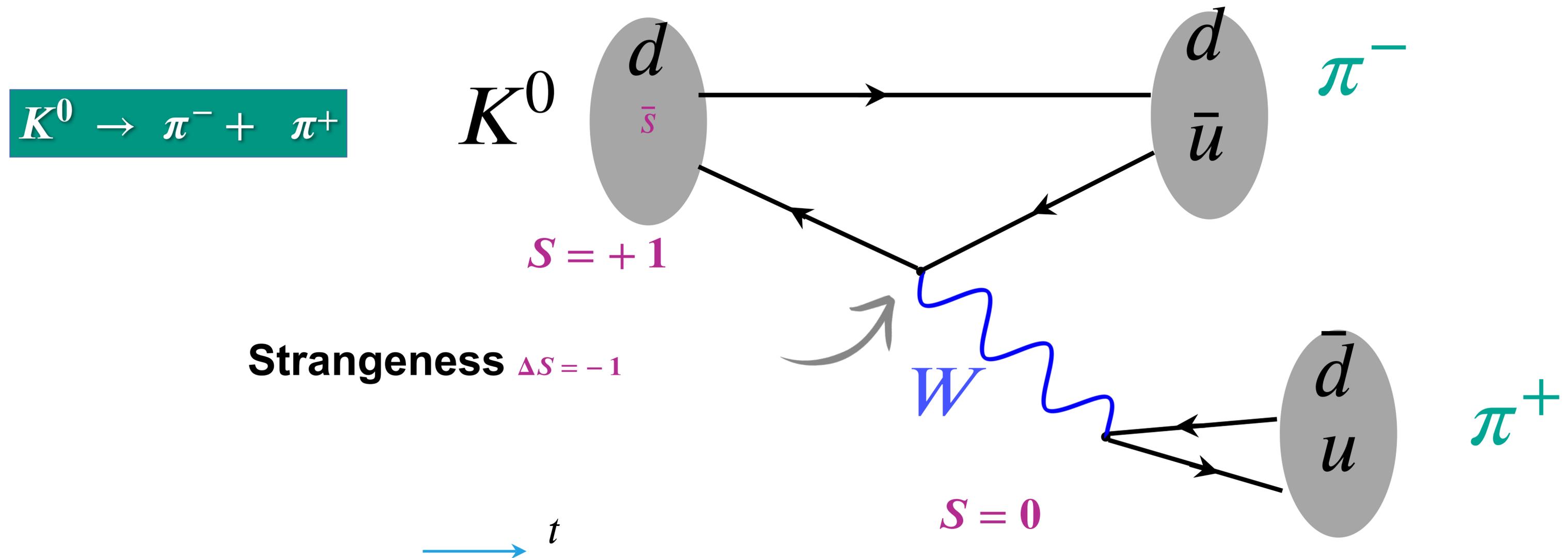
Strangeness $S = 0$

Strangeness-verletzend

Neutrale Kaonen: Zerfall

- **Zerfall** nur über schwache Wechselwirkung: **Strangeness** $\Delta S = \pm 1$

- Beispiel: Zerfall eines Kaons in 2 Pionen



- **Zerfall nur über schwache Wechselwirkung: Strangeness $\Delta S = \pm 1$**
 - Kaonen können (kinematisch) in 2 Pionen oder 3 Pionen zerfallen
 - relativ lange Zerfallszeiten ($\tau \sim 10^{-8} \dots 10^{-10} \text{s}$): **Propagationseffekte** wichtig!
 - Strangeness-ändernde Zerfälle $\Delta S = \pm 1$ (Übergänge $s \rightarrow u$ bzw. $\bar{s} \rightarrow \bar{u}$)
- **System der neutralen Kaonen besonders interessant**
 - ein „ideales Labor“ zum Studium der Eigenschaften der schwachen Ww.
 - zentrale Frage: ist die **CP-Symmetrie im System neutraler Kaonen** erhalten?

Neutrale Kaonen: Mesonen mit Strangeness

■ Neutrale Kaonen und P , C und CP -Eigenwerte

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

- interne Parität P

$$P(q\bar{q}) = -1^{\ell+1} \text{ mit } \ell = 0$$

$$P|K^0\rangle = -|K^0\rangle$$

$$P|\bar{K}^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle$$

- Ladungskonjugation C

$$C(q\bar{q}) = -1^{\ell+s} \text{ mit } \ell = s = 0$$

$$C|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle$$

$$C|\bar{K}^0\rangle = -|K^0\rangle$$

K^0 \bar{K}^0 sind
keine C -Eigenzustände

- Parität & Ladungskonjugation CP

$$CP|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle$$

$$CP|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle$$

K^0 \bar{K}^0 sind
keine CP -Eigenzustände

- (zunächst rein) formale Definition von CP-Eigenzuständen K_1, K_2

- bilde Linearkombinationen K_1, K_2 mit definierten CP-Eigenwerten

$$\boxed{|K_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle \right)} \quad \boxed{|K_2\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle \right)} \quad \text{Mischung von } K^0, \bar{K}^0$$

- K_1, K_2 sind Mischungen von K^0, \bar{K}^0 , die CP-Eigenzustände darstellen

$$\boxed{CP|K_1\rangle = +|K_1\rangle} \quad \boxed{CP|K_2\rangle = -|K_2\rangle} \quad \text{Eigenwerte } = +1, -1$$

- K_1, K_2 sind keine Eigenzustände der starken Wechselwirkung & besitzen auch keine exakt definierten Massen!

- **Kaon-Zustände:** K^0 und \bar{K}^0 sind **orthogonale Superpositionen** von K_1 und K_2

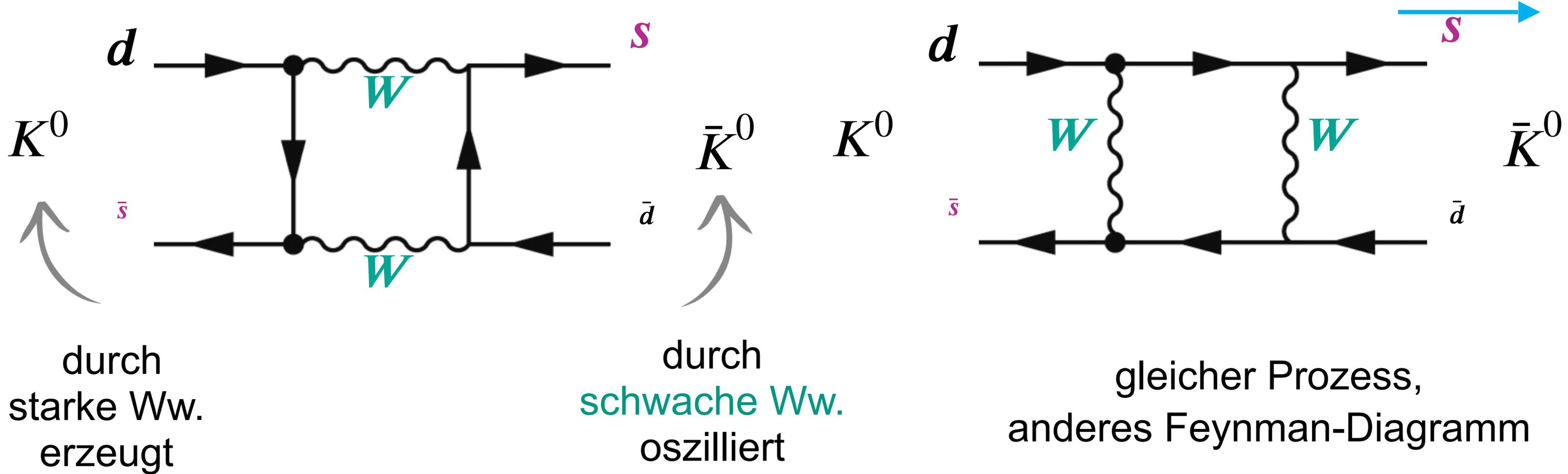
$$|K^0\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_1\rangle + |K_2\rangle)$$

$$|\bar{K}^0\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|K_1\rangle - |K_2\rangle)$$

- Zustände K^0 und \bar{K}^0 sind Eigenzustände der **starken Wechselwirkung** mit wohldefinierten, identischen Massen (**CPT-Theorem**)
- Zustände K_1 und K_2 entstehen bei der **Propagation** von Kaonen durch **schwache Wechselwirkung** über die Mischung von
 - ⇒ Zustände mit unterschiedlicher Masse
 - ⇒ Zustände mit unterschiedlicher Lebensdauer

Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

■ Neutrale Kaonen: von der Erzeugung zur Propagation

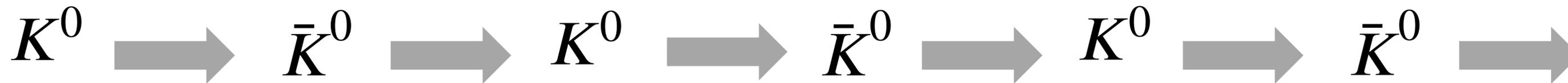


- schwache Wechselwirkung („**Boxdiagramm**“) führt zum Phänomen der **Kaon-Oszillationen** $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$

Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

- Neutrale Kaonen: Strangeness-Oszillation bei der Ausbreitung

Propagation



$$|K_1\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle \right)$$

$$|K_2\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle \right)$$

$$CP|K_1\rangle = + |K_1\rangle$$

$$CP|K_2\rangle = - |K_2\rangle$$

CP -Eigenzustände

K_1 K_2

- schwache Wechselwirkung („**Boxdiagramm**“) führt zum Phänomen der **Kaon-Oszillationen** $K^0 \Leftrightarrow \bar{K}^0$

- **System der oszillierenden Kaonen: wir betrachten nun Zerfallsprozesse**

- nach einer bestimmten Wegstrecke werden Kaonen durch Prozesse der **schwachen Wechselwirkung zerfallen**

- System K_1 und K_2 mit definierten **CP-Eigenwerten** kann in ein System aus Pionen zerfallen (2π oder 3π Zerfälle): durch Zerfallskinetik erwartet man 2 unterschiedliche Zerfallszeiten des Kaons

- Kaonzerfall ($M = 497,6 \text{ MeV}$), z.B. in $2\pi^0$ ($M = 2 \times 135 \text{ MeV}$):
großer **Phasenraum*** für die Pion-Impulse: \Rightarrow **kurzes** τ ($\sim 10^{-10} \text{ s}$)

- Kaonzerfall ($M = 497,6 \text{ MeV}$), z.B. in $3\pi^0$ ($M = 3 \times 135 \text{ MeV}$):
kleiner **Phasenraum*** für die Pion-Impulse: \Rightarrow **langes** τ ($\sim 5 \times 10^{-8} \text{ s}$)

Neutrale Kaonen: Zerfallsprozesse in 2 Pionen

- CP - Zustände von **2 Pionen** (π^+ , π^-) oder (π^0 , π^0) : $CP = +1$

Parität P & C -Parität & CP eines Systems aus **2 Pionen**:

$$P|\pi^+\pi^-\rangle = (-1)^\ell |\pi^+\pi^-\rangle \quad C|\pi^+\pi^-\rangle = (-1)^{\ell+s} |\pi^+\pi^-\rangle$$

$$CP|\pi^+\pi^-\rangle = +1|\pi^+\pi^-\rangle \quad CP|\pi^0\pi^0\rangle = +1|\pi^0\pi^0\rangle$$



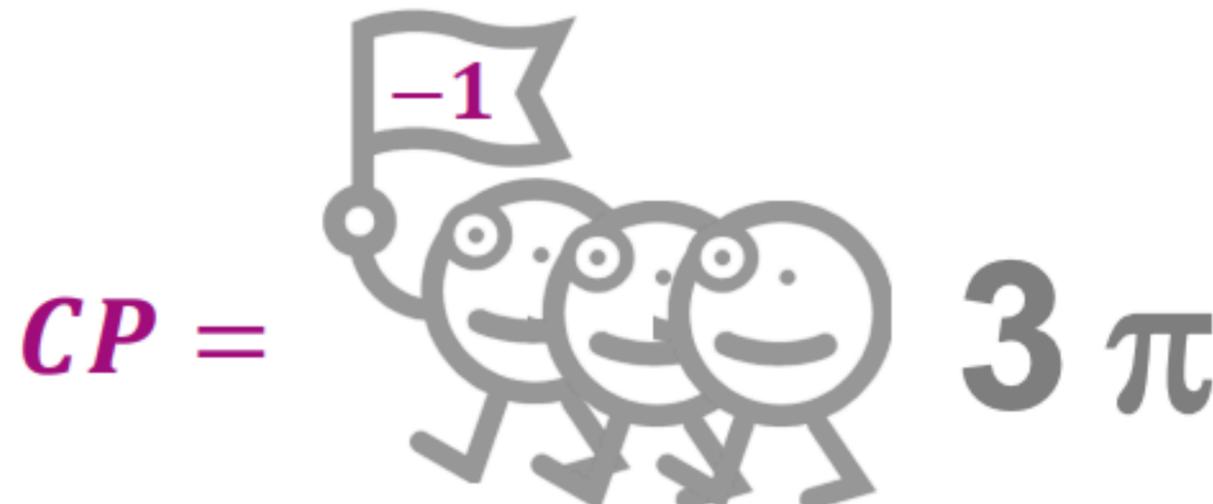
Neutrale Kaonen: Zerfallsprozesse in 2 Pionen

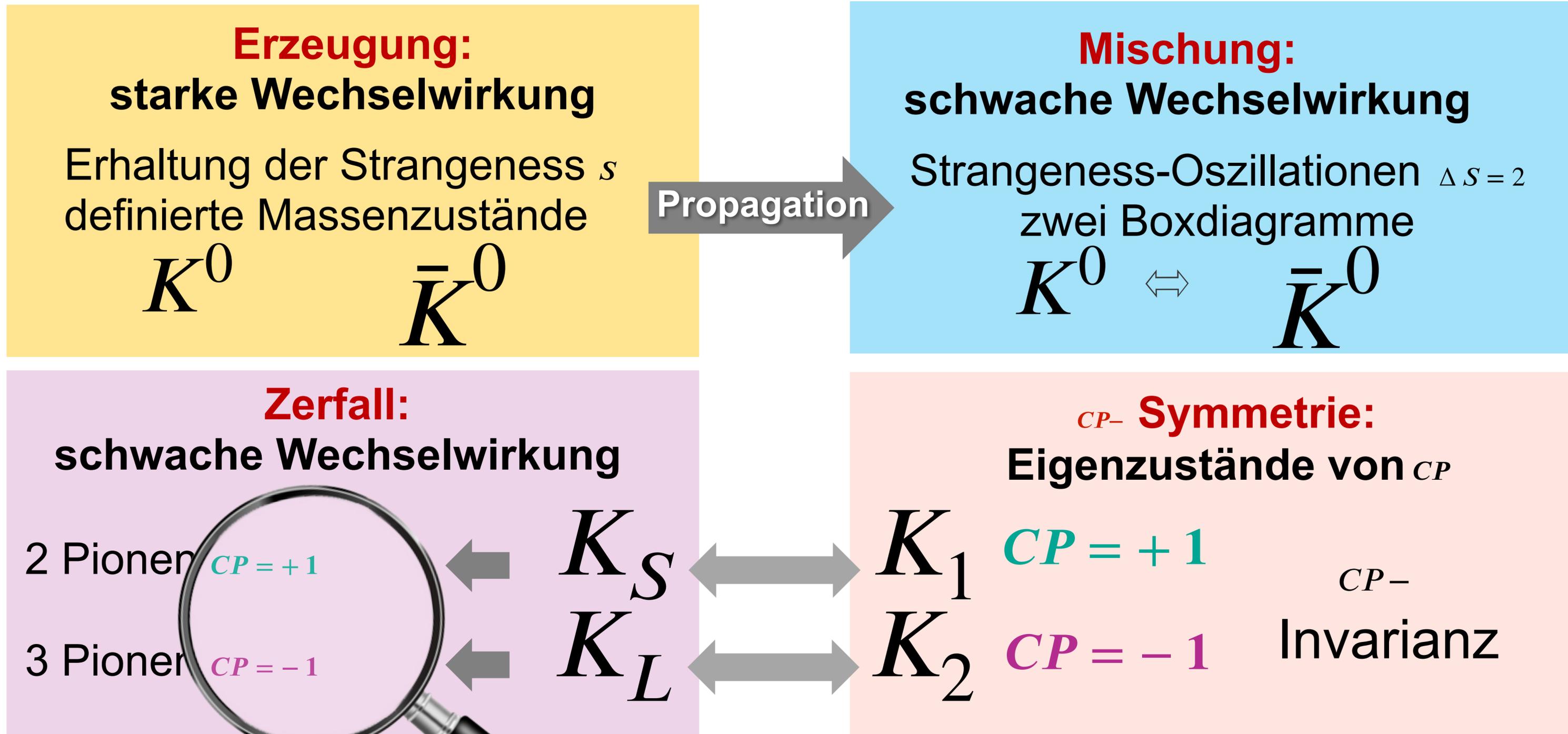
- CP - Zustände von **3 Pionen** (π^+, π^-, π^0) oder (π^0, π^0, π^0) : $CP = -1$

Parität P & C -Parität & CP eines Systems aus **3 Pionen**:

- folgt aus einer detaillierten Betrachtung zur Zerfallskinetik in 3 Pionen

$$CP \left| \pi^0 \pi^+ \pi^- \right\rangle = -1^{\ell+1} \left| \pi^0 \pi^+ \pi^- \right\rangle \quad CP \left| \pi^0 \pi^0 \pi^0 \right\rangle = -1 \left| \pi^0 \pi^0 \pi^0 \right\rangle$$



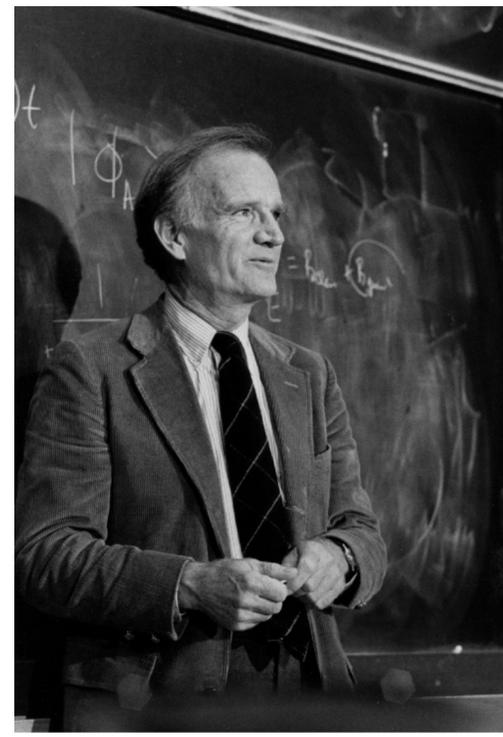


Kaon-Zerfälle: der Nachweis der CP -Verletzung

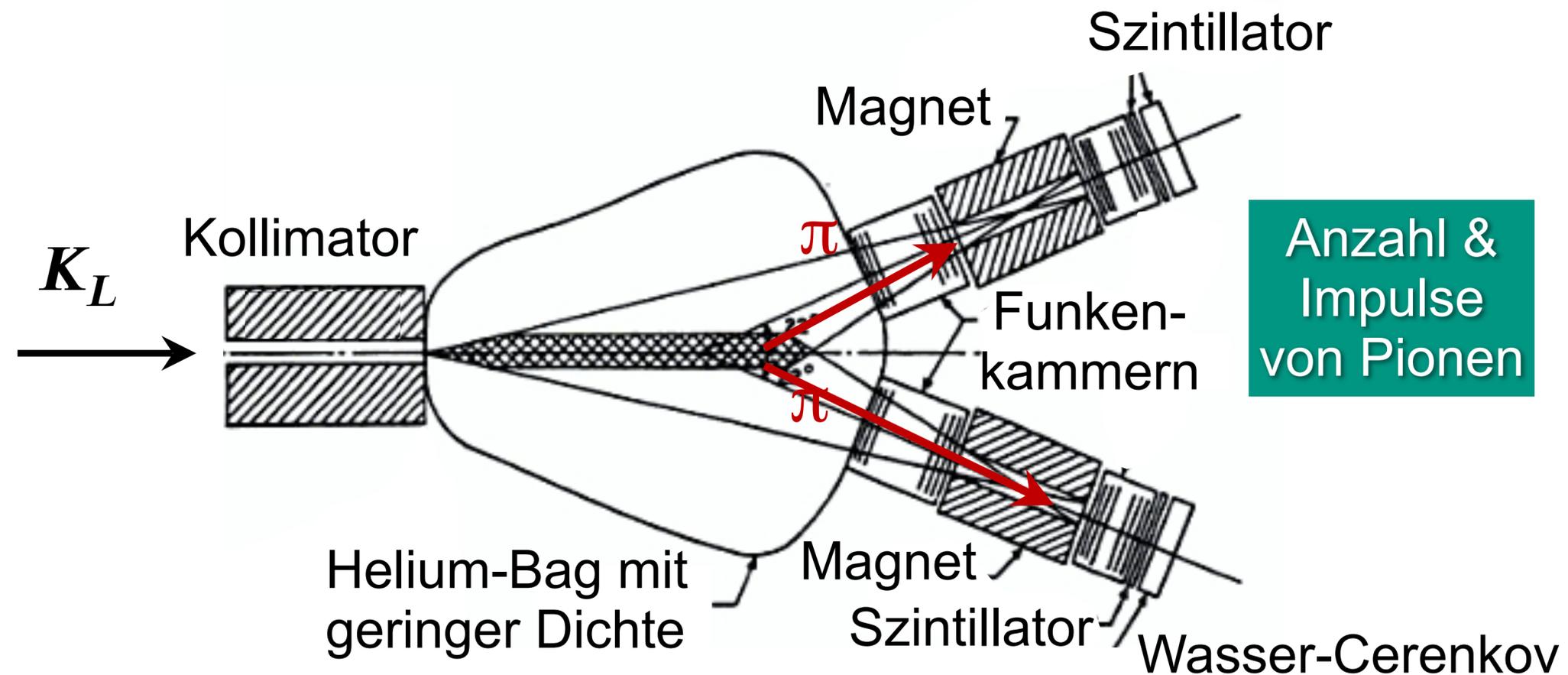
- Cronin & Fitch weisen CP -Verletzung im System der neutralen Kaonen nach am AGS*-Beschleuniger des Brookhaven National Laboratory (1964)
- Beobachtung: dominanter Zerfallsmodus $K_L \rightarrow 3\pi$
aber: auch kleine Rate an $K_L \rightarrow 2\pi$ mit $R = (2,3 \pm 0,4) \times 10^{-3}$



James Cronin



Val Fitch

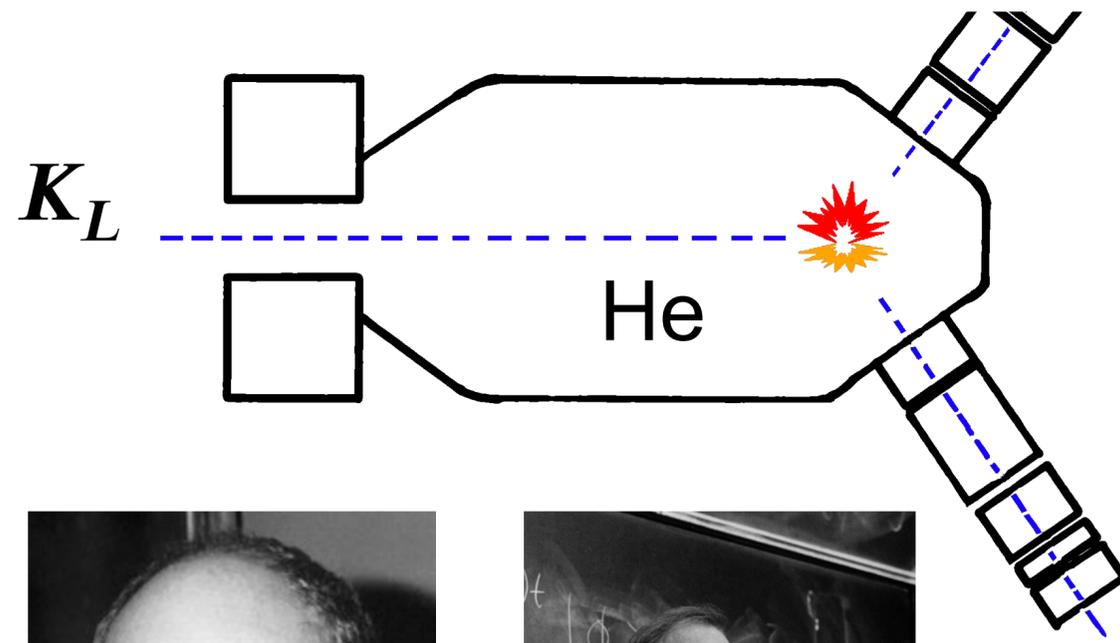


*Alternating Gradient Synchrotron

CP - Verletzung bei neutralen Kaonen, nachgefragt



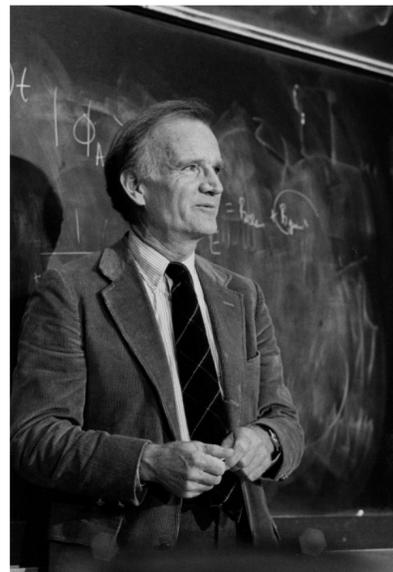
- Wieso haben wir den K_L Strahl in eine He-Kammer mit geringer Dichte geleitet?



- A) weil Kaonen K_L in Materie regenerieren, d.h. über die starke Wechselwirkungen wieder K^0 und \bar{K}^0 erzeugt werden
- B) weil Kaonen K_L in Materie über Stöße abgelenkt werden und so die komplexe Rekonstruktion erschweren
- C) weil die Pionen aus den Zerfällen der Kaonen K_L in Materie eingefangen werden



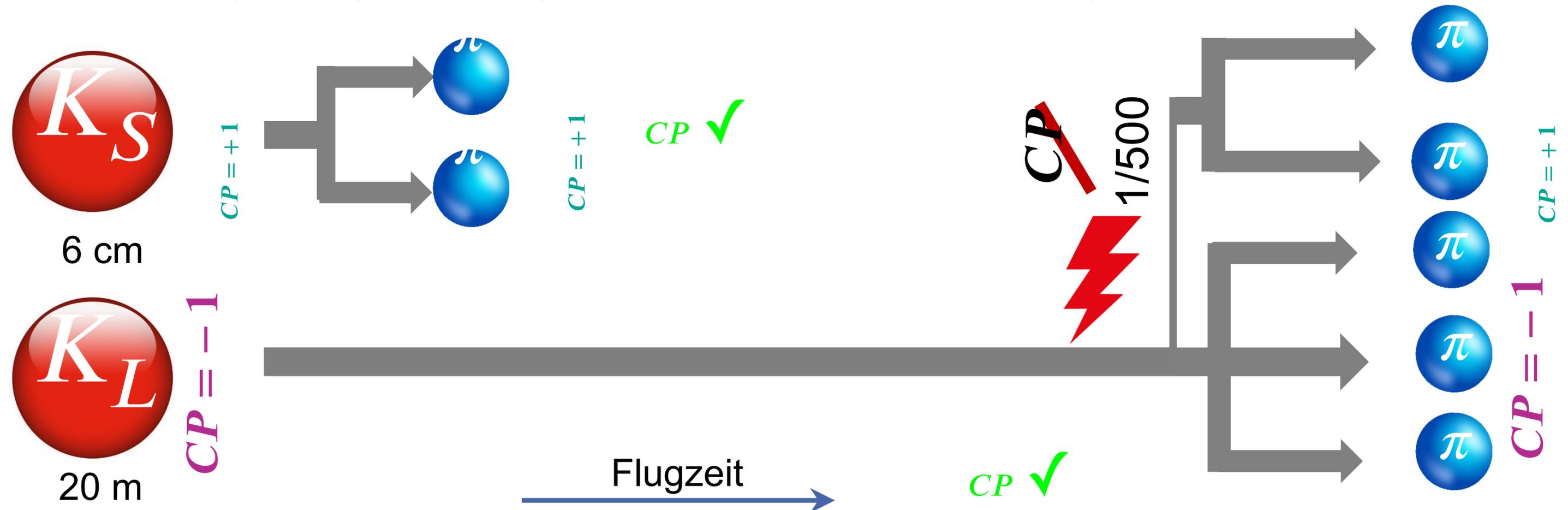
James Cronin



Val Fitch

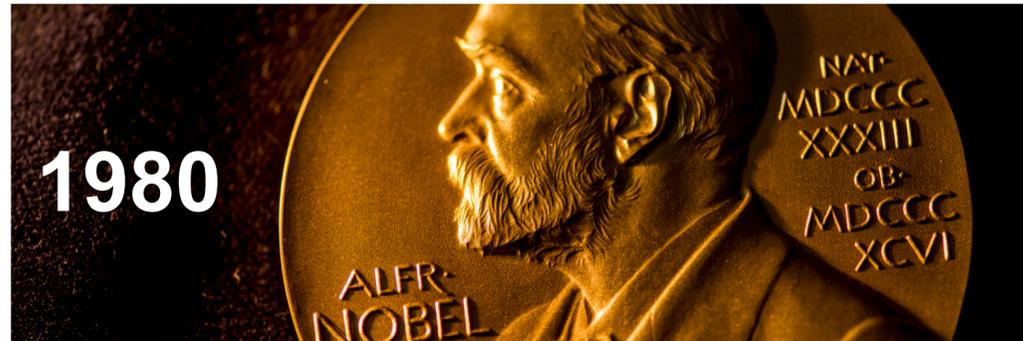
CP- Verletzung bei den Zerfällen von K_L

- Trennung von kurzlebigen und langlebigen Kaonen für die Flugzeit bzw. die mittlere Flugstrecke – nach 20 m gibt es nur noch K-long Zustände
- Beobachtung: ein kleiner Anteil ($\sim 1/500$) der K-long mit $CP = -1$ zerfällt nach langem Flugweg ($d \sim 20$ m) in 2π mit $CP = +1$ d.h. **CP-Symmetrie ist verletzt**



CP – Verletzung im System der neutralen Kaonen

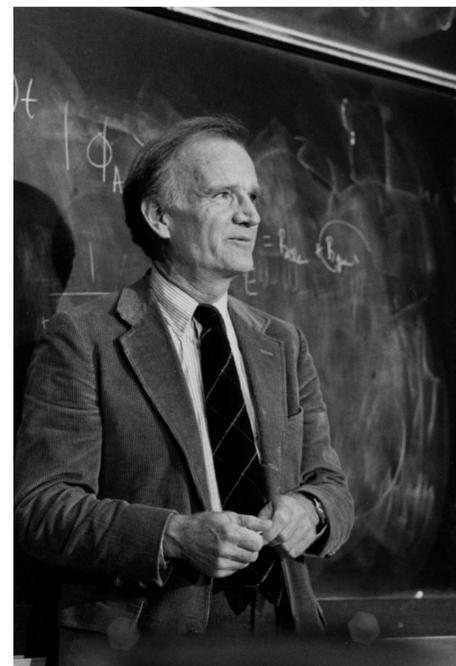
- **CP-Verletzung bei den Kaonen ist ein sehr kleiner Effekt: kann nicht die beobachtete Baryonen-Asymmetrie im Universum erklären**



*“ for the discovery of **violations of fundamental symmetry principles** in the decay of **neutral K-mesons.**”*



James Cronin



Val Fitch



Q: nobelprize, American IoP, symmetry magazine

Katzen



zwei Arten von CP -Verletzung: indirekt...

- Indirekte CP -Verletzung über die Mischung von K_1 und K_2

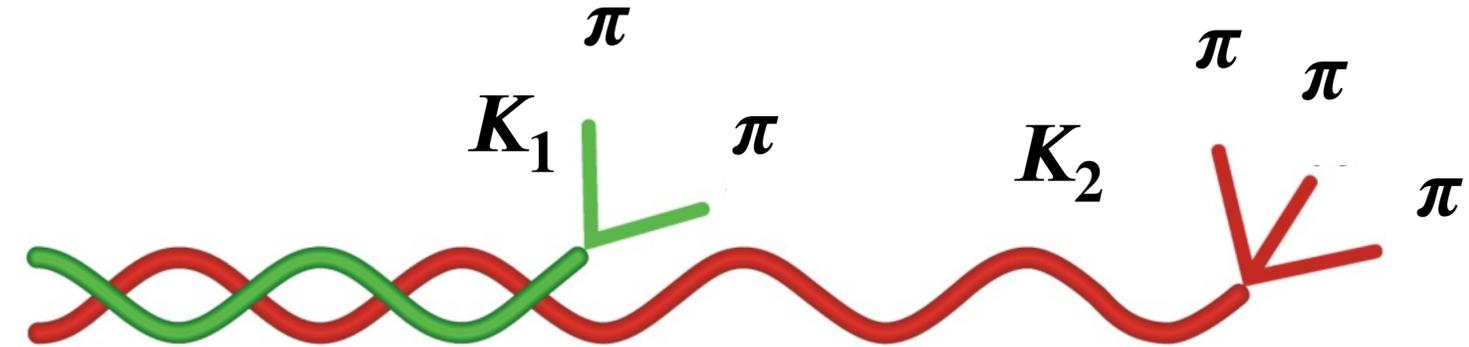
CP -Verletzung bei $K_L \rightarrow 2\pi$ ist „indirekt“

da sie entsteht durch kleine Beimischung von K_1 zu K_2 :

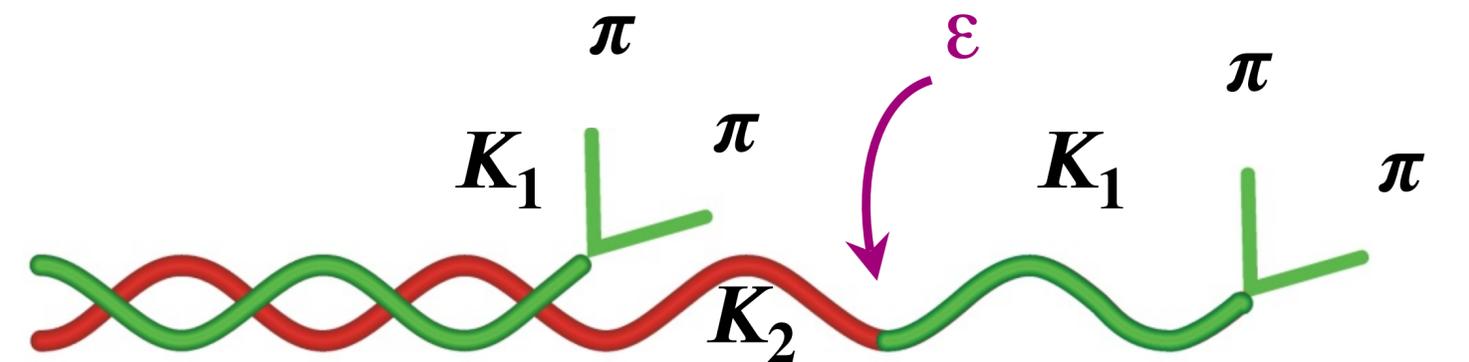
$$\epsilon = 2,23 \times 10^{-3}$$

$$|K_L\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (\epsilon \cdot |K_1\rangle + |K_2\rangle)$$

$$|K_S\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}} (|K_1\rangle + \epsilon \cdot |K_2\rangle)$$



Kaon-Mischung



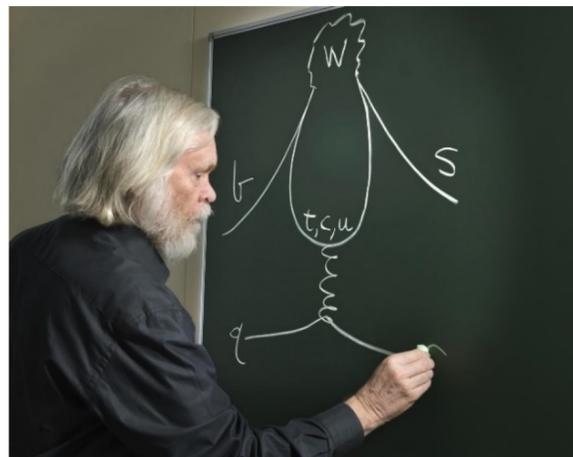
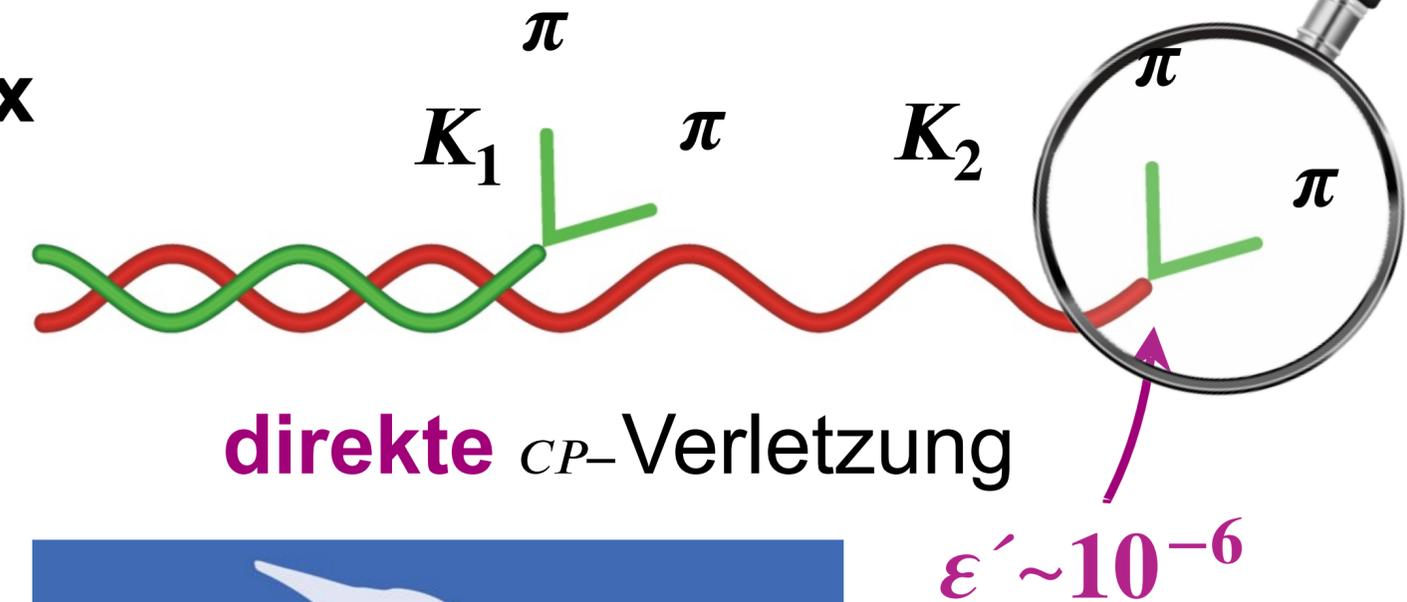
indirekte CP -Verletzung

dominanter Beitrag zur CP -Verletzung

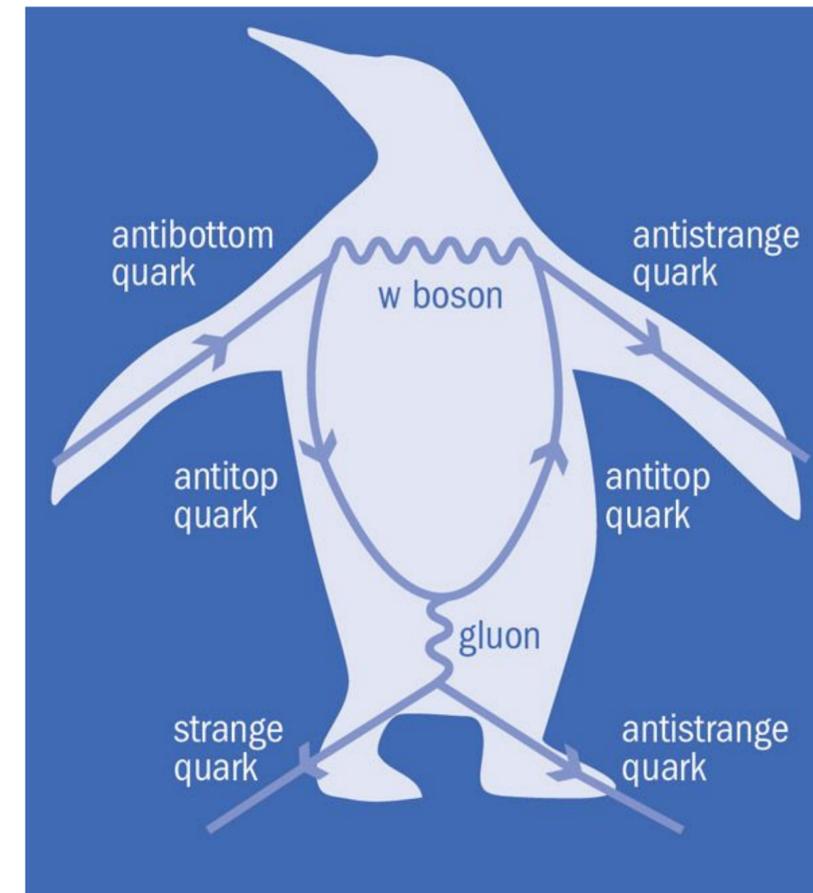
zwei Arten von CP - Verletzung: ... und direkt

- direkte CP - Verletzung am Zerfalls-Vertex

- die CP - Verletzung erfolgt in diesem Falle **direkt am Zerfallsvertex** $K_2 \rightarrow 2 \pi$
- die direkte CP -Verletzung ist nochmals wesentlich schwächer ($\sim 10^{-6}$) als die indirekte CP -Verletzung ($\sim 10^{-3}$) durch die Oszillationen der neutralen Kaonen



„*elektroschwacher Pinguin*“
 von John Ellis (CERN)*



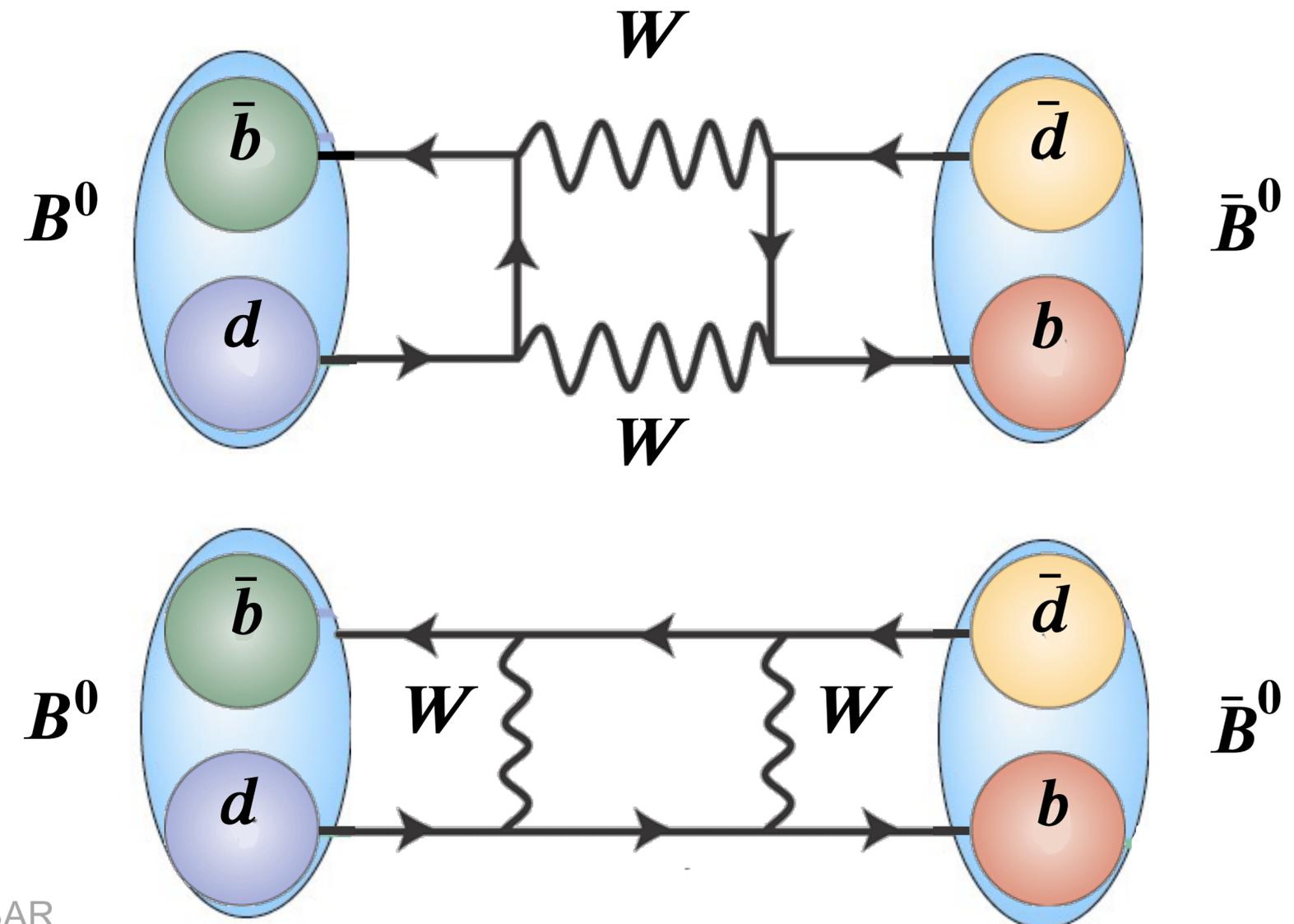
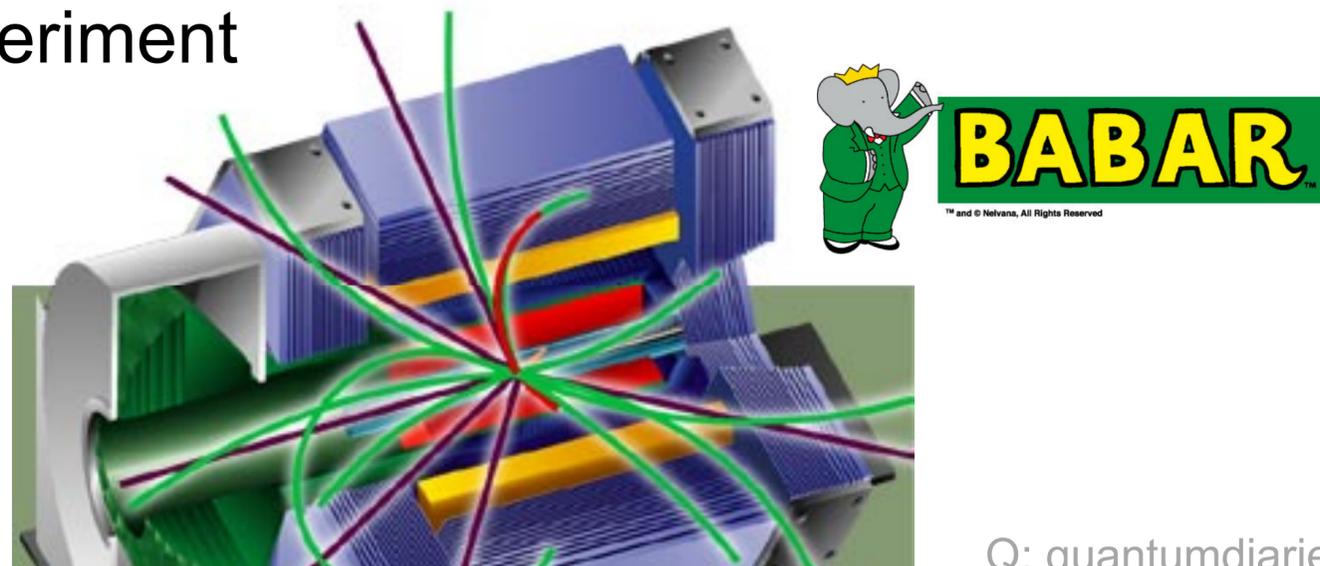
Q: CERNcourier, LANL

Oszillation von B^0 – Mesonen

■ Beobachtung im System der neutralen B^0 – Mesonen

- die gleichen Effekte wie im K^0 -System beobachtet man auch im B^0 -System an sog. **B-Fabriken** am SLAC
- die **CP -verletzenden Effekte im B^0 -System sind wesentlich größer**

SLAC: BaBar-Experiment

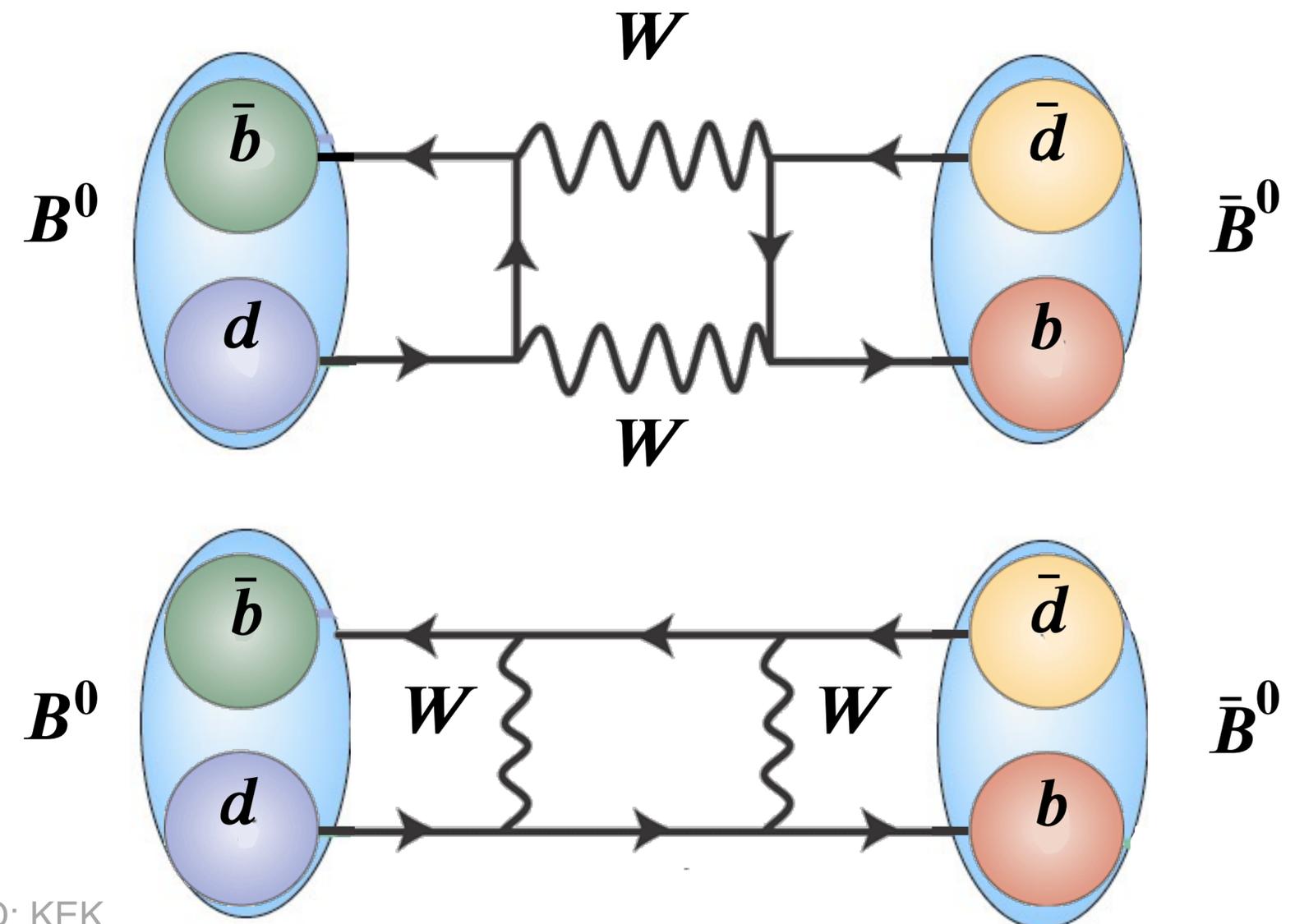
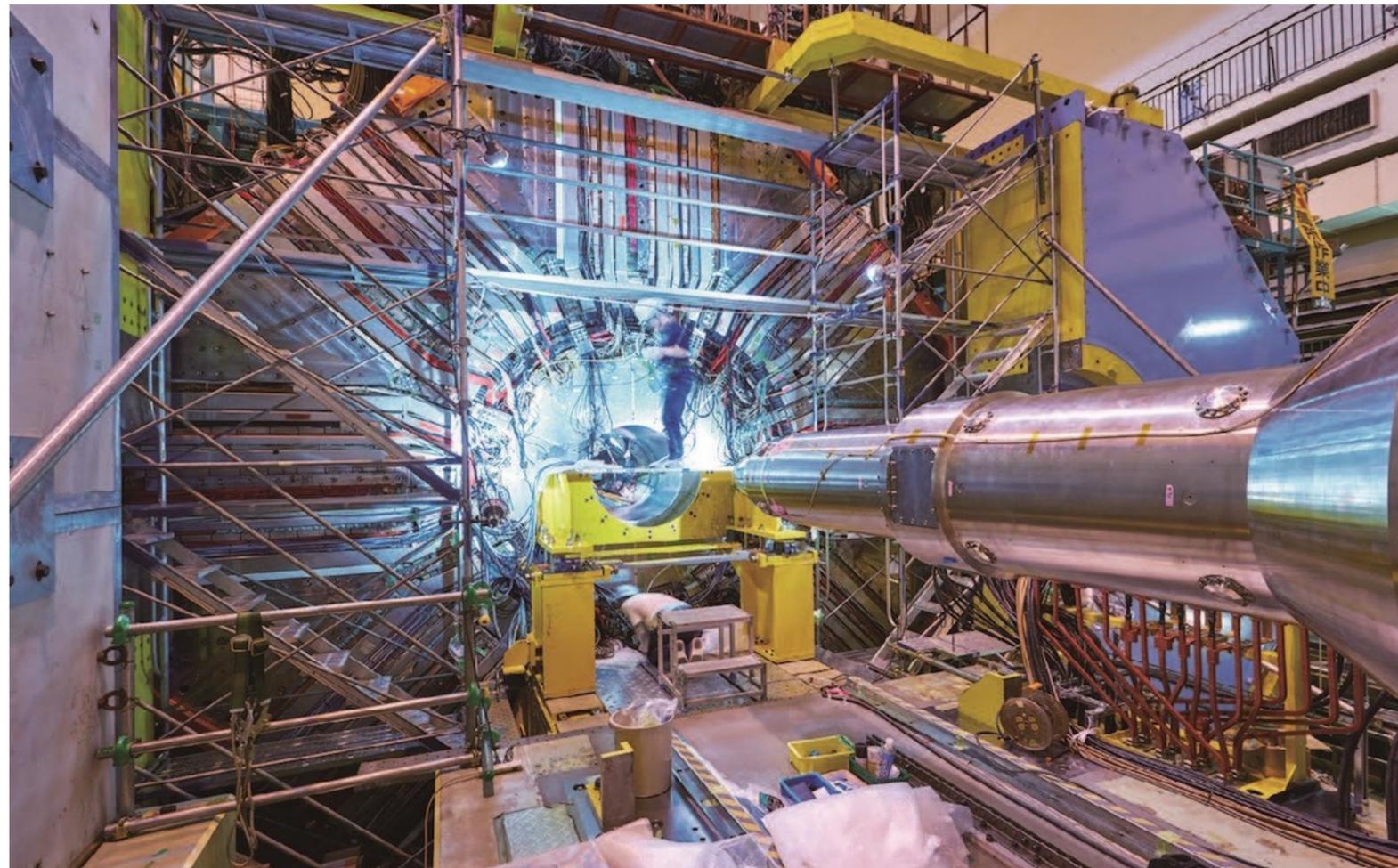


Q: quantumdiaries, BABAR

Oszillation von B^0 – Mesonen*

■ Beobachtung im System der neutralen B^0 – Mesonen

- die gleichen Effekte wie im K^0 -System beobachtet man auch im B^0 -System an sog. **B-Fabriken** am Super-KEKB



- **Invarianz von *CPT*: physikalische Gesetze bleiben unverändert bei einer kombinierten *CPT*– Transformation**

- aufgestellt 1954/55 von Wolfgang Pauli, Gerhart Lüders (& John Bell)

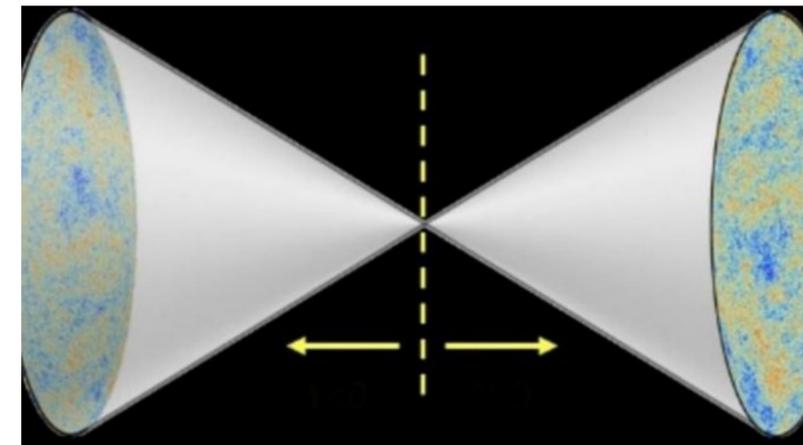
- *CPT*–Theorem Grundlage der **Quantenfeldtheorien**

- Voraussetzungen für *CPT*– **Invarianz**:

- Gültigkeit der Lorentz-Invarianz

- Kausalität & Lokalität

- Existenz eines quantenmechanischen Vakuums



CPT– Invarianz

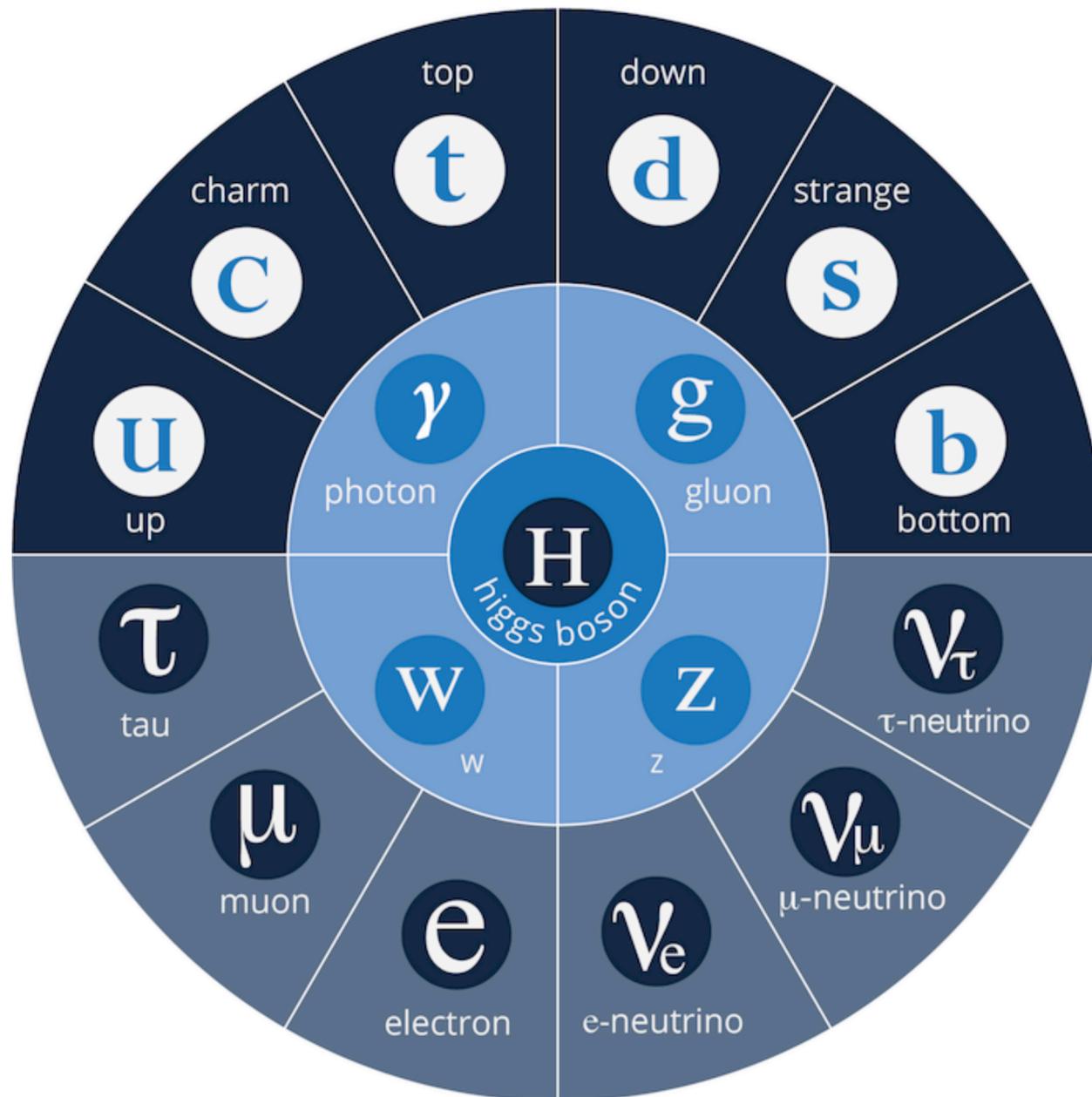


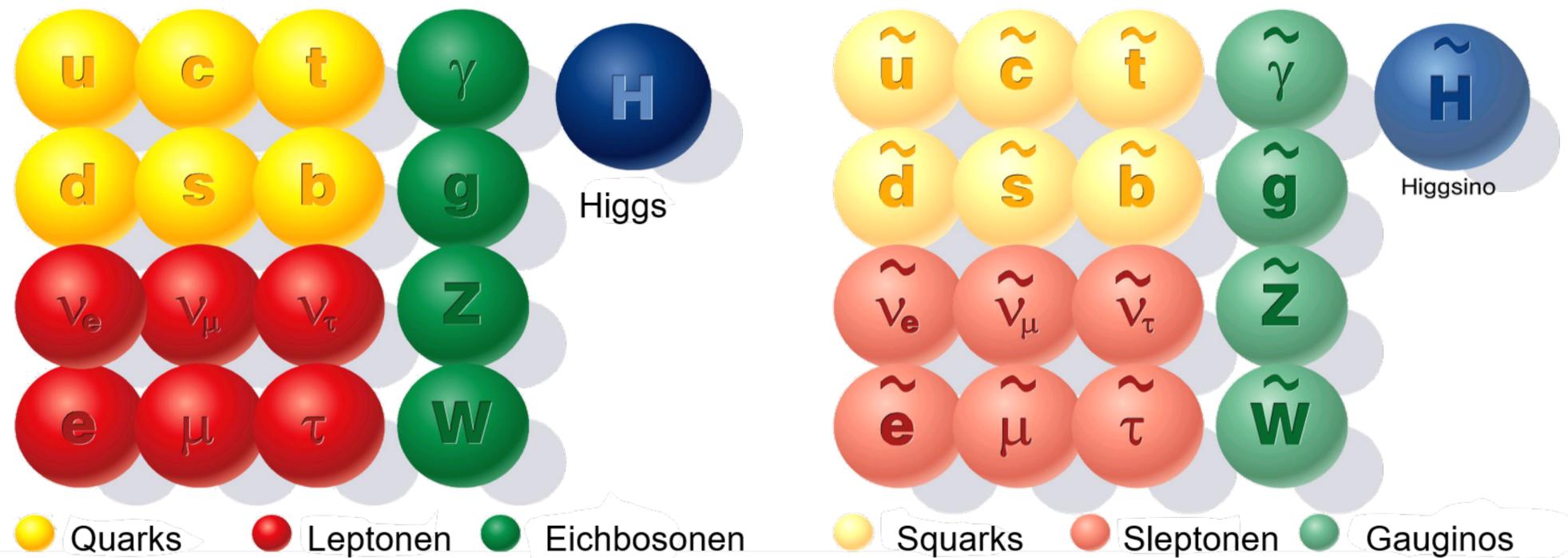
Wolfgang Pauli

Q: wikimedia commons, telepolis

■ 4. Symmetrien und Erhaltungssätze

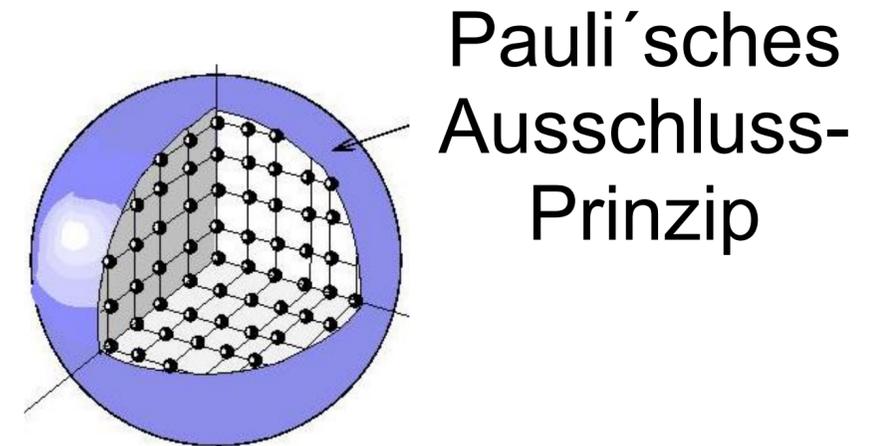
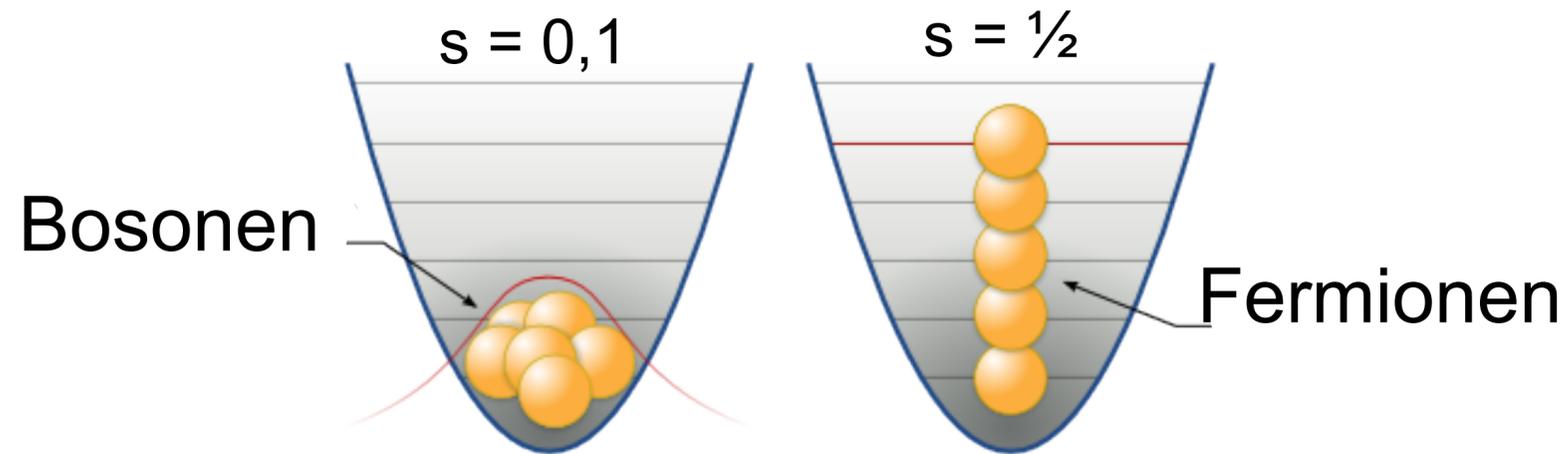
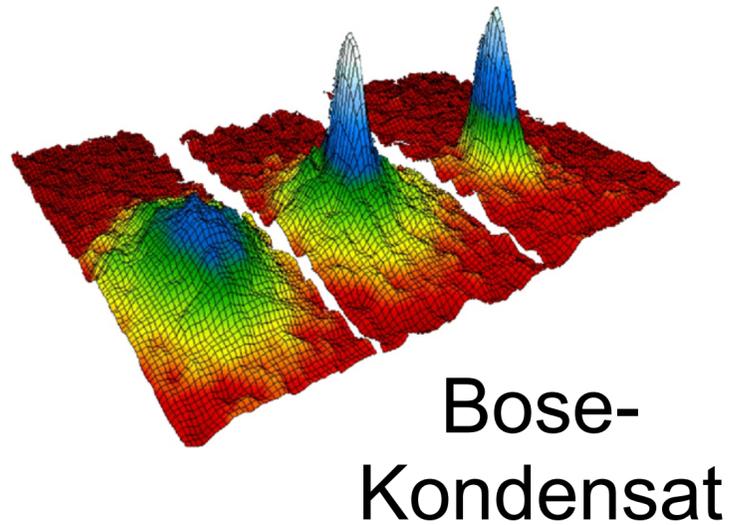
- 4.1 Erhaltungszahlen
- 4.2 Diskrete Symmetrien
- 4.3 Schlüsselexperimente
- 4.4 Supersymmetrie





KAPITEL 4.4: SUPERSYMMETRIE

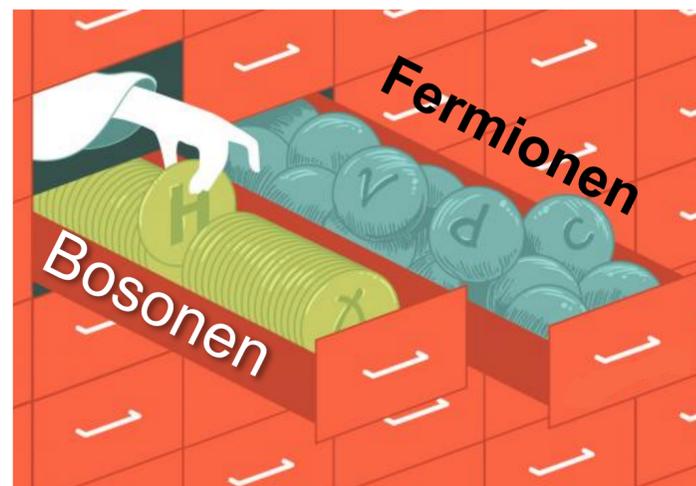
- Theorie jenseits des Standardmodells (SM): **Umwandlung / Symmetrie von Bosonen \leftrightarrow Fermionen**



Spin-Statistik Theorem
 symmetrisch antisymmetrisch
 bei Austausch von 2 Teilchen

$$Q |Boson\rangle = |Fermion\rangle$$

Q : SUSY-Operator



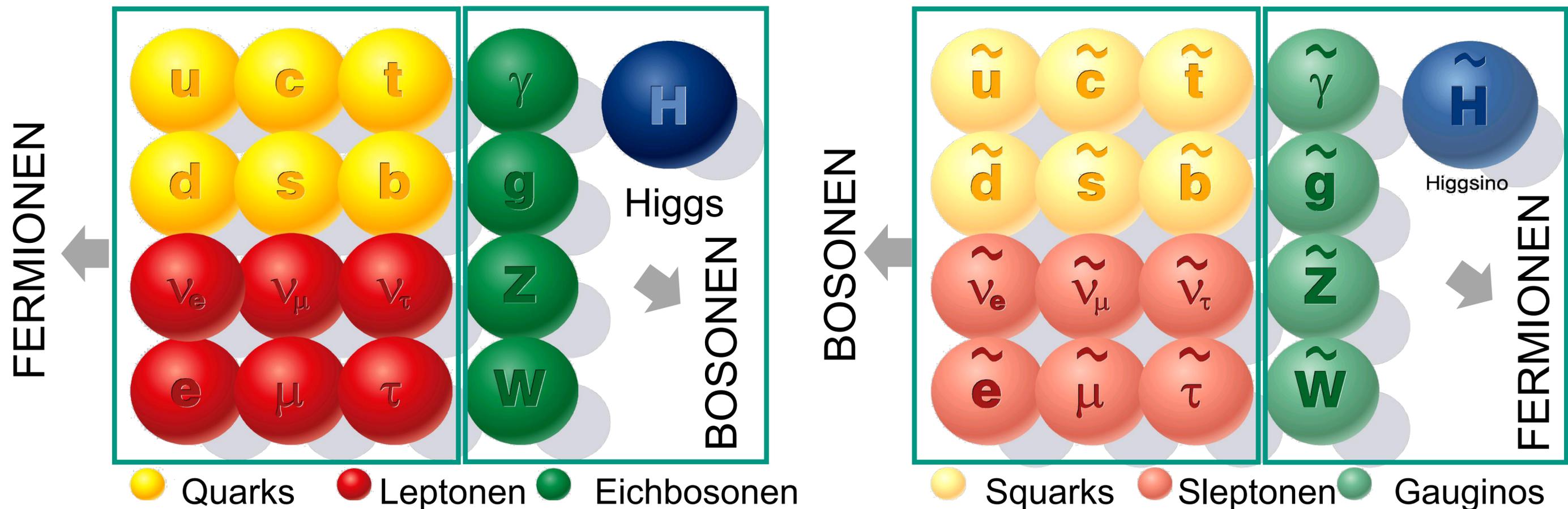
$$Q |Fermion\rangle = |Boson\rangle$$

Q : SUSY-Operator

Q: quantum bits

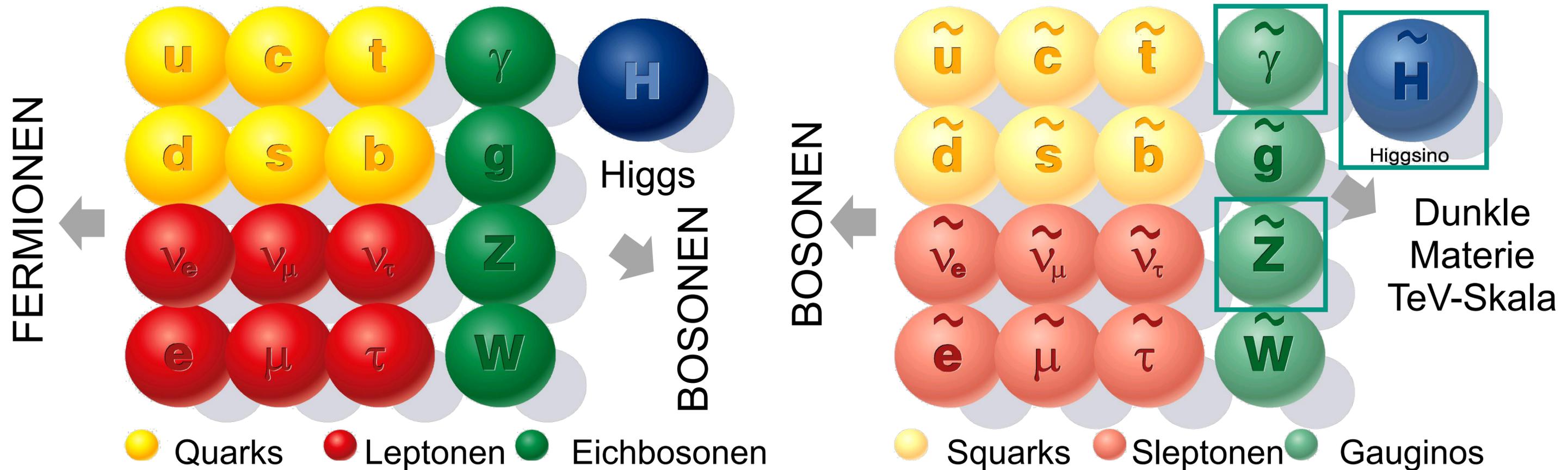
Supersymmetrie: Teilchenspektrum

- **SUSY: Aufstellung der ersten supersymmetrischen Quantenfeldtheorie durch J. Wess (KIT) & B. Zumino (1973)**
 - Teilchen im SM erhalten (schwere) supersymmetrische „**Superpartner**“
 - Supersymmetrie wird (auf einer unbekanntem Energieskala) gebrochen



Supersymmetrie: riesiger Parameterraum

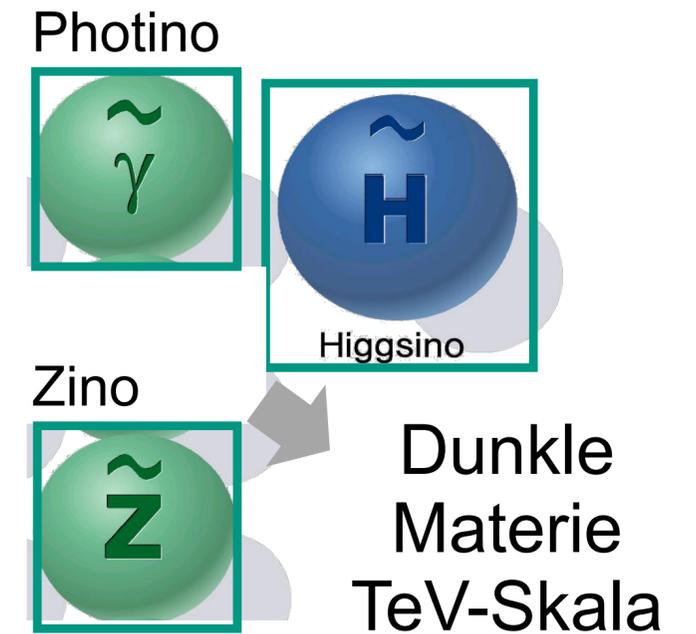
- **SUSY: alle Wechselwirkungen „treffen“ sich bei einer Energieskala* (Grand Unified Theories, GUTs)**
 - aber: minimales SUSY-Modell mit **105** neuen (unbekannten) physikalischen Parametern!



Q: welt der physik

Supersymmetrie & Dunkle Materie

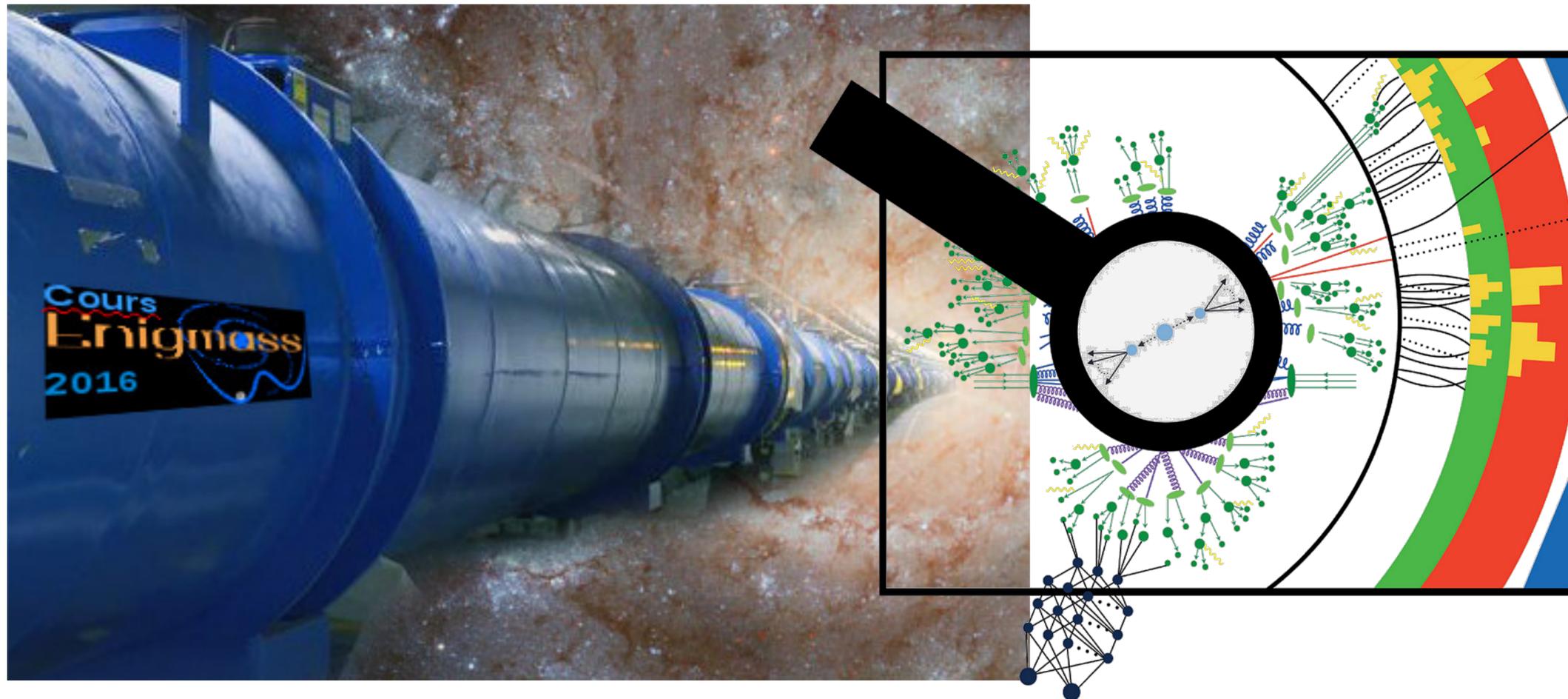
- hypothetische Theorie jenseits des Standardmodells (SM):
eine mögliche Erklärung für die kalte **Dunkle Materie** im Universum*
 - SUSY liefert eine „natürliche“ Erklärung für die Produktion der sog. „kalten“ **Dunklen Materie**



Gauginos

Supersymmetrie: experimentelle Tests

- **SUSY: Teilchen der kalten Dunkle Materie im Universum werden auf der TeV-Massenskala vermutet**
 - intensive experimentelle Suchen nach supersymmetrischen „Superpartnern“*

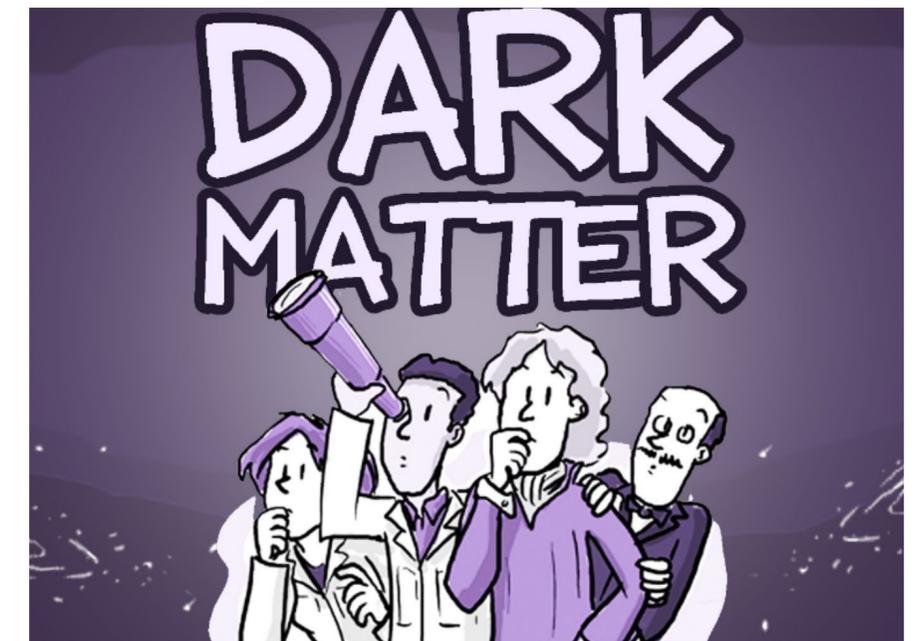
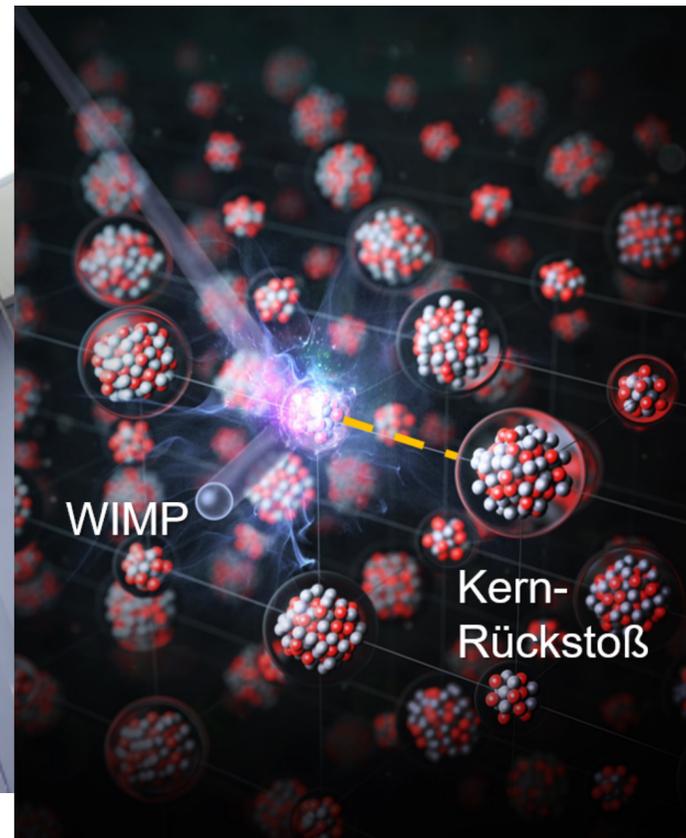
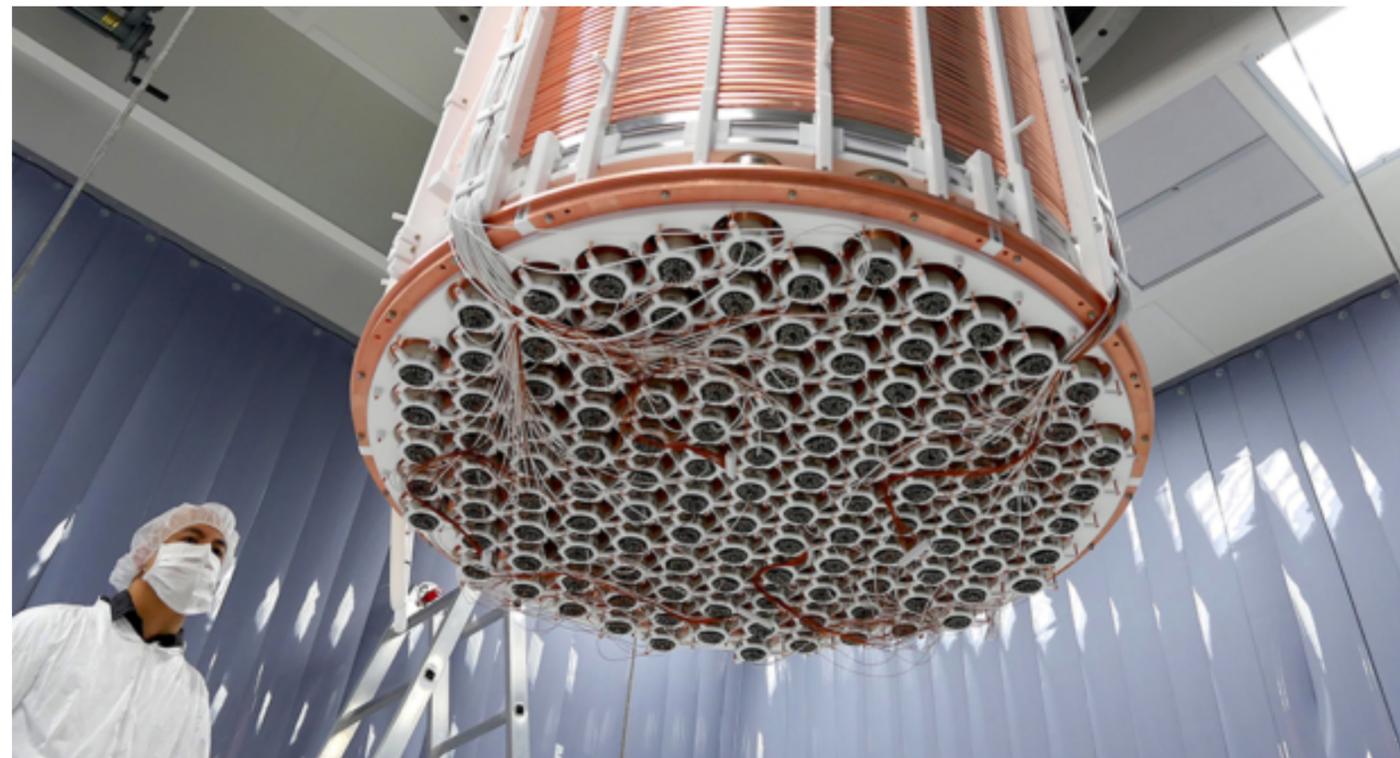


Suche nach SUSY am LHC



Supersymmetrie: experimentelle Tests

- **SUSY: Teilchen der kalten Dunkle Materie im Universum werden auf der TeV-Massenskala vermutet**
 - intensive experimentelle Suchen nach supersymmetrischen „**Superpartnern**“*



Dunkle Materie - Suche (XENON)