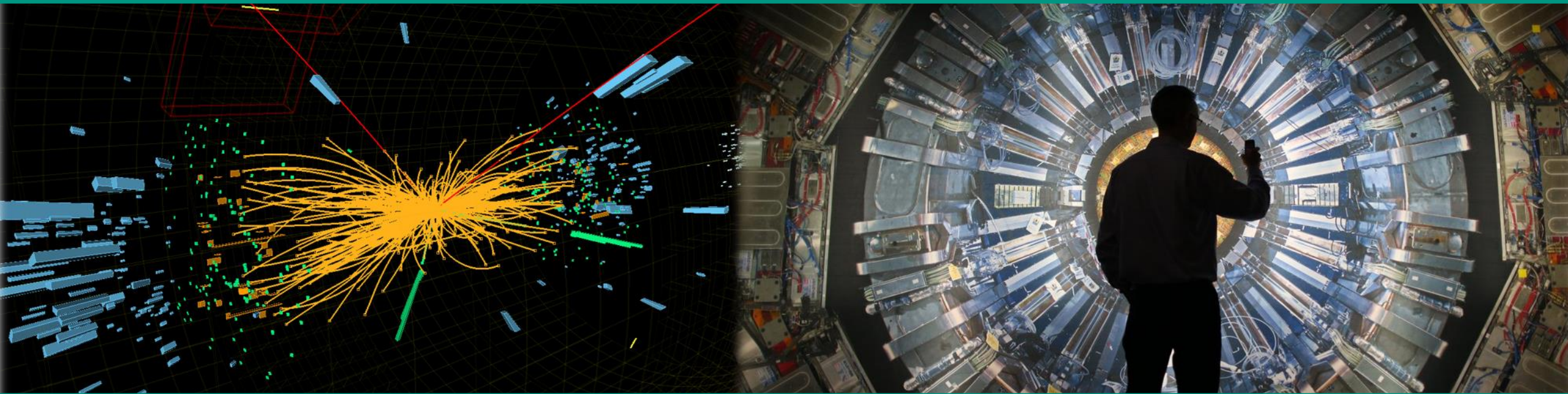


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 12

6.6.2023



Recap: Diskrete Symmetrien – I

■ Parität P , Händigkeit – Helizität bzw. Chiralität

- CPT –Theorem: CPT einzig mögliche **exakte Symmetrie**

- Eigenparität P : Fermionen $P = +1$, Anti-Fermionen $P = -1$

Photon: $P(\gamma) \equiv -1$, Mesonen $P(q\bar{q}) = (-1)^{\ell+1}$

pseudoskalar (π, η, K) mit Spin = 0 ($\uparrow\downarrow$), $\ell = 0 \Rightarrow J^P = 0^-$

vektoriell (ρ, ω, ϕ) mit Spin = 1 ($\uparrow\uparrow$), $\ell = 0 \Rightarrow J^P = 1^-$

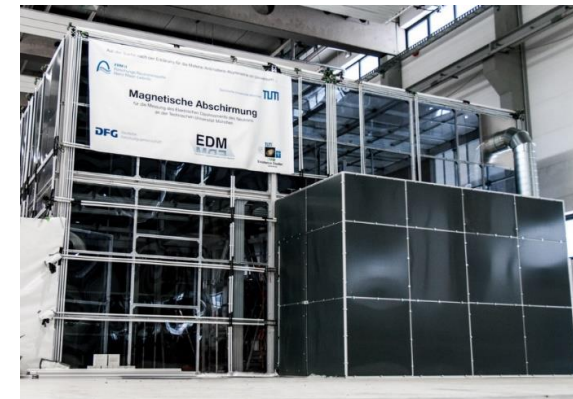
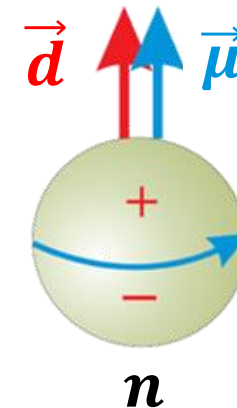
- **Helizität** $h = \vec{S} \cdot \vec{p} / |\vec{S}| \cdot |\vec{p}|$ Projektion **Spin** auf **Impuls**, **nicht Lorentz-invariant**

- **Chiralität** $\Psi_{L,R} = \frac{1}{2} \cdot (1 \pm \gamma^5) \Psi$ Projektionsoperatoren auf **Spinoren**, schwache Ladung von Teilchen, **Lorentz-invariant**

Recap: Diskrete Symmetrien – II

■ Ladungskonjugation C , Zeitumkehr T & $nEDM$

- Ladungskonjugation C : Änderung aller Ladungs-artigen Zahlen Q, B, L
- Eigenzustände: Photon $C |\gamma\rangle = -1 |\gamma\rangle$, neutrales Pion $C |\pi^0\rangle = +1 |\pi^0\rangle$
- Mesonen: $C |q\bar{q}\rangle = -1^{\ell+s}$
- Zeitumkehr-Invarianz T verletzt, wenn $nEDM \neq 0$
- stringente experim. Obergrenzen weit unterhalb des QCD – erlaubten Bereichs
- Ursache: $U(1)$ Symmetrie spontan gebrochen bei hoher Energie $\Rightarrow$ Axion?



Paritätsverletzung: Vorzugsrichtung bei β – Zerfall

■ Team–1: Test der Paritäts-Verletzung mit polarisierten $Co - 60$ Kernen

VOLUME 104, NUMBER 1

OCTOBER 1, 1956

Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*



李政道

杨振宁

θ^+ - τ^+ Puzzle



Weihnachten
1956: los geht's

Madame Wu & ihr Team

$$\vec{J}_{Kern} \cdot \vec{p}_e$$

...wir messen den Erwartungs-
Wert eines **Pseudoskalars**
im Kern – β – Zerfall !...

24.12.1956! weitere Tests 2.1 - 8.1.1957

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

■ Team–2: Test der Paritäts-Verletzung beim Pionzerfall am Zyklotron

VOLUME 104, NUMBER 1

OCTOBER 1, 1956

Question of Parity Conservation in Weak Interactions*

T. D. LEE, Columbia University, New York, New York



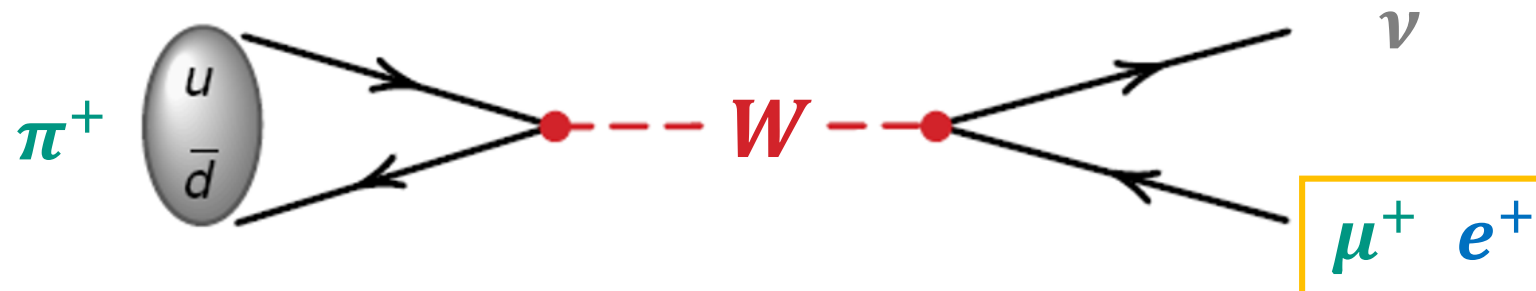
θ^+ - τ^+ Puzzle



Leon Lederman & Team

...wir messen den Pion-Zerfallsraten in **Myonen** bzw. in **Positronen**!...

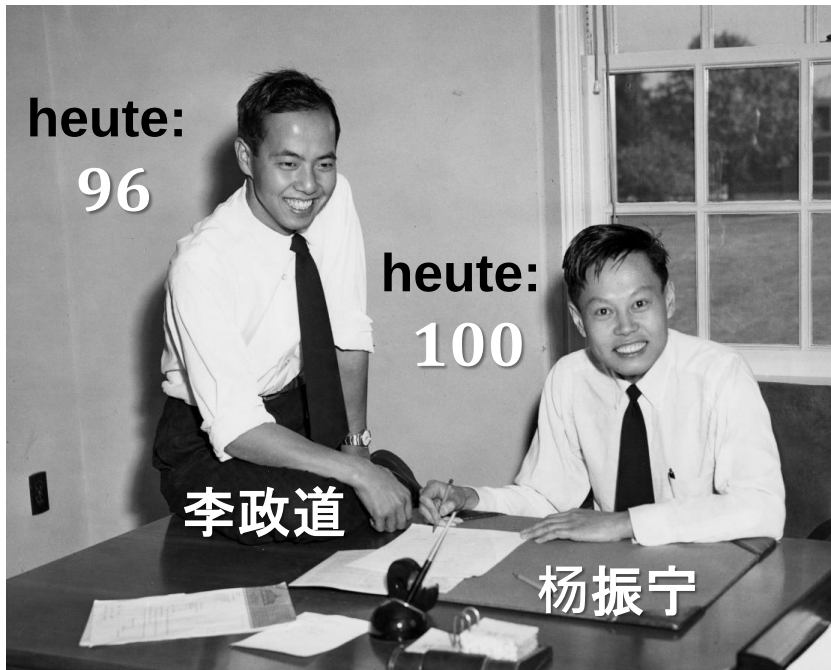
4.1.1957 – 8.1.1957



139,6 MeV

Parität & Ladungskonjugation, nachgefragt

- beim Θ^+ - τ^+ Puzzle beobachtete man Teilchen gleicher Masse, die in **2 Pionen** ($\pi^+ + \pi^0$) und in **3 Pionen** ($\pi^+ + \pi^- + \pi^+$) zerfallen. Weshalb verletzt dies die Parität, und was ist P und C von π^0 (& K^0) ?



Tsung-Dao Lee Chen Ning Yang

$$P(\Theta^+) \rightarrow 2 \pi = (-1) \cdot (-1) \cdot (-1)^0 = +1$$

$$P(\tau^+) \rightarrow 3 \pi = (-1) \cdot (-1) \cdot (-1) \cdot (-1)^0 = -1$$

$$(\pi, K): \text{“pseudo-skalare” Mesonen} \Rightarrow J^P = 0^-$$

$$\text{Spin} = 0 (\uparrow\downarrow), \text{rel. } q\bar{q} \text{ Bahndrehimpuls } \ell = 0$$

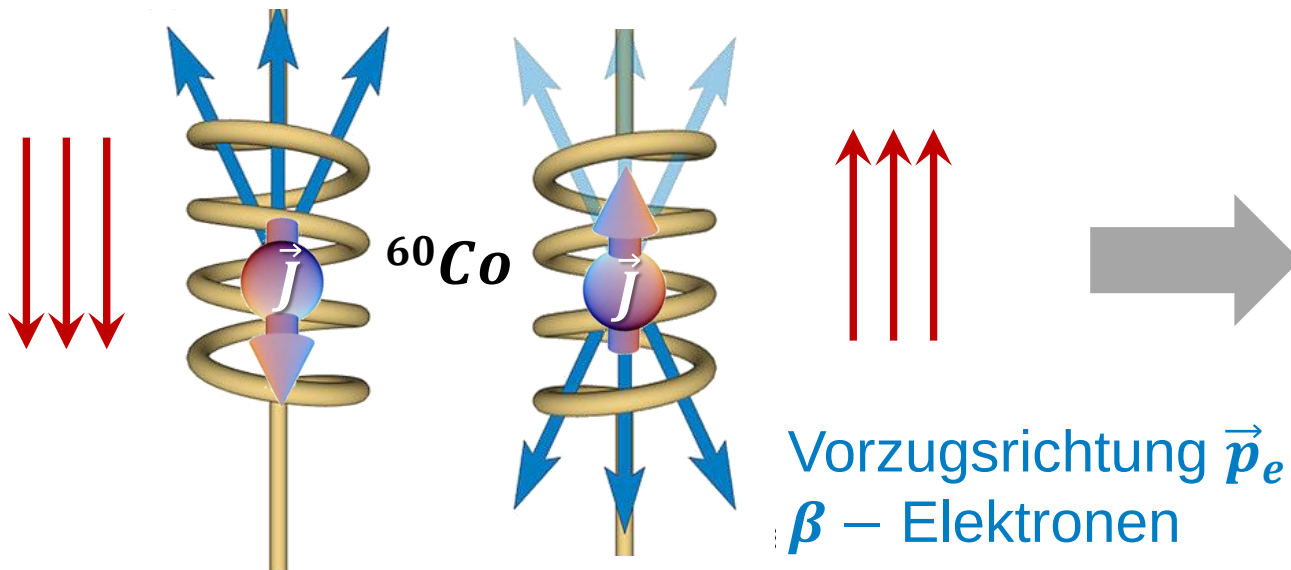
$$\text{Pion } \pi^0 \text{ (Kaon } K^0): C - \text{Parität } C = (-1)^{\ell+s}$$
$$s = 0, \ell = 0 \Rightarrow C = (-1)^0 = +1$$

Paritätsverletzung im β -Zerfall eines Kerns

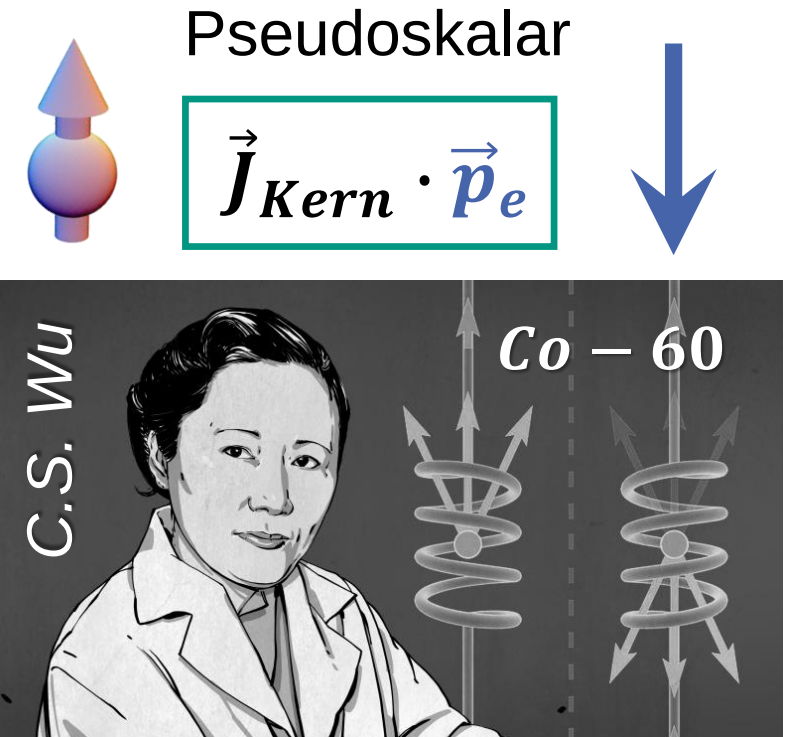
■ Wu's Weihnachts-Experiment: auf der Spur der **Verletzung von P**

- Observable im Wu-Experiment ist ein **Pseudoskalar**: dabei ergibt sich **Vorzeichenänderung unter Paritätstransformation**

Umpolen externes $\vec{B}$ -Feld



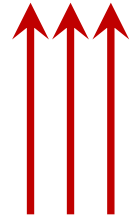
- Kernspin $\vec{J}$ umgeklappt: $\vec{p}_e$ immer antiparallel



Paritätsverletzung im β – Zerfall eines Kerns

■ Wu-Experiment: sehr hohe Anforderungen an Polarisationsgrad

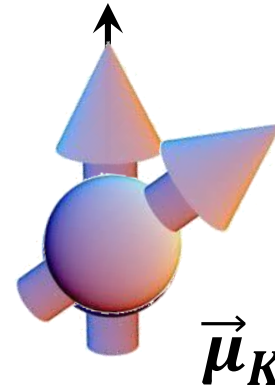
- bei **polarisierten Kernen** benötigt man ein sehr starkes Magnetfeld



- **Kernmagneton** μ_N wird definiert
über Proton-Masse m_p

$$\mu_N = \frac{e}{2m_p} \cdot \hbar$$

$$\mu_N = 3,152\,451\,258\,44(96) \cdot 10^{-8} \text{ eV/T}$$



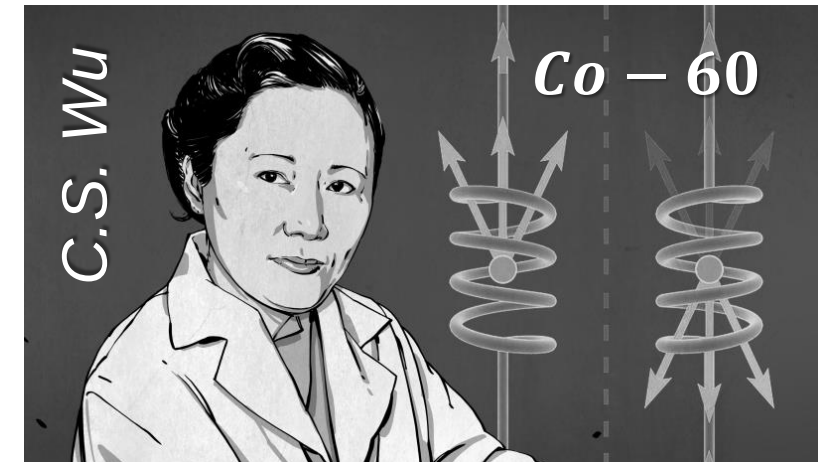
Pseudoskalar

axialer
Vektor

$$\vec{J}_{Kern} \cdot \vec{p}_e$$

polarer
Vektor

- Kernmoment μ_K : $\vec{\mu}_K \sim \mu_N \cdot \vec{J}_K$



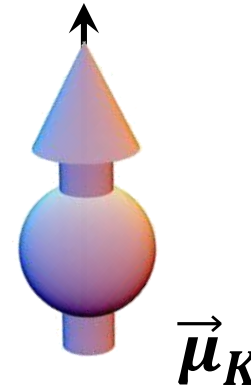
Wu: starke B –Felder & mK –Temperaturen

■ Ausrichtung des Spins: starke B – Felder & Kryotechnologie für mK

- für heutige Technologie (supraleitende Magnete, Kryostate) deutlich einfacher



Supraleiter
starke B –Felder



Pseudoskalar

axialer
Vektor

$\vec{J}_{Kern} \cdot \vec{p}_e$

polarer
Vektor



Mischungskryostat
 T im mK – Bereich!

Wu: starke B –Felder & mK –Temperaturen

■ Ausrichtung des Spins: Experten des *National Bureau of Standards* (**NBS**)*

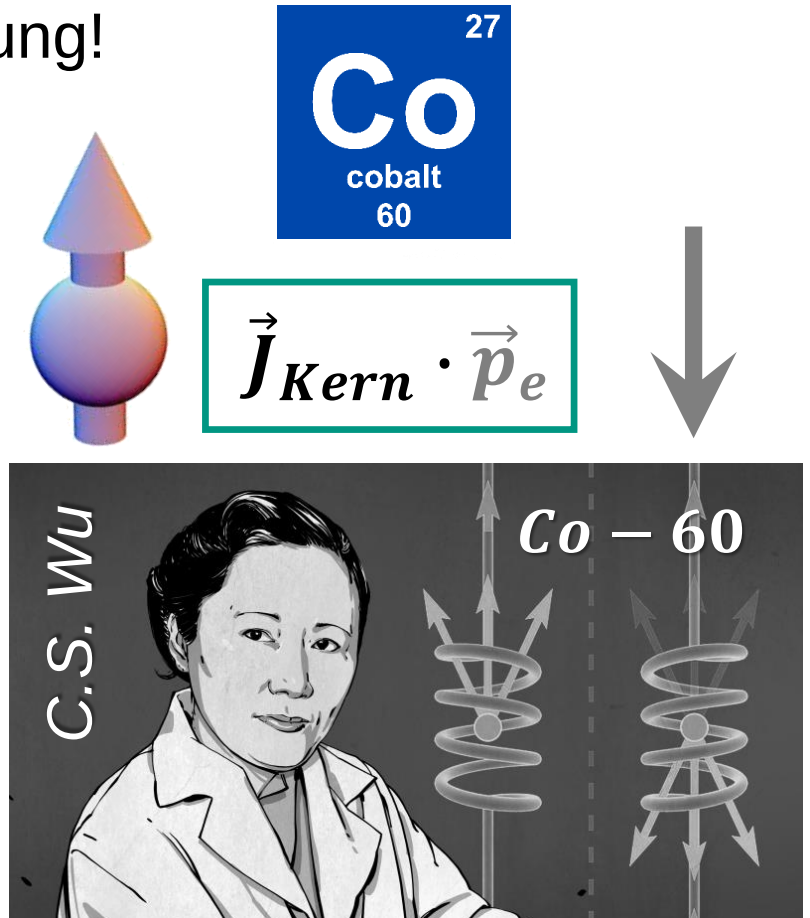
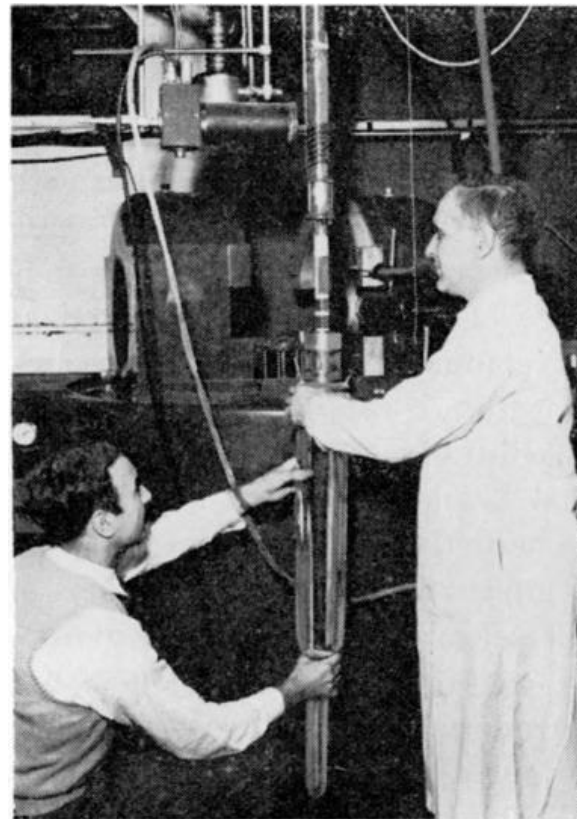
- für damalige Technologie eine echte Herausforderung!

- Hilfe durch **Tiefemperatur-Experten** am *NBS* in Washington

- Madame Wu: Präparation der dünnen ^{60}Co –Samples (Aktivität: einige μCi)

$$t_{1/2} = 5,27 \text{ Jahre}$$

$$E_{\max}(e^-) = 0,3 \text{ MeV}$$

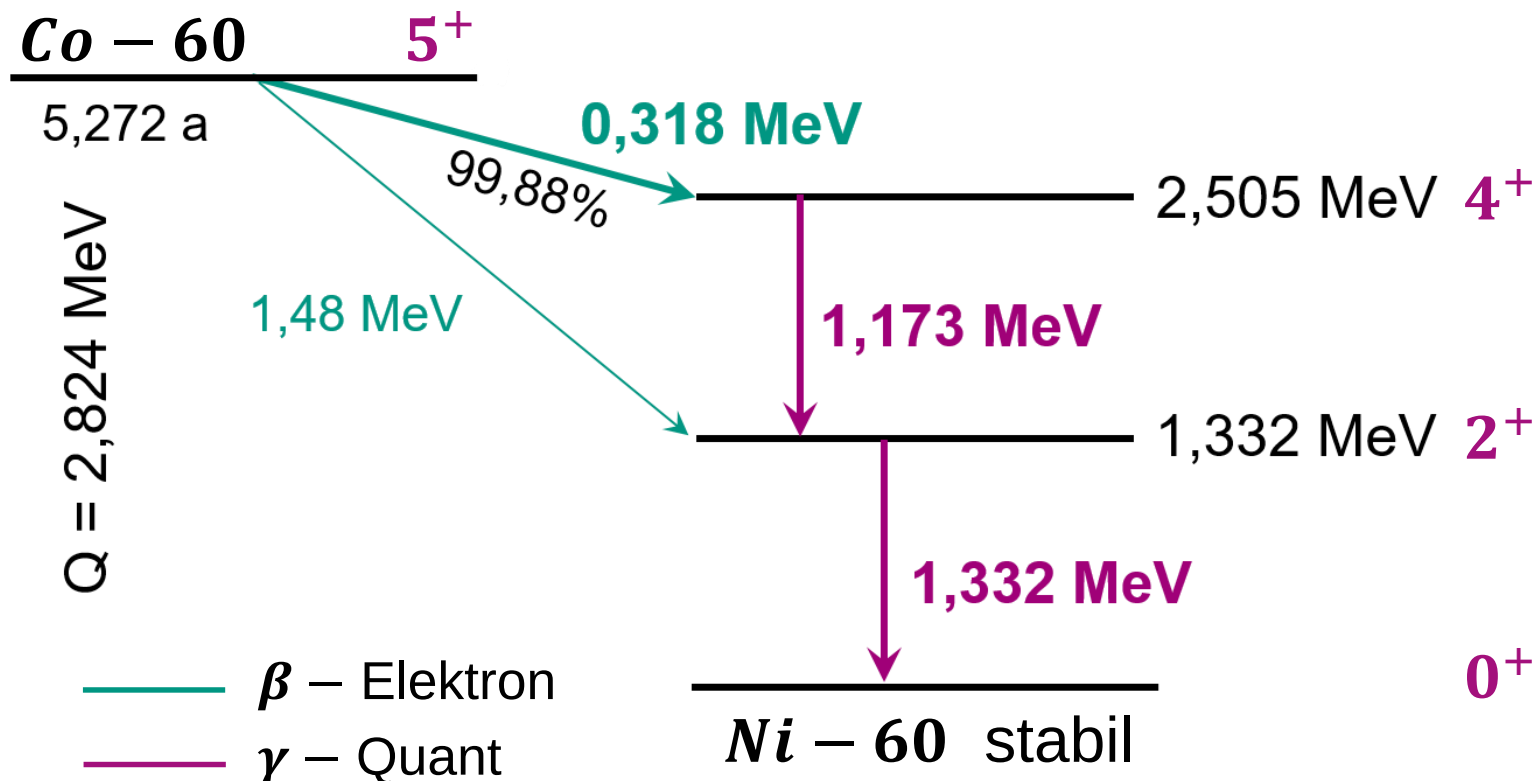


Wu: starke B –Felder & mK –Temperaturen

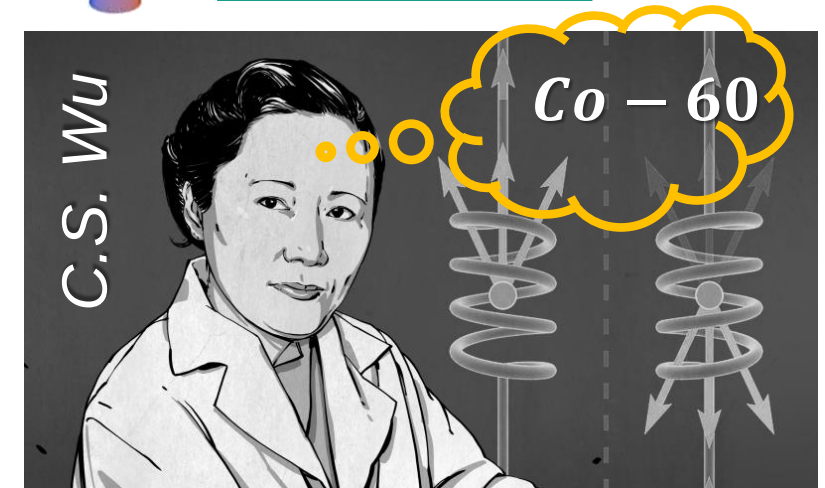
■ Der β –Zerfall von ^{60}Co – ideal für Untersuchungen zur Paritätsverletzung



β –Zerfall mit 2 γ 's ($E2$)*: zeigen  an



$$\vec{J}_{\text{Kern}} \cdot \vec{p}_e$$



Wu-Experiment: Aufbau im Überblick

■ Überblick: Quelle/Kryo/Magnete

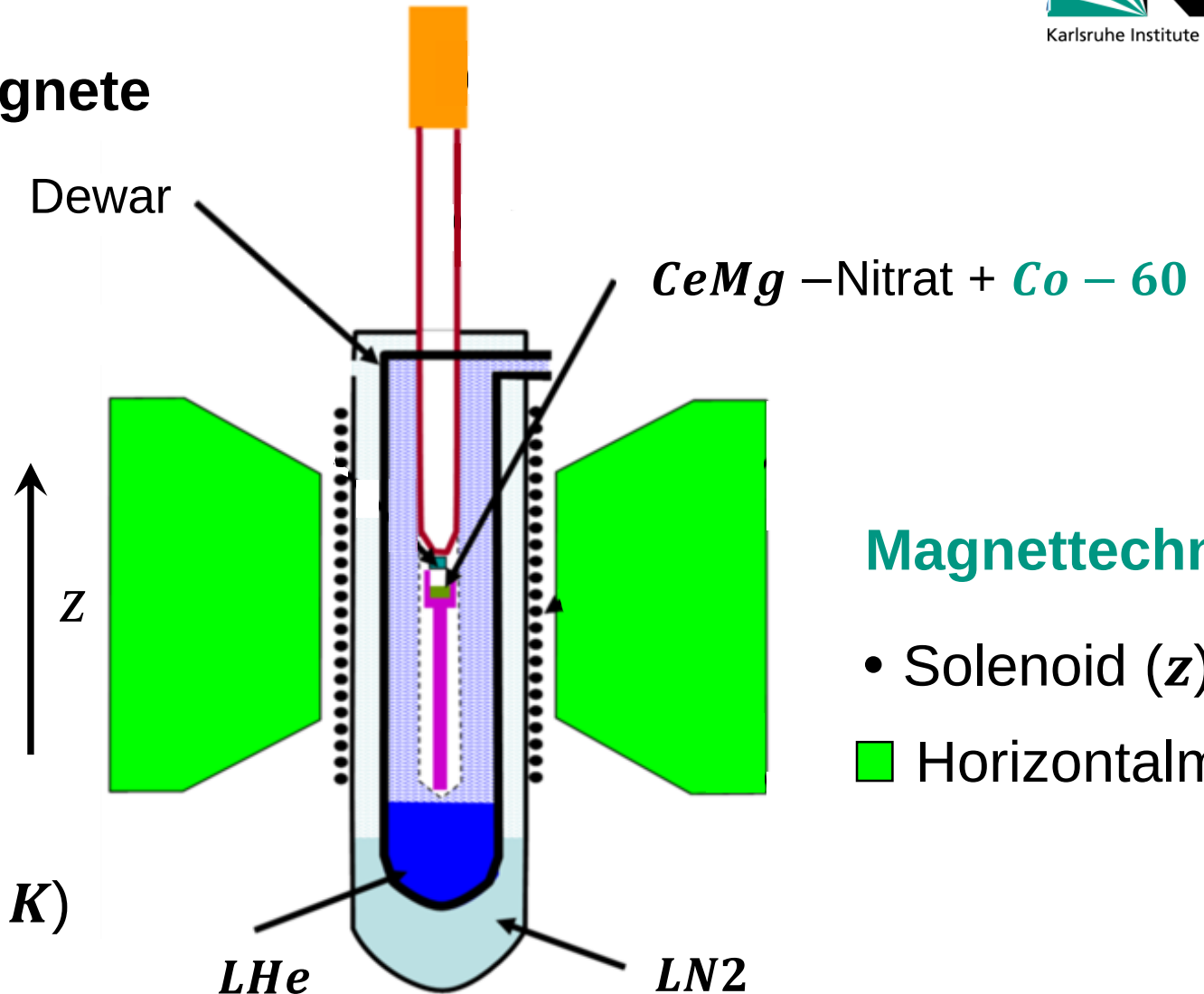
^{60}Co – Quelle

als dünner Film auf
einem para-magnetischen
 $\text{Ce} - \text{Mg} - \text{Nitrat}$ Salz

Kryotechnik

LN_2 Bad ($T = 77 \text{ K}$)

LHe Bad, gepumpt ($T = 1,2 \text{ K}$)



Magnettechnik

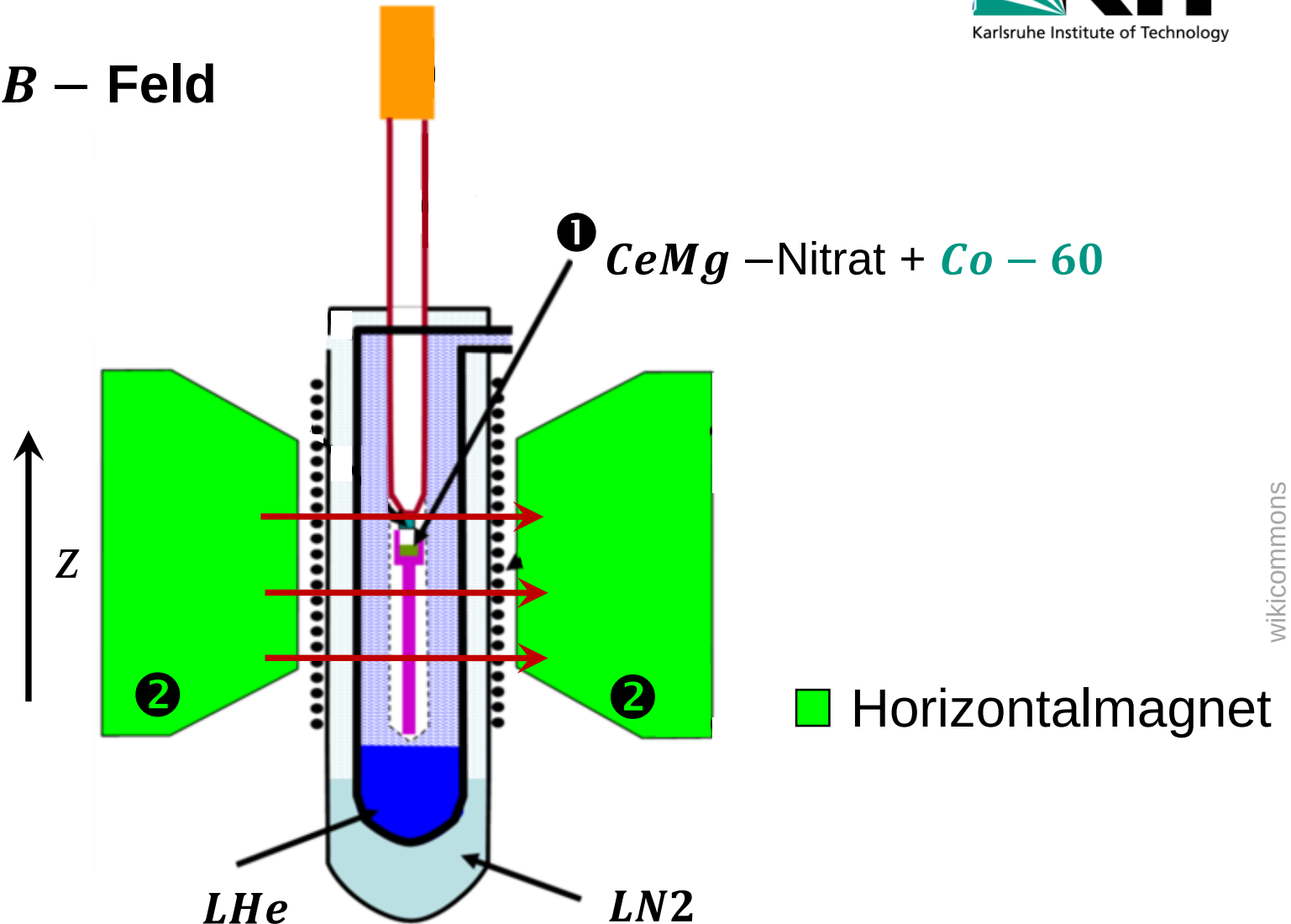
- Solenoid (z)
- Horizontalmagnet

wikicommons

Wu–Experiment: Ablauf

■ Erste Phase: horizontales B – Feld

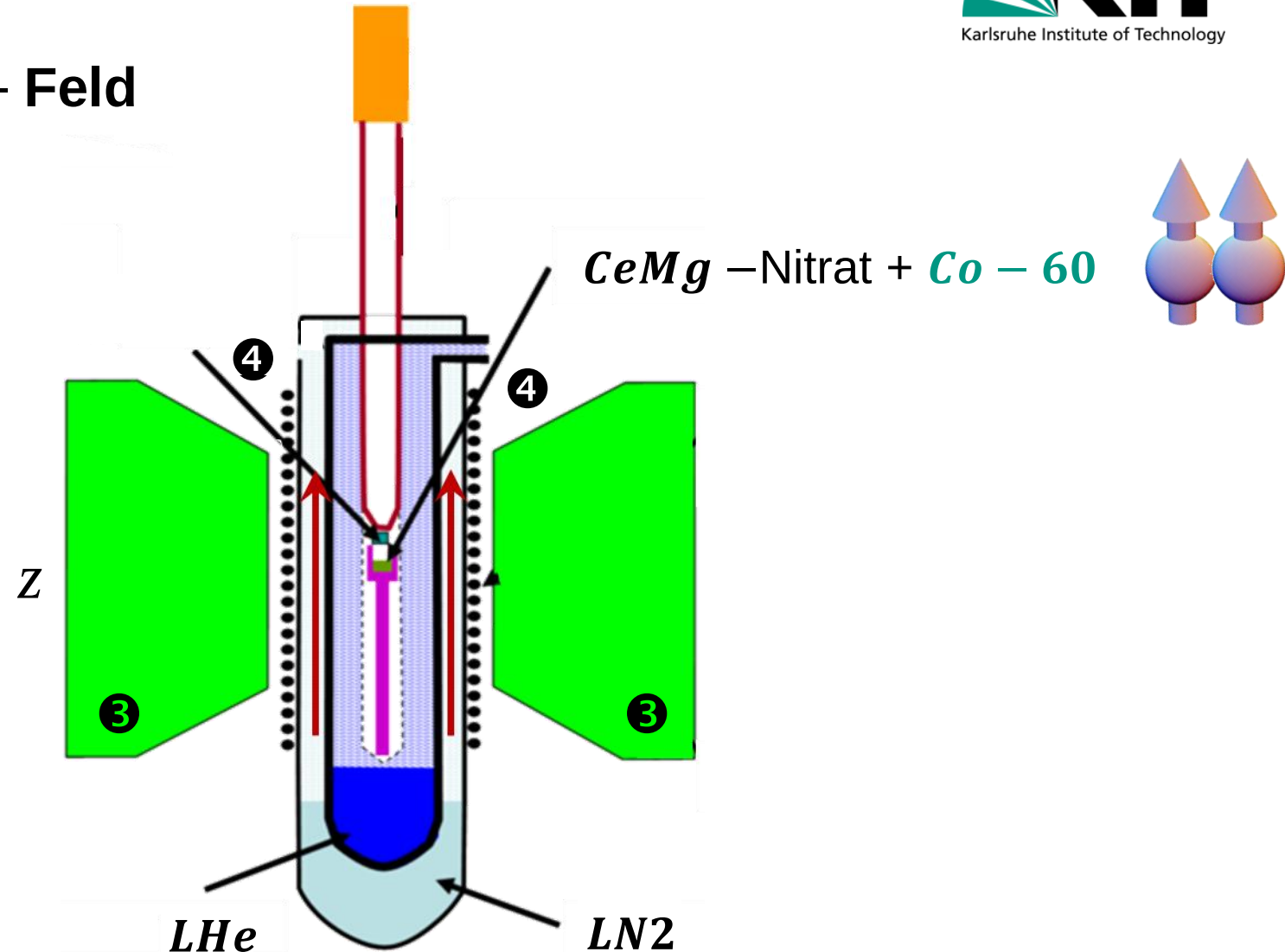
- ① ^{60}Co durch Abpumpen von LHe (flüssiges He) auf $T = 1,2\text{ K}$ abgekühlt: noch keine Polarisation der Kerne ($k_B T \gg \vec{\mu} \cdot \vec{B}$)
- ② durch Anlegen eines horizontalen $\vec{B}$ –Felds:
⇒ Polarisation der Atomhüllen: anisotroper g – Faktor des Salzes



Wu–Experiment: Ablauf

■ zweite Phase: vertikales B – Feld

- ③ Herunterregeln des horizontalen $\vec{B}$ –Felds (adiabatische Entmagnetisierung): Probe kühlt ab auf **wenige mK** !
- ④ Anlegen eines **vertikalen** $\vec{B}$ –Feldes: Probe bleibt kalt, da g –Faktor Salz klein
 $\Rightarrow$ **^{60}Co Kerne sind polarisiert entlang $\vec{B}$**



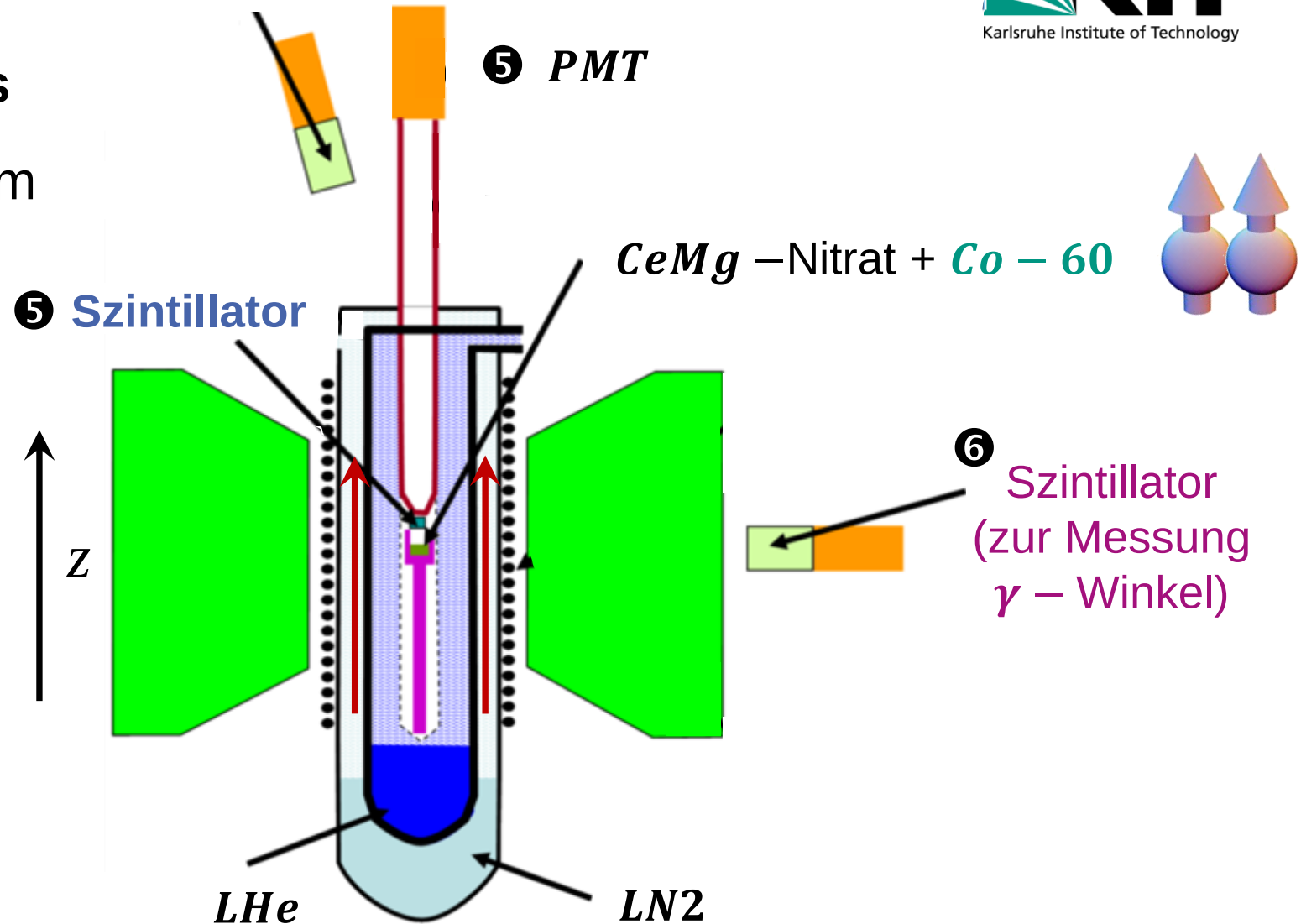
Wu-Experiment: Ablauf

⑥ Szintillator
(zur Messung γ – Winkel)

■ Weitere Experimentdetails

⑤ Szintillator (Anthracen) zum Nachweis β – Elektronen aus dem ^{60}Co – Zerfall

⑥ Szintillator zum Nachweis der γ – Strahlung aus dem $^{60}\text{Ni}^*$ – Zerfall (Test der Polarisation der Kerne)



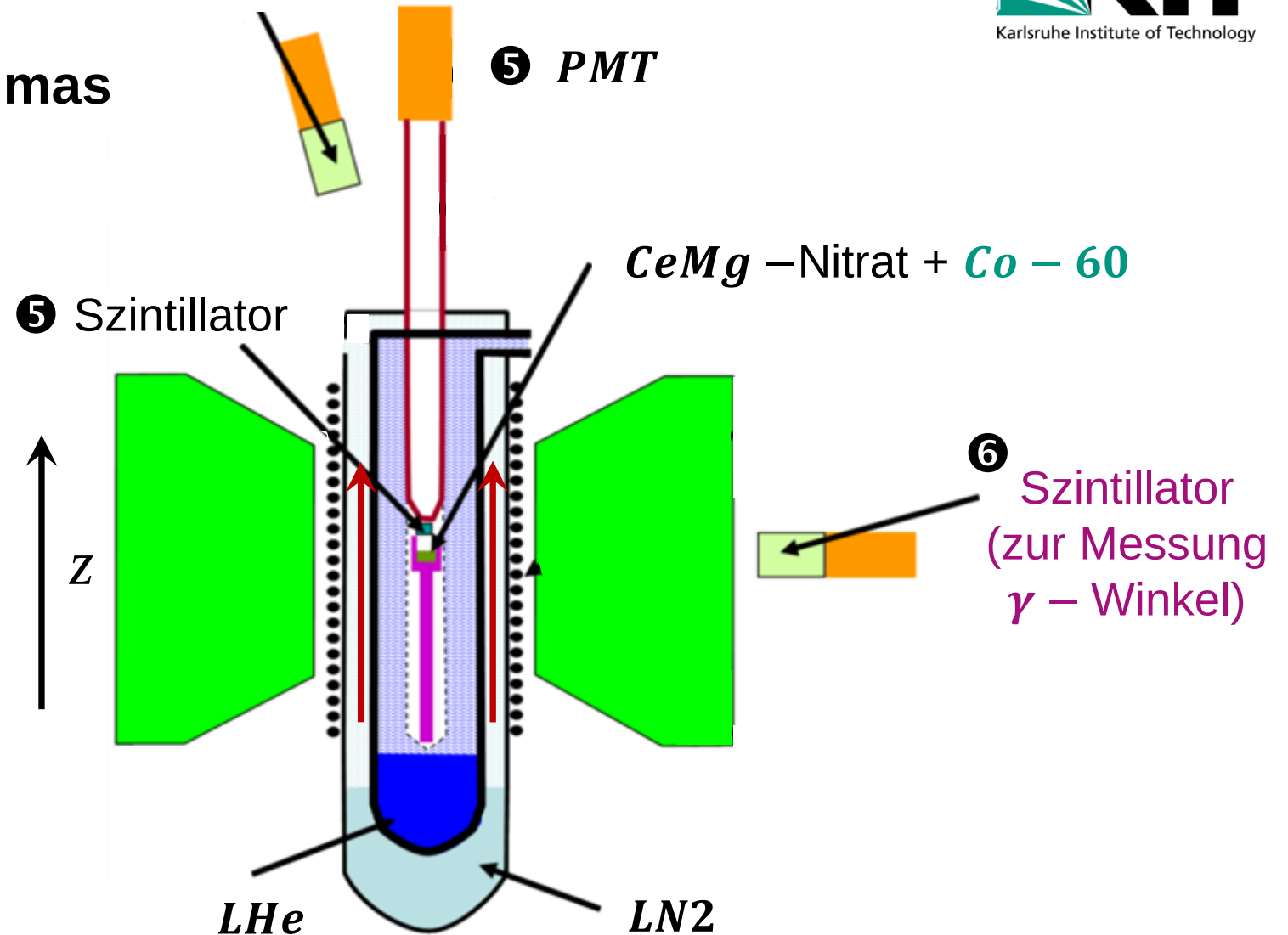
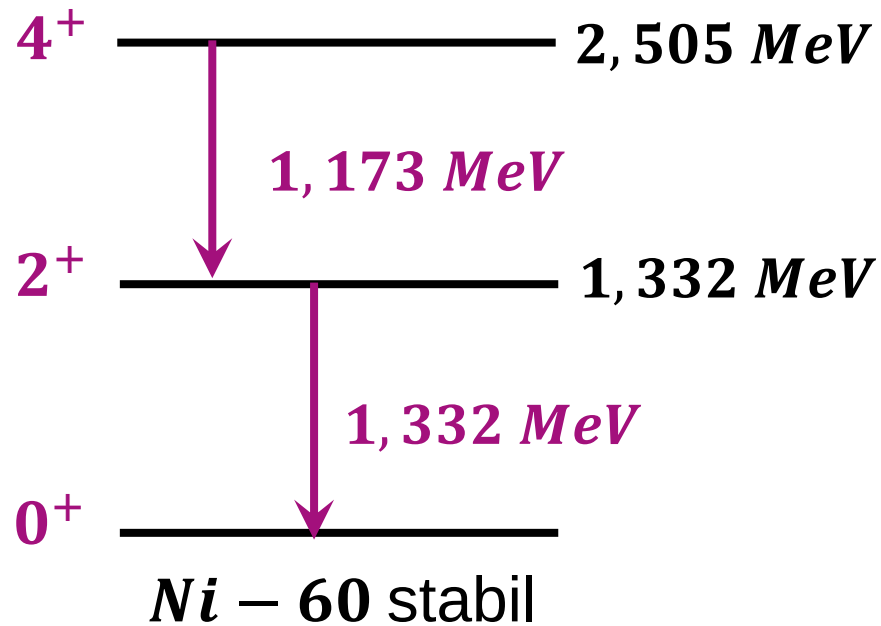
Q: wikicommons

Wu-Experiment: Ablauf

⑥ Szintillator
(zur Messung γ – Winkel)

■ Winkelverteilung der Gammas

⑥ Überprüfung des erzielten Polarisations-Wertes



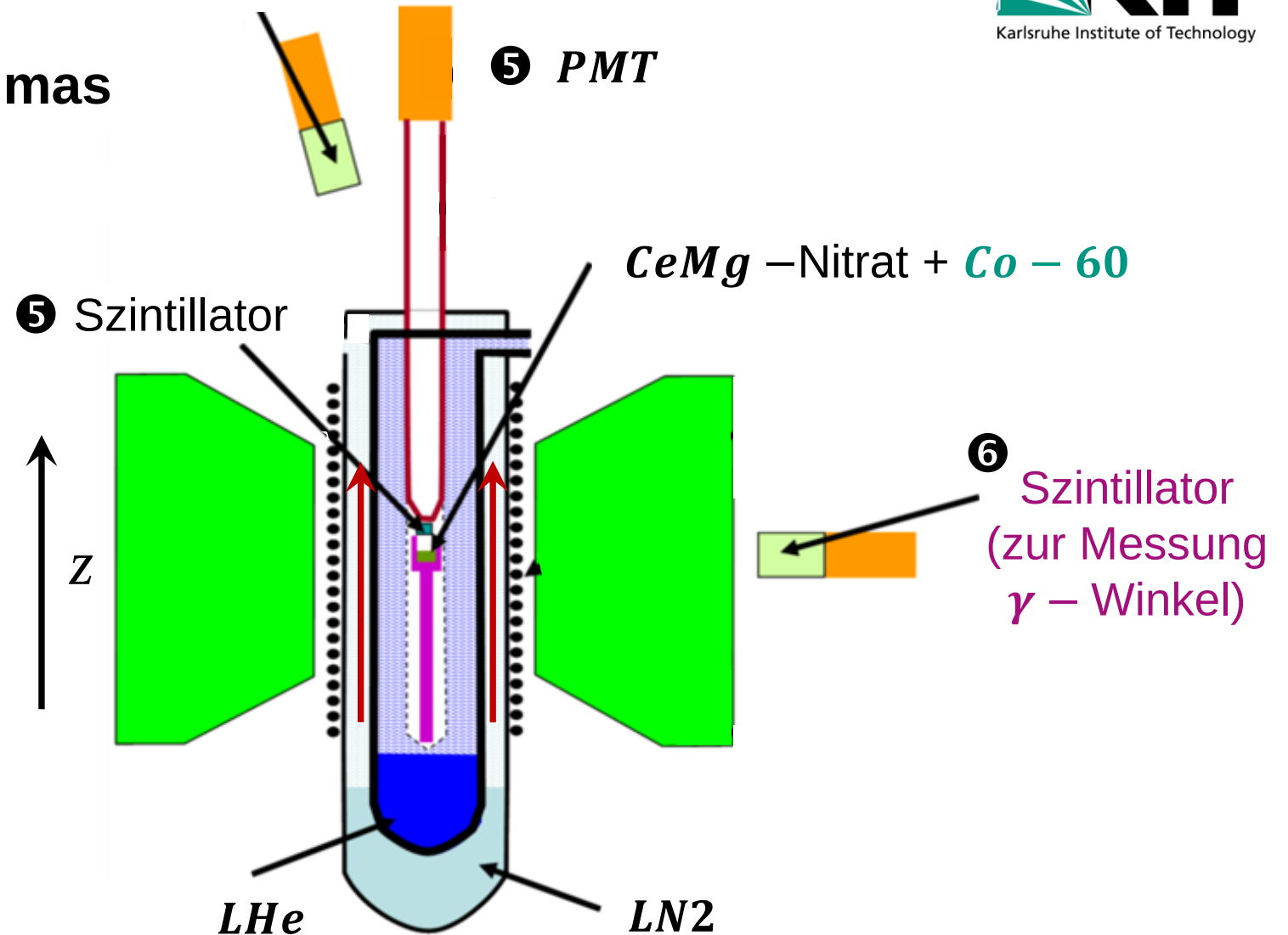
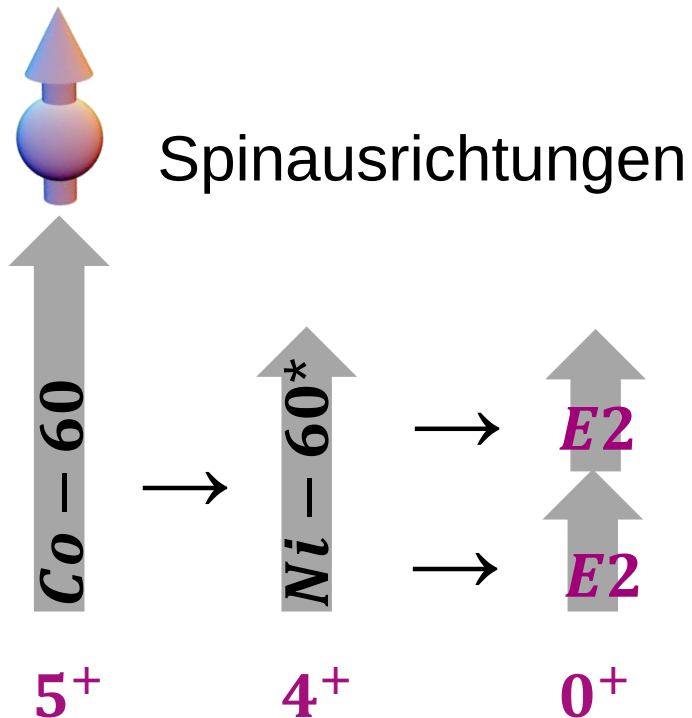
Q: wikicommons

Wu-Experiment: Ablauf

⑥ Szintillator
(zur Messung γ – Winkel)

■ Winkelverteilung der Gammas

⑥ Überprüfung des erzielten Polarisations-Wertes

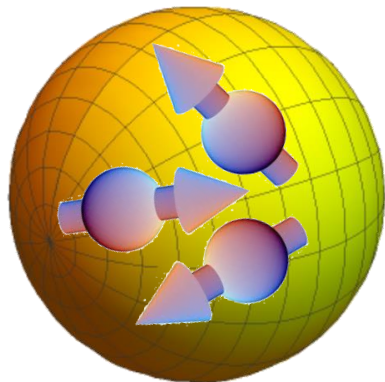


Q: wikicommons

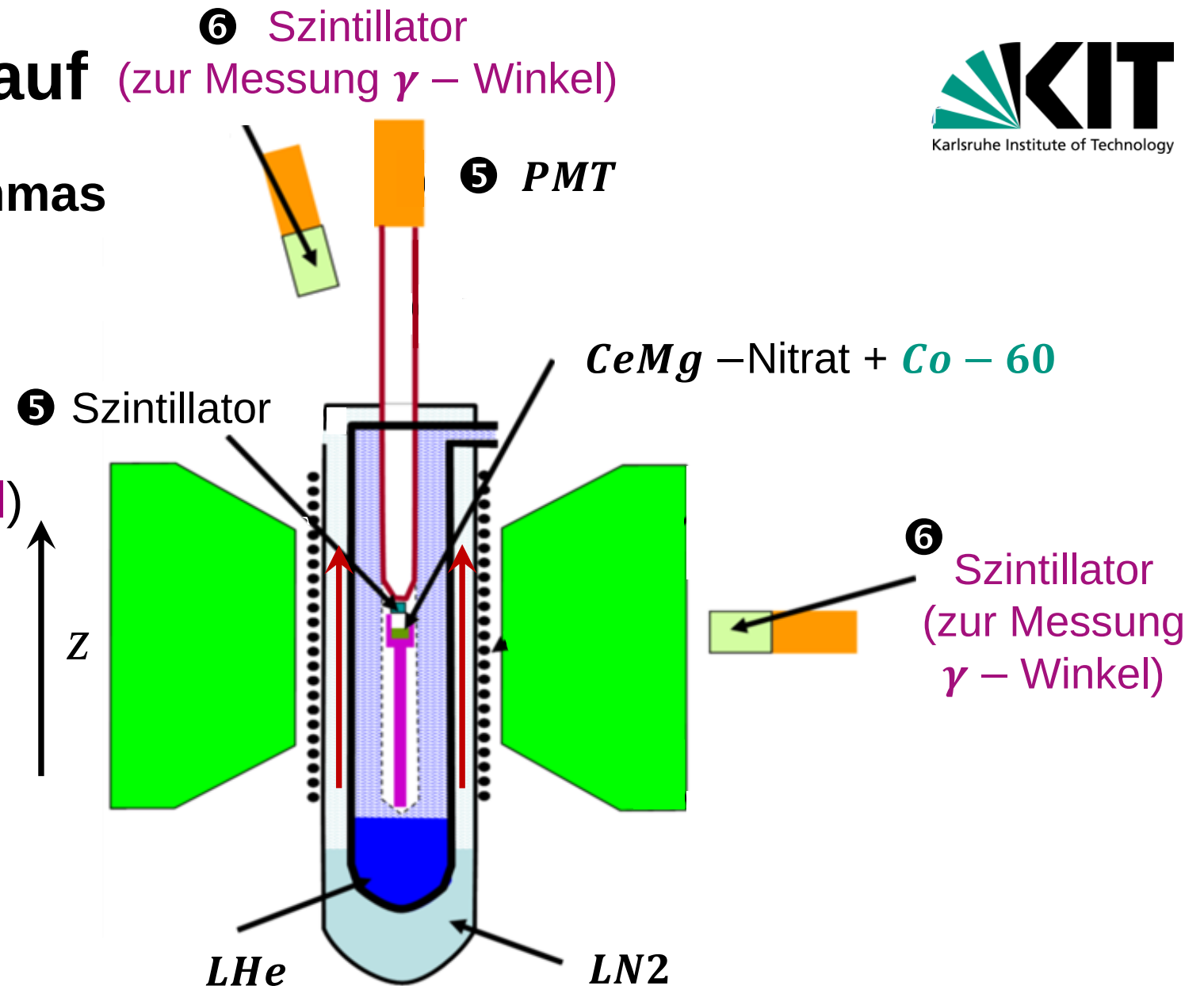
Wu-Experiment: Ablauf

■ Winkelverteilung der Gammas

- ⑥ Überprüfung des erzielten Polarisations-Wertes mit $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$ Übergängen aus Ni^* -Kern ($E2$ Quadrupol)



$Co - 60$ unpolarisiert: isotrop

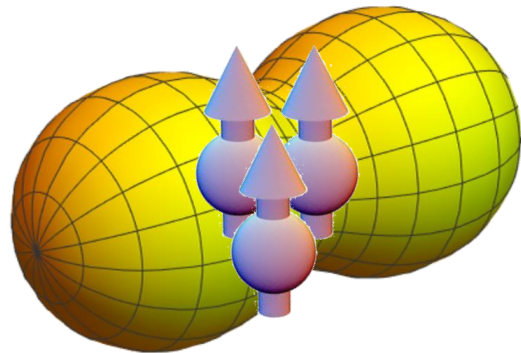


Q: wikicommons

Wu-Experiment: Ablauf

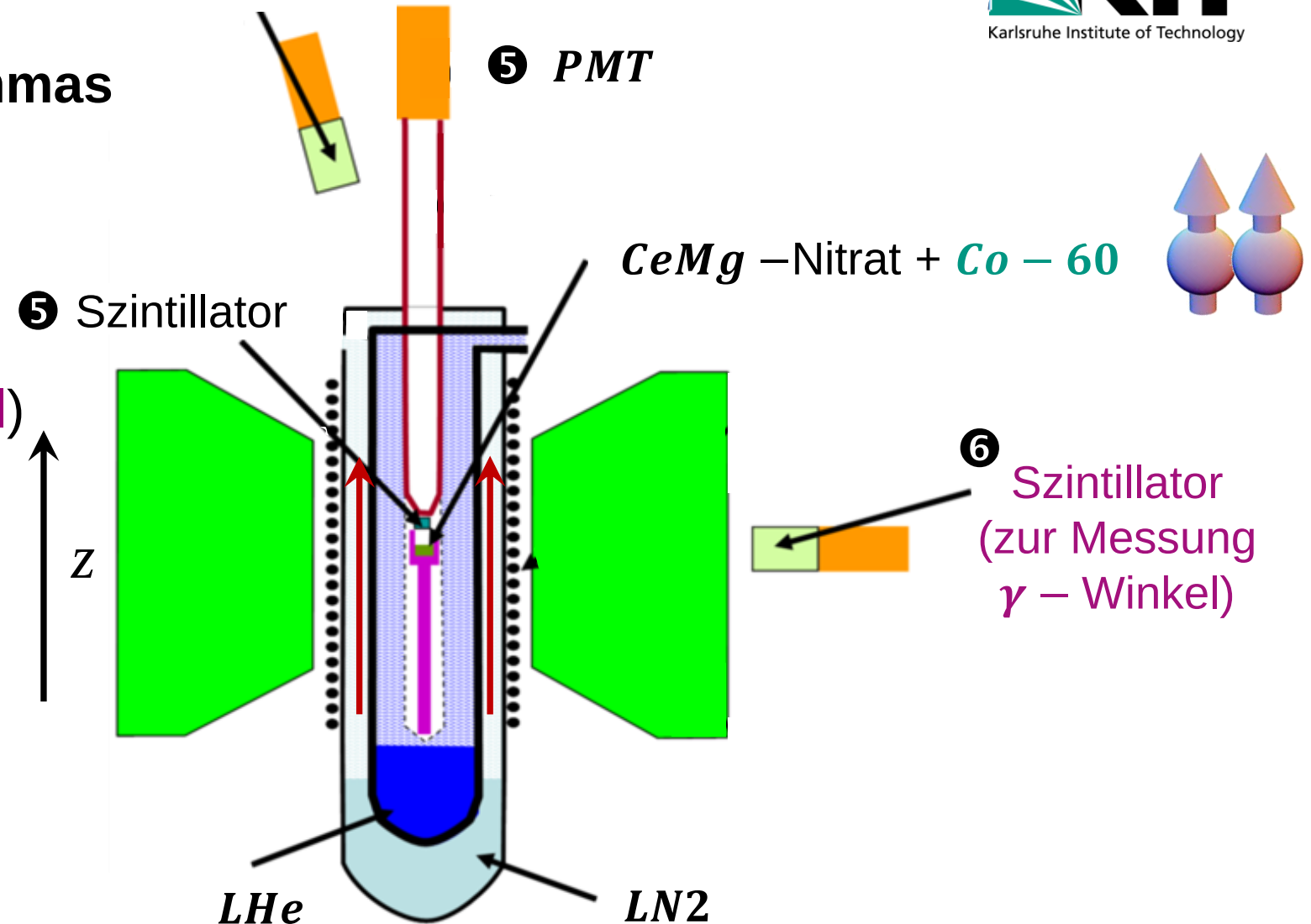
■ Winkelverteilung der Gammas

- ⑥ Überprüfung des erzielten Polarisations-Wertes mit $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$ Übergängen aus Ni^* -Kern ($E2$ Quadrupol)



$Co-60$ polarisiert: **anisotrop**

⑥ Szintillator
(zur Messung γ – Winkel)



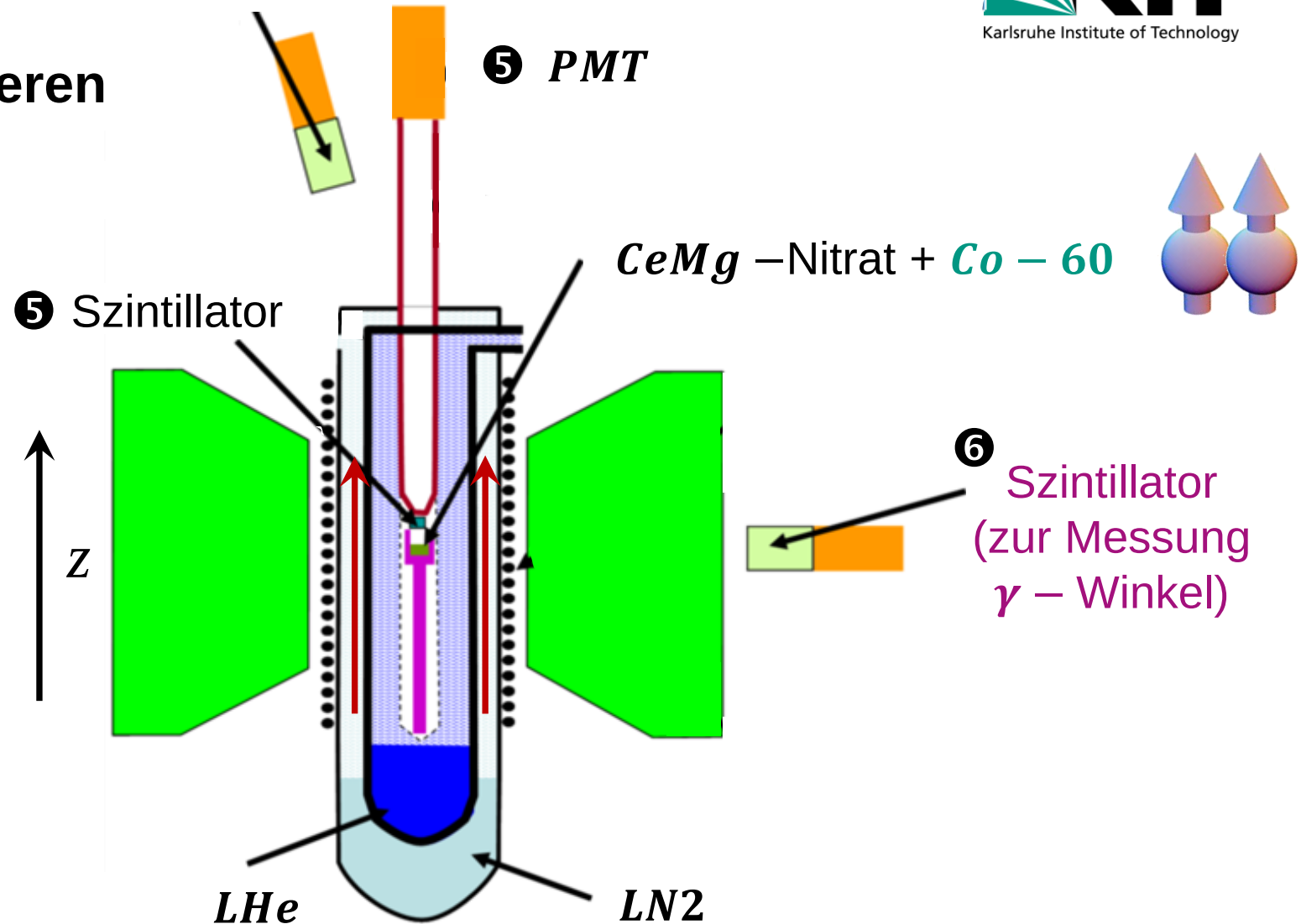
Q: wikicommons

Wu-Experiment: Ablauf

⑥ Szintillator
(zur Messung γ – Winkel)

■ Phasen beim Experimentieren

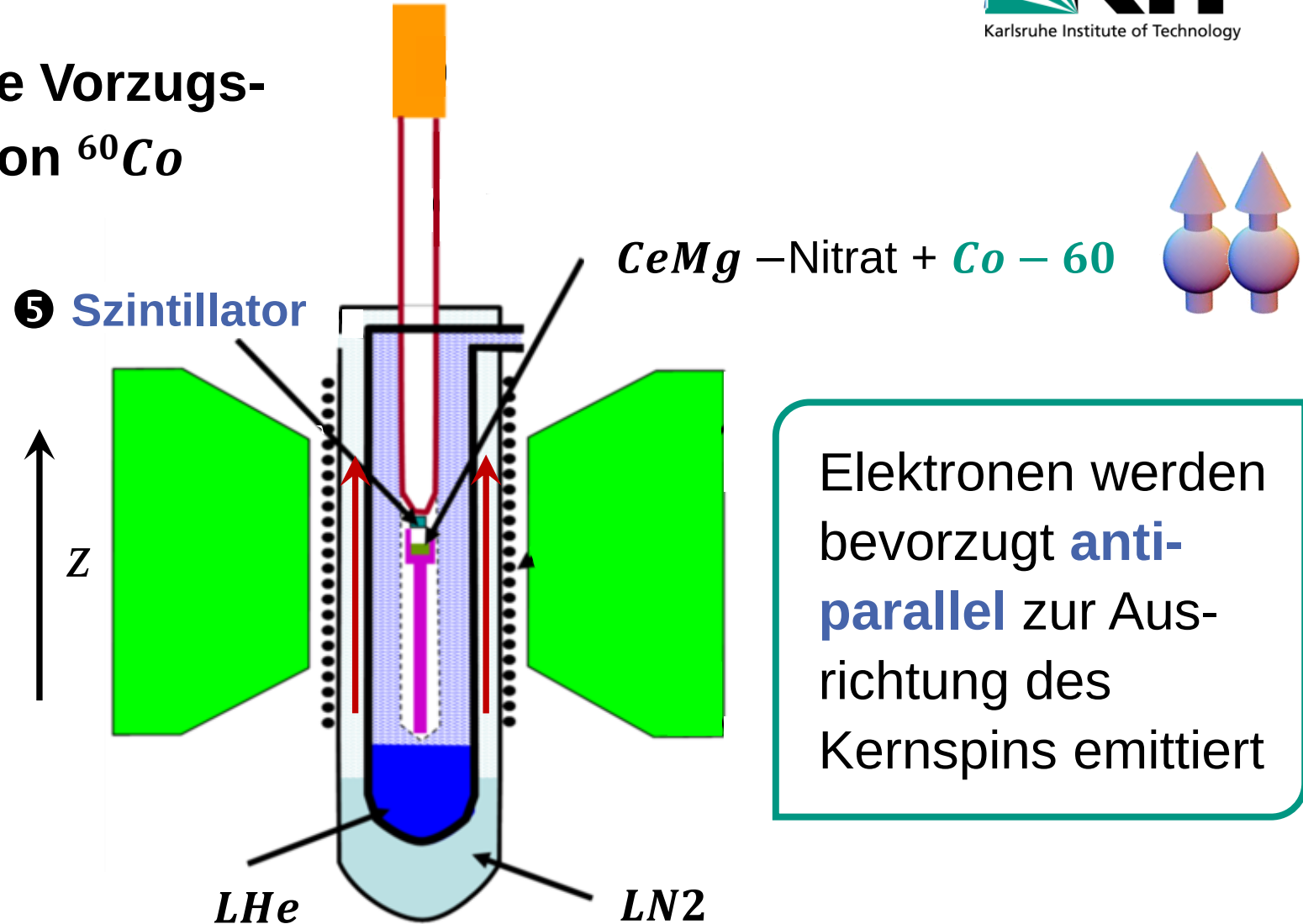
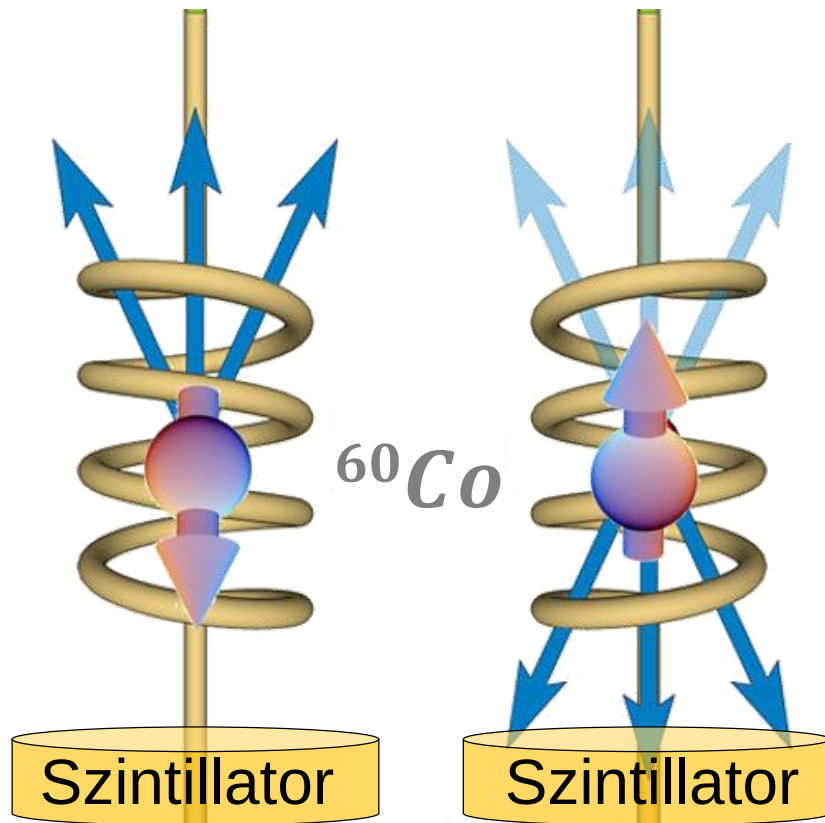
- polarisiere $Co - 60$ mit starkem externen B – Feld
- überprüfe, dass $Co - 60$ Kerne polarisiert sind
- messe Richtungen der Elektronen aus β – Zerfall
- bestimme, ob Vorzugsrichtung



Q: wikicommons

Wu-Experiment: Resultat – Paritätsverletzung!

- β – Elektronen zeigen eine Vorzugsrichtung, korreliert mit $\vec{J}$ von ^{60}Co



Q: wikicommons

Wu-Experiment: Resultat – Paritätsverletzung!

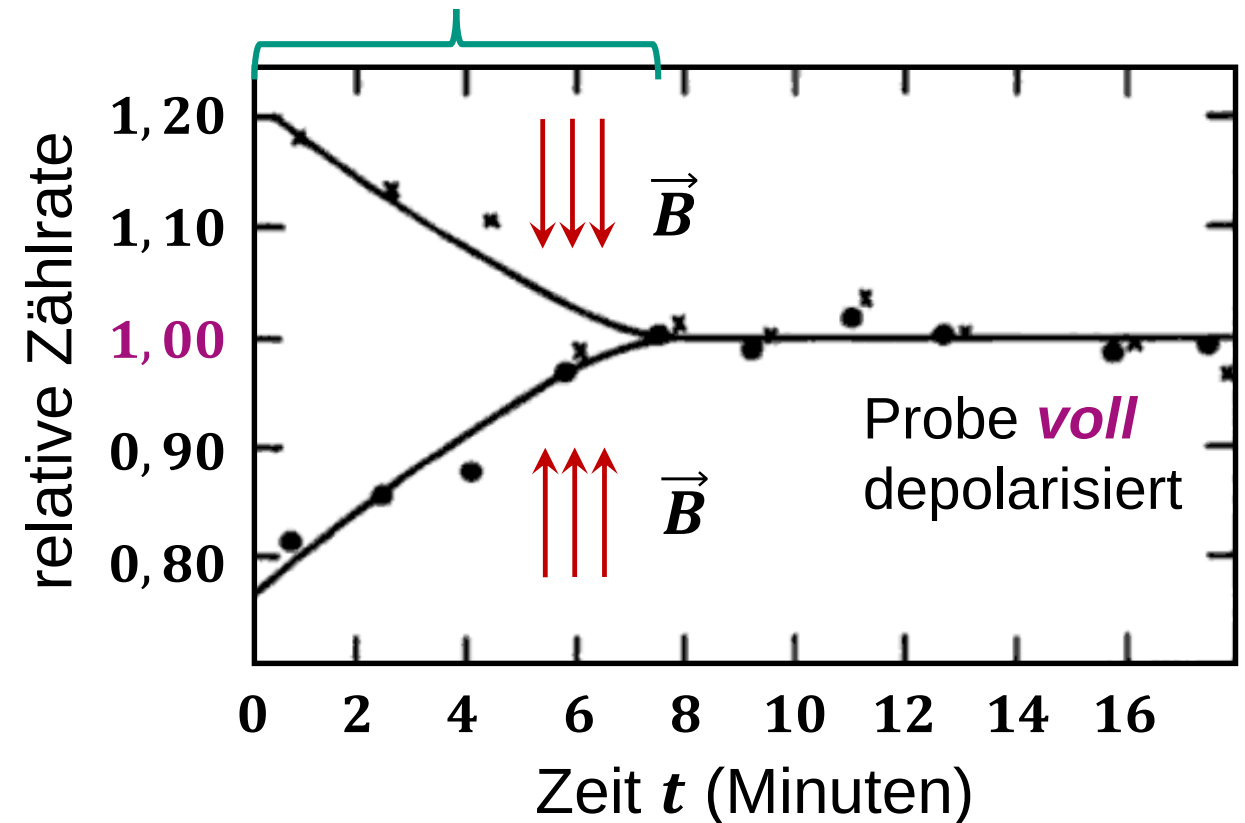
- β – Elektron wird bevorzugt antiparallel zum Kernspin von $Co - 60$ emittiert

langsame Proben-Erwärmung $\rightarrow$ $\vec{J}$ depolarisiert (via $E2$ – Übergänge)

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



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



Q: CS Wu et al

Arbeiten von Lee und Yang & Madame Wu

- **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. HOPPE, AND R. P. HUDSON,
National Bureau of Standards, Washington, D. C.

(Received January 15, 1957)

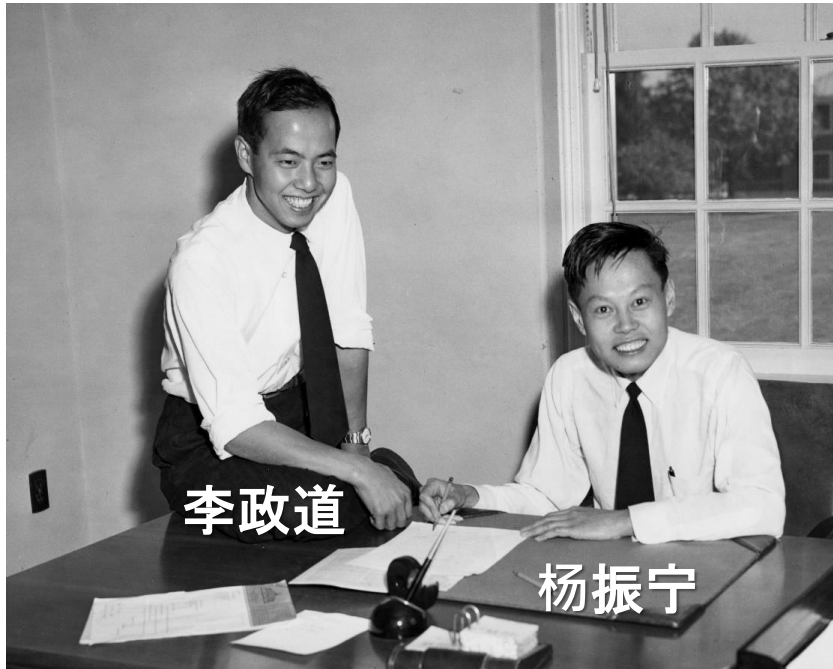
IN a recent paper¹ on the question of parity in weak interactions, Lee and Yang critically surveyed the experimental information concerning this question and reached the conclusion that there is no existing evidence either to support or to refute parity conservation in weak interactions. They proposed 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://arxiv.org/abs/195701012)

Arbeiten von Lee und Yang & Madame Wu

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



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"*



Madame Wu – späte Ehrung

■ Madame Wu – 2021 Ehrung via **US Postal Stamp**



„*The First Lady of Physics*“

Feb. 1, 2021

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



Wu-Experiment, nachgefragt

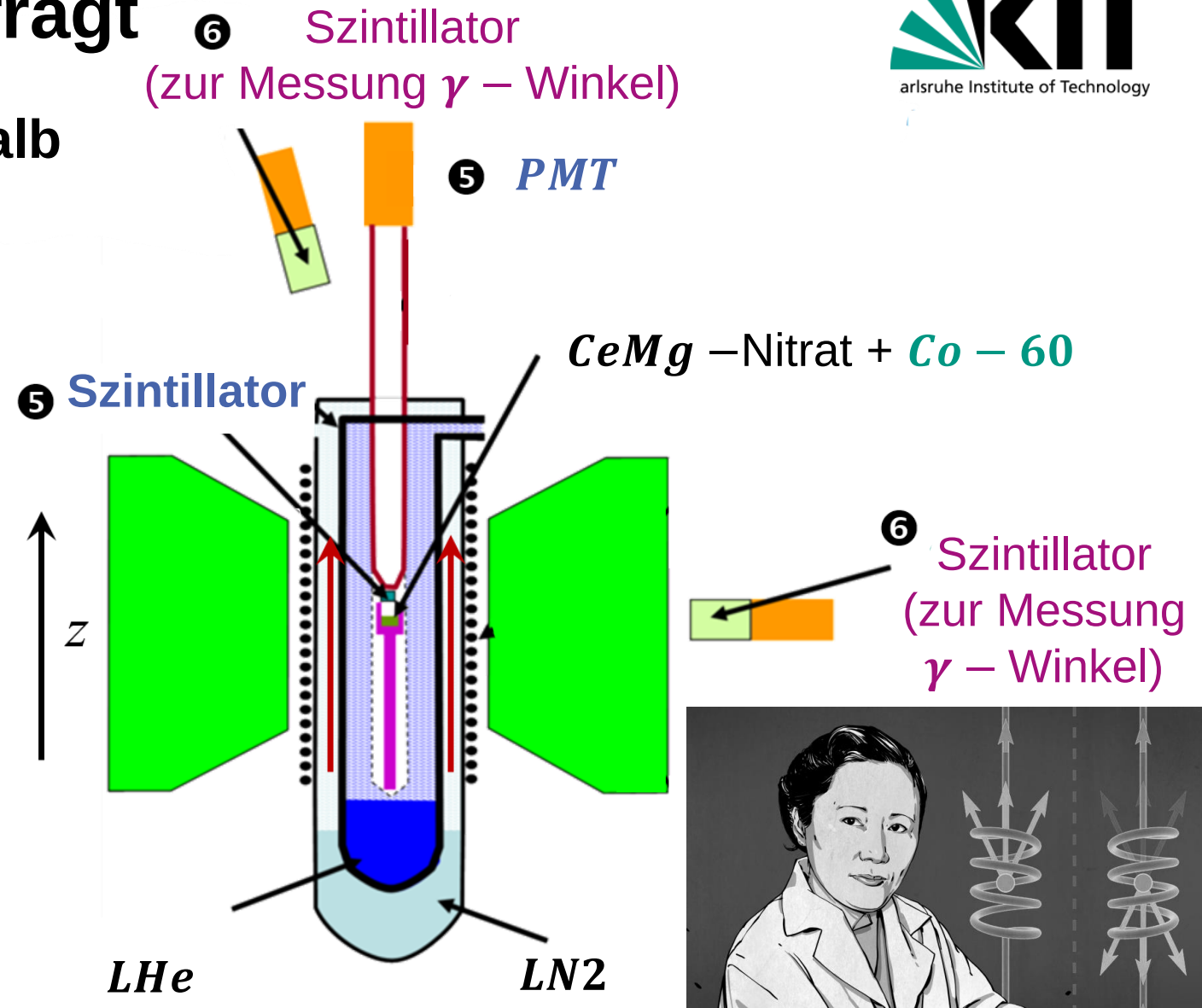
- Madame Wu frägt nach, weshalb ihr Aufbau so komplex war

Szintillator ⑤ & **PMT** sind weit voneinander getrennt, warum?

Lichtleiter ist erforderlich, da PMT nur in niedrigem B – Feld arbeitet

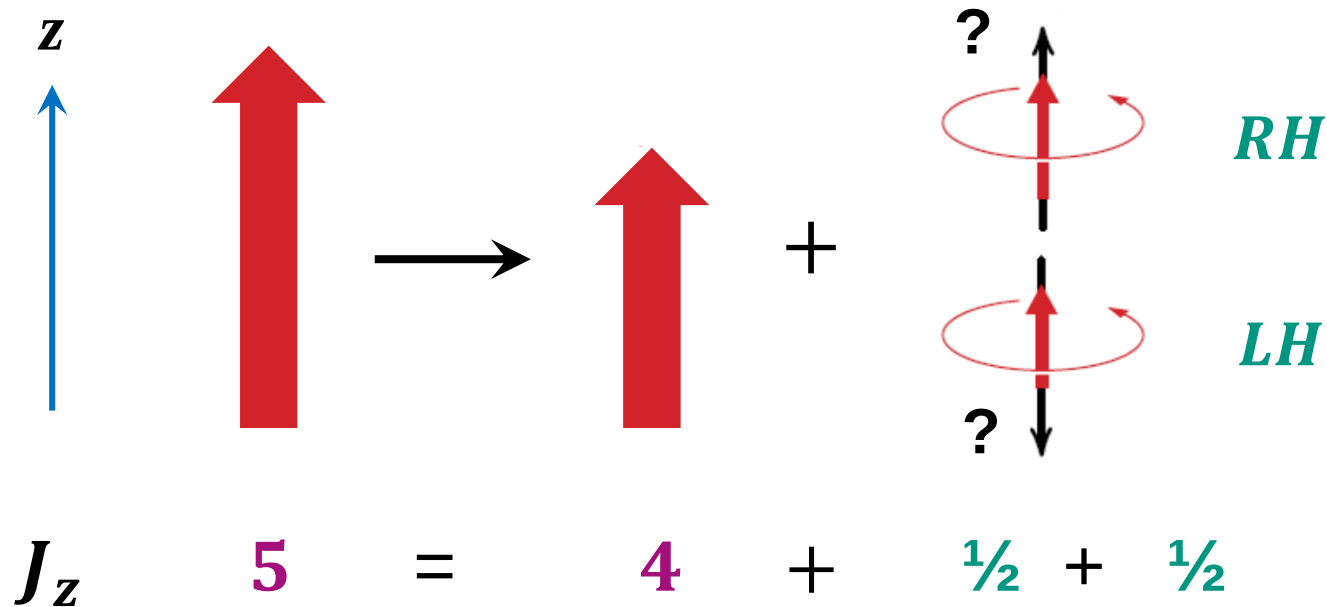
Szintillator ⑤ & ^{60}Co – Präparat sind direkt benachbart, weshalb? (bzw. warum **weit getrennt** bei ⑥ ?)

unterschiedliche Reichweite von β – Elektronen & γ – Quanten



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

■ Spins beim $Co - 60$ Zerfall (polarisiert)



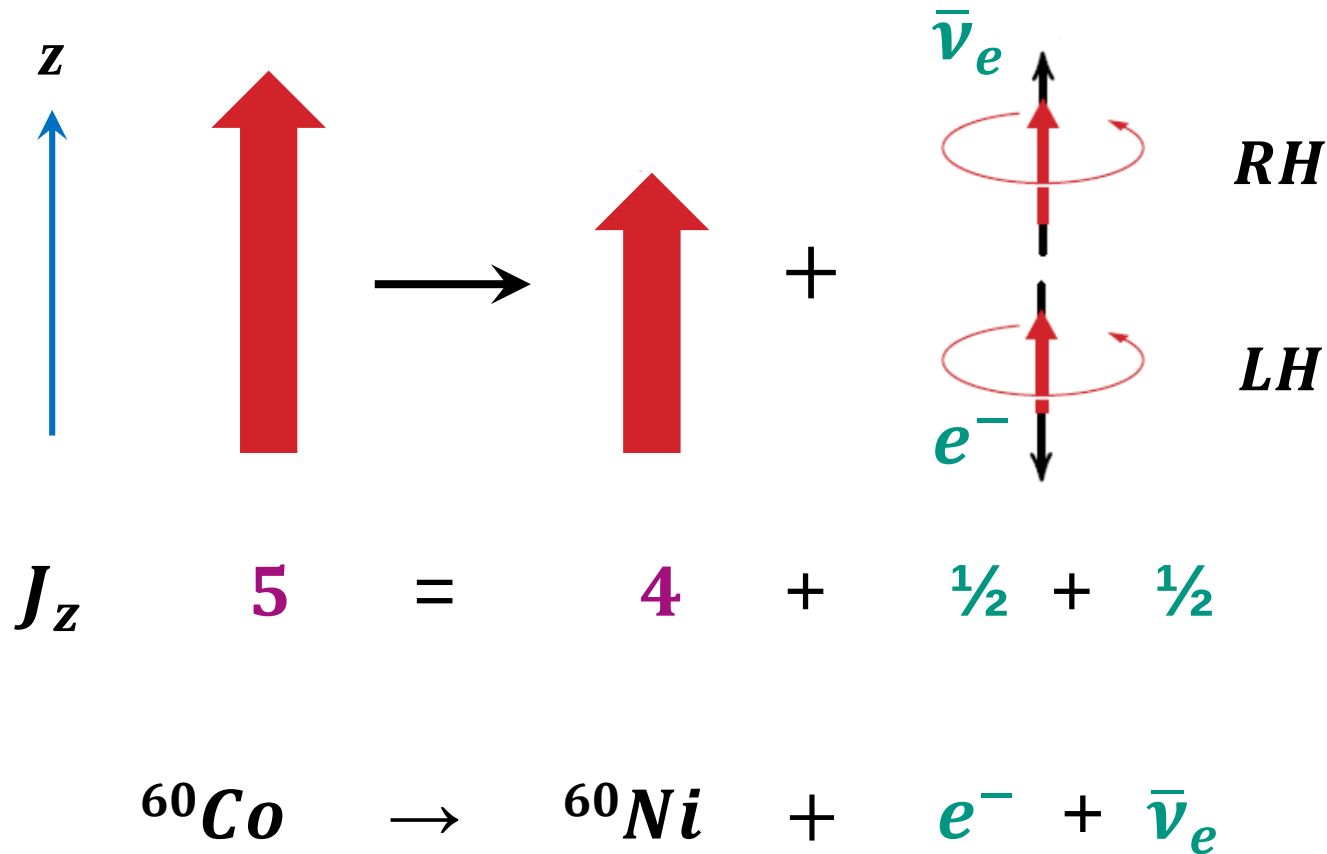
- Impulse von e^- und $\bar{\nu}_e$ antiparallel
da β -Zerfall in Ruhe ($\sum \vec{p}_i = 0$)

- 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

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

■ Spins beim $Co - 60$ Zerfall (polarisiert)



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

- $Co - 60 \beta$ -Zerfall: Emission

linkshändiges Elektron
rechtshändiges Antineutrino



Helizitätszustände eines Fermions mit $S = \frac{1}{2}$

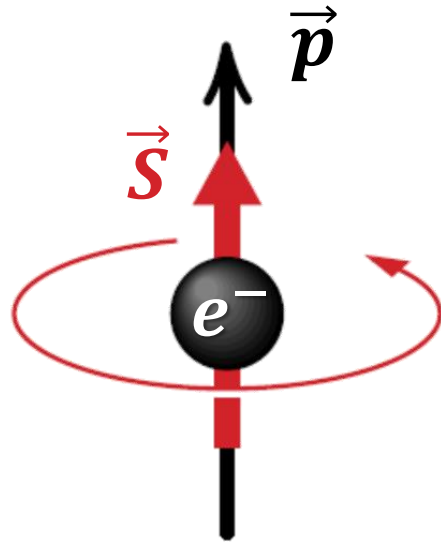
■ **Helizität:** linkshändig/rechtshändig, Teilchen bzw. Antiteilchen

TEILCHEN

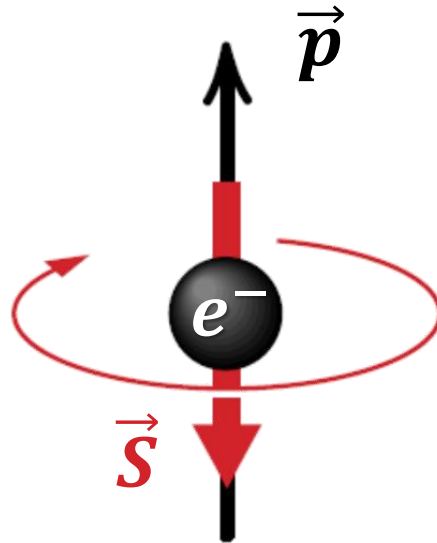
ANTI-TEILCHEN



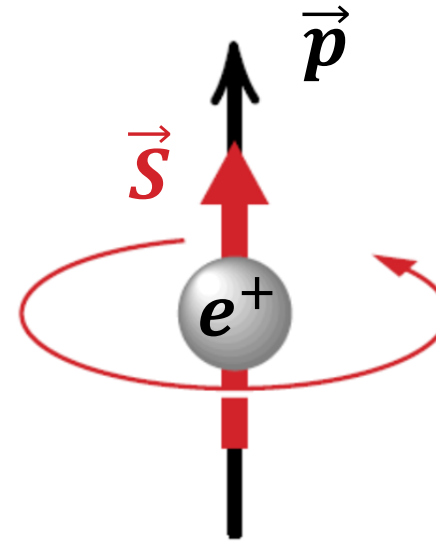
RH



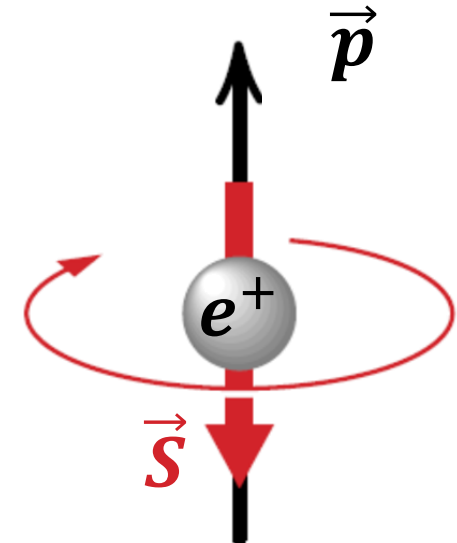
- rechtshändig



- linkshändig



- rechtshändig



- linkshändig



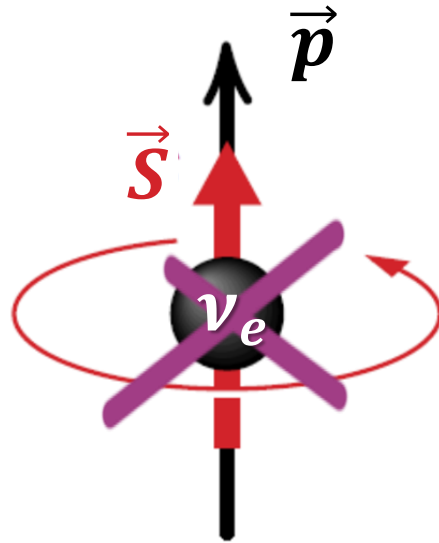
LH

Helizitätszustände von Neutrinos (Goldhaber)

■ Helizität: linkshändige Neutrinos und rechtshändige Antineutrinos

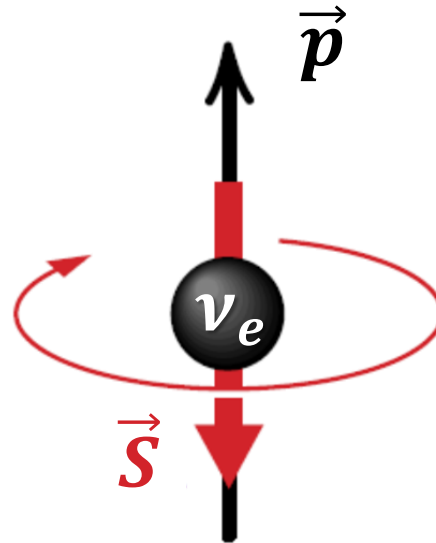
Neutrinos

Anti-Neutrinos

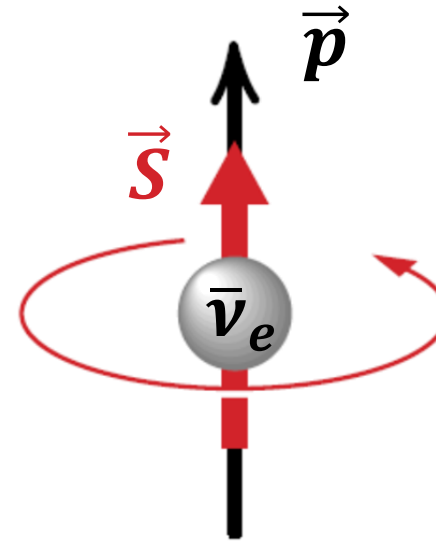


- rechtshändig

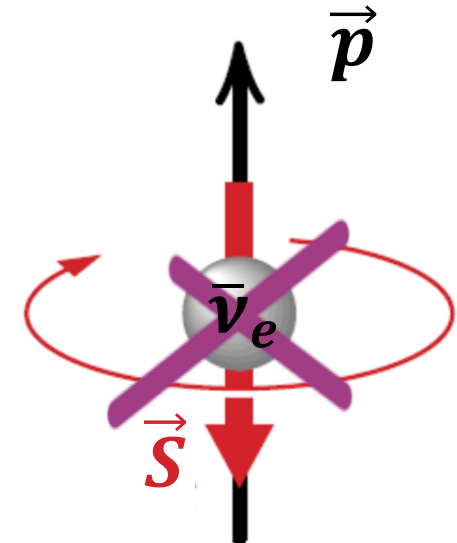
„steriles“ ν



- linkshändig



- rechtshändig



- linkshändig

„steriles“ $\bar{\nu}$

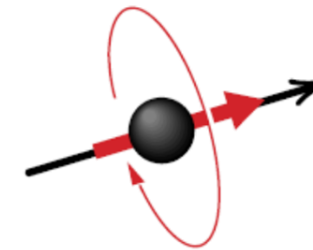
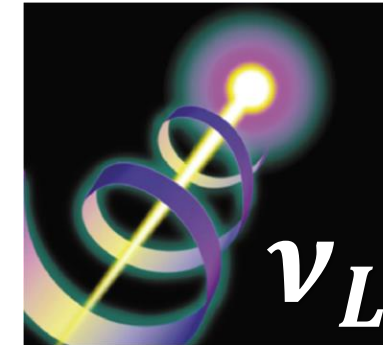
Paritätsverletzung: nur LH Neutrinos im SM

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

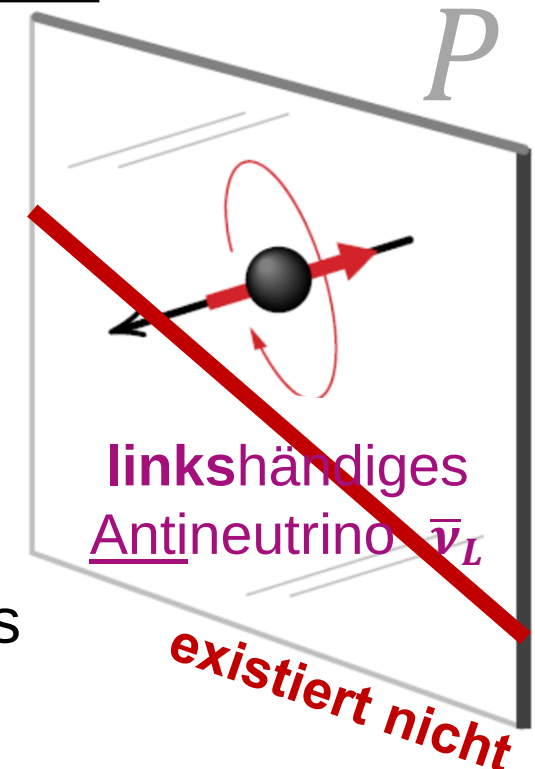
- SM : **linkshändige Neutrinos** $\nu = \nu_L$
rechtshändige Antineutrinos $\bar{\nu} = \bar{\nu}_R$
- **linkshändige** $\bar{\nu}_L$ bzw. **rechtshändige** ν_R
existieren nicht im Standardmodell (SM)

■ Schwache Wechselwirkung besitzt eine Händigkeit:

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

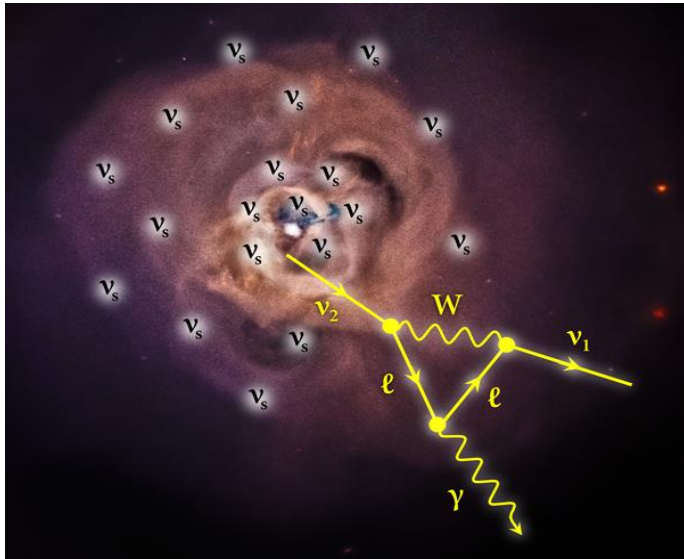


rechtshändiges
Antineutrino $\bar{\nu}_R$

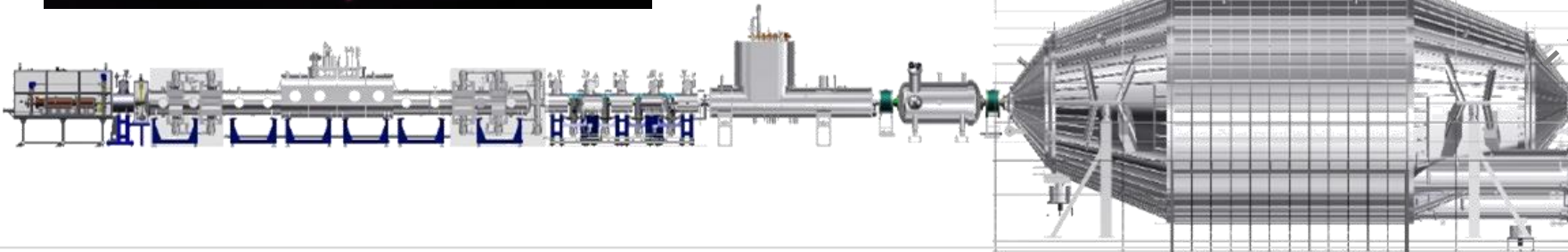
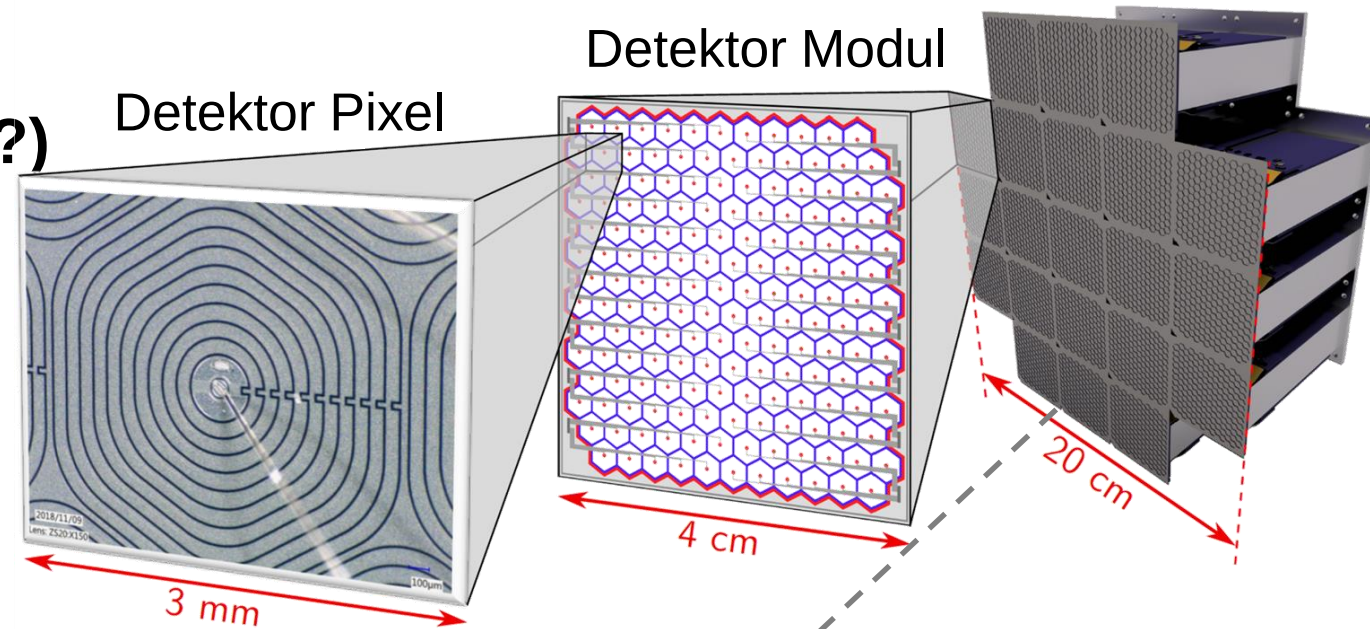


Suche nach 'sterilen' Neutrinos mit *KATRIN*

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



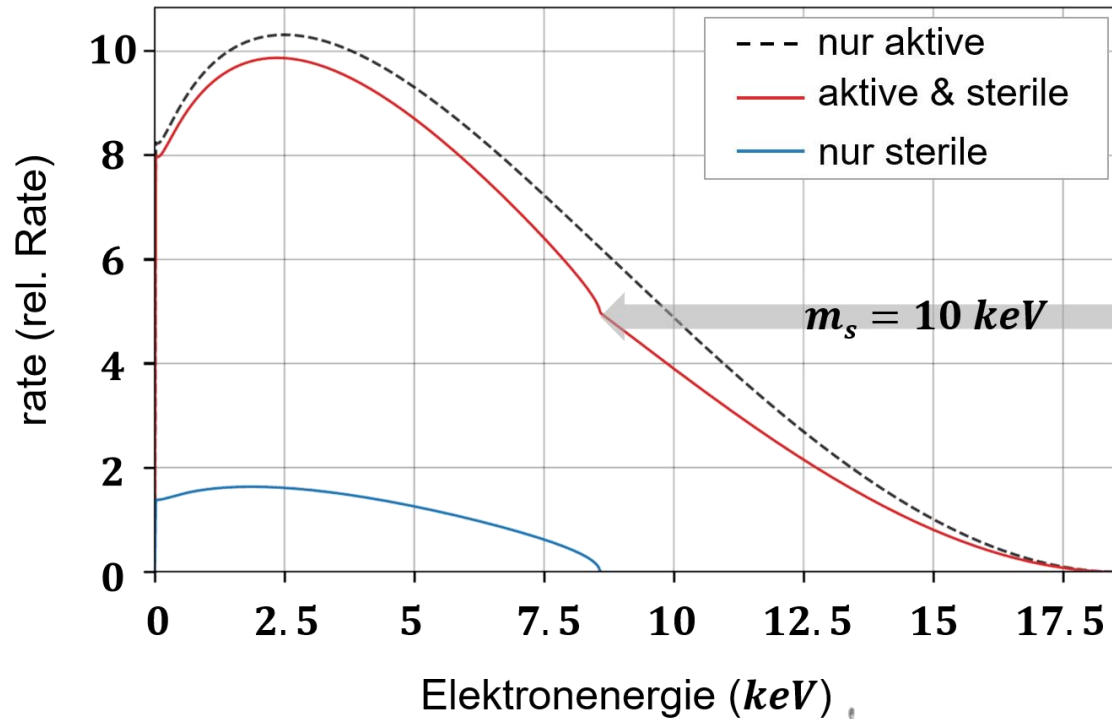
Evidenz
via *X – Ray*
Signal?



TRISTAN – Detektor
*TR*itium *I*nteraction on
*ST*erile (*A*) *N*eutrinos

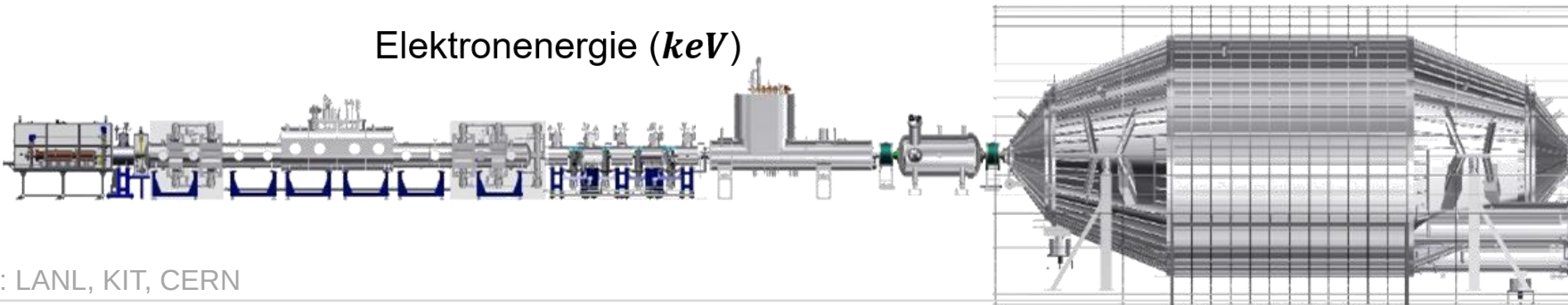
Suche nach 'sterilen' Neutrinos mit KATRIN

■ *KATRIN* sucht nach neuartigen ν – Zuständen



Neutrino kinks
Precise measurements of β -decay spectra using the KATRIN experiment are potentially sensitive to keV-scale heavy neutral leptons.

TURNING THE SCREW ON
RIGHT-HANDED NEUTRINOS

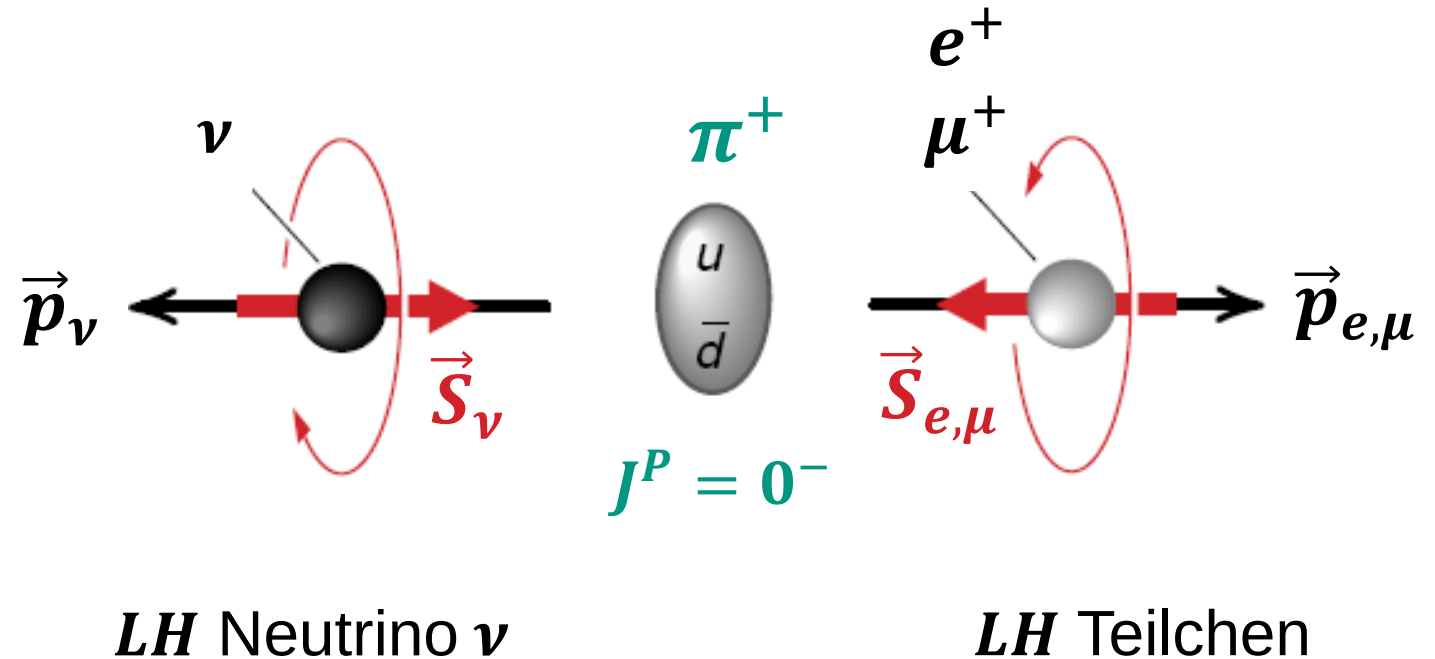


TRISTAN – Detektor
TRitium **I**nteraction on
STerile **(A)** Neutrinos

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

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

- **pseudoskalar**es Pion π^+
mit $J^P = 0^-$
- Zerfallsmoden Pion π^+ :
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
 $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu$
- Neutrino $\nu = LH$
& ultra-relativistisch,
d.h. mit **festgelegter**
Helizität $h \cong -1$



Q: LANL, American IoP

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

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

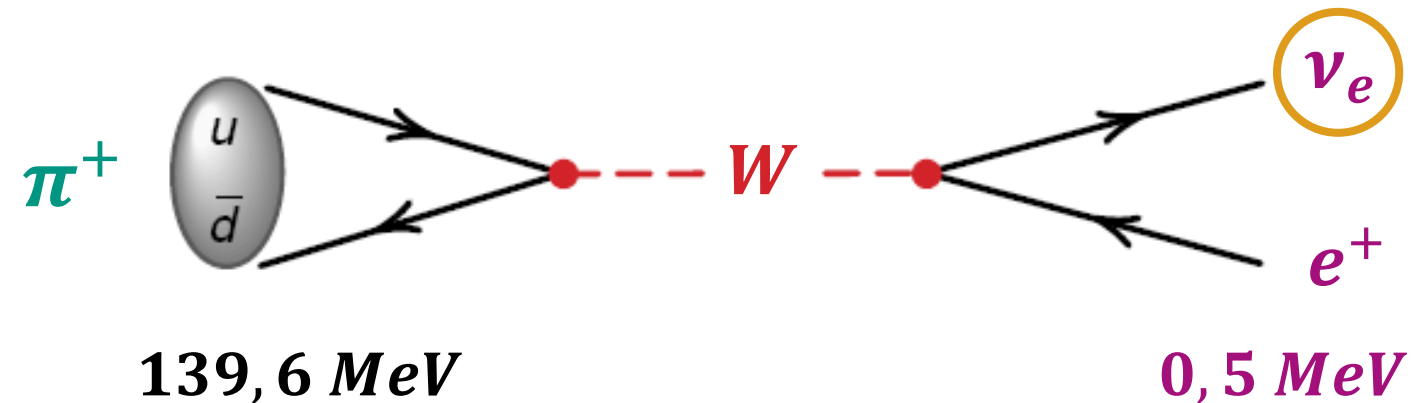
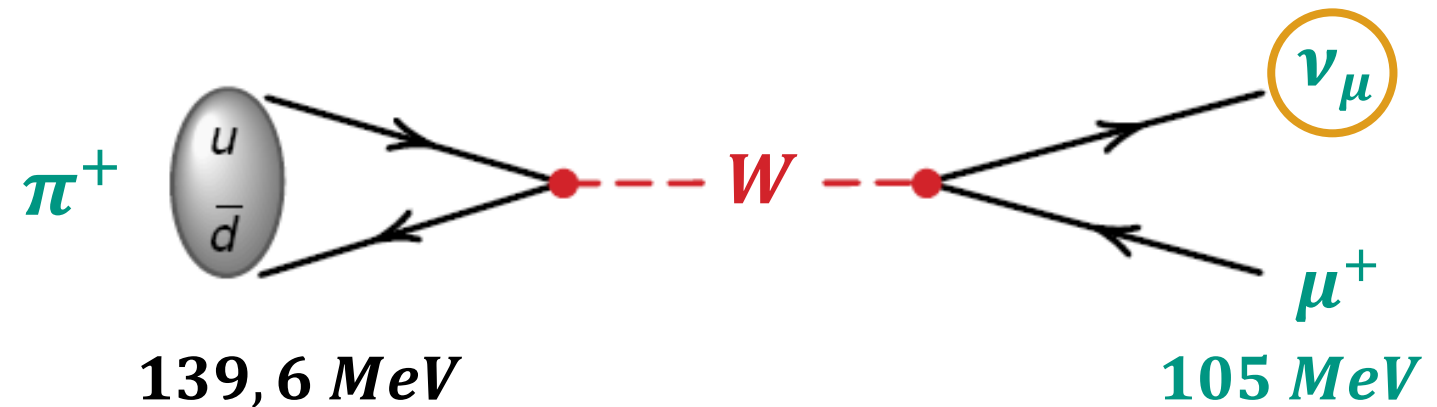
- pseudoskalar Pion π^+
mit $J^P = 0^-$

- Zerfallsmoden Pion π^+ :

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

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

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



Q: LANL, American IoP

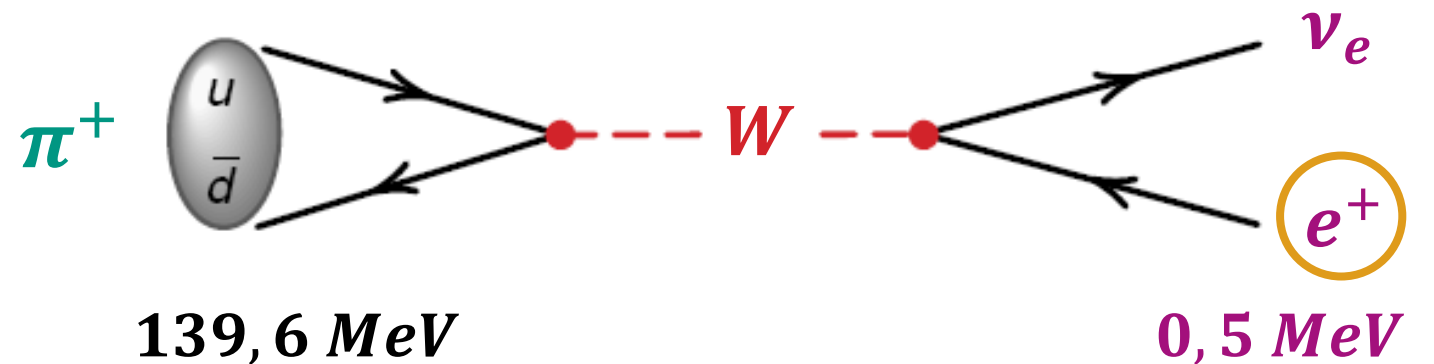
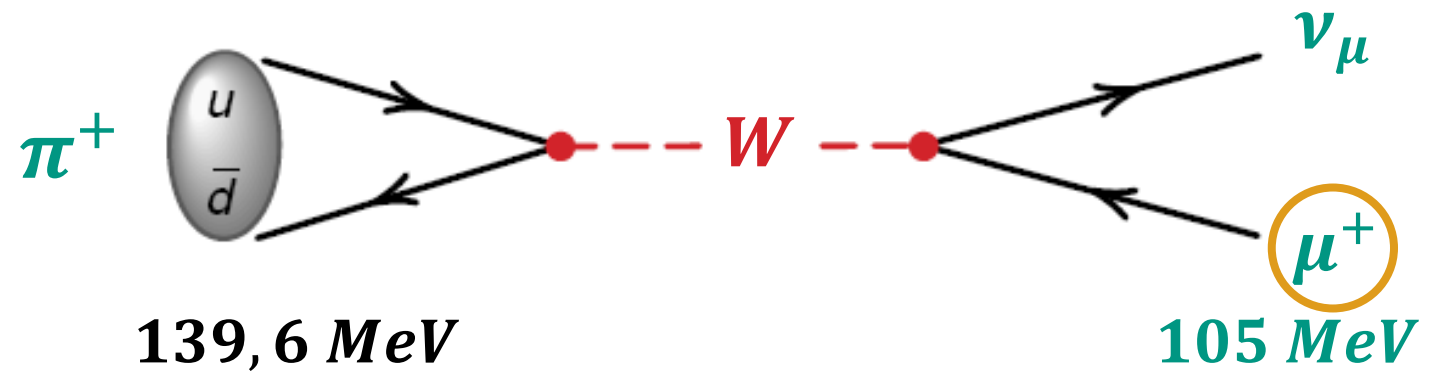
Paritätsverletzung: Pion-Zerfall – in μ^+ bzw. e^+

■ 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 (da $J = 0$)

(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:

$$\text{Helizität } h = \pm v/c$$

d.h. abhängig von v
(kinet. Energie)

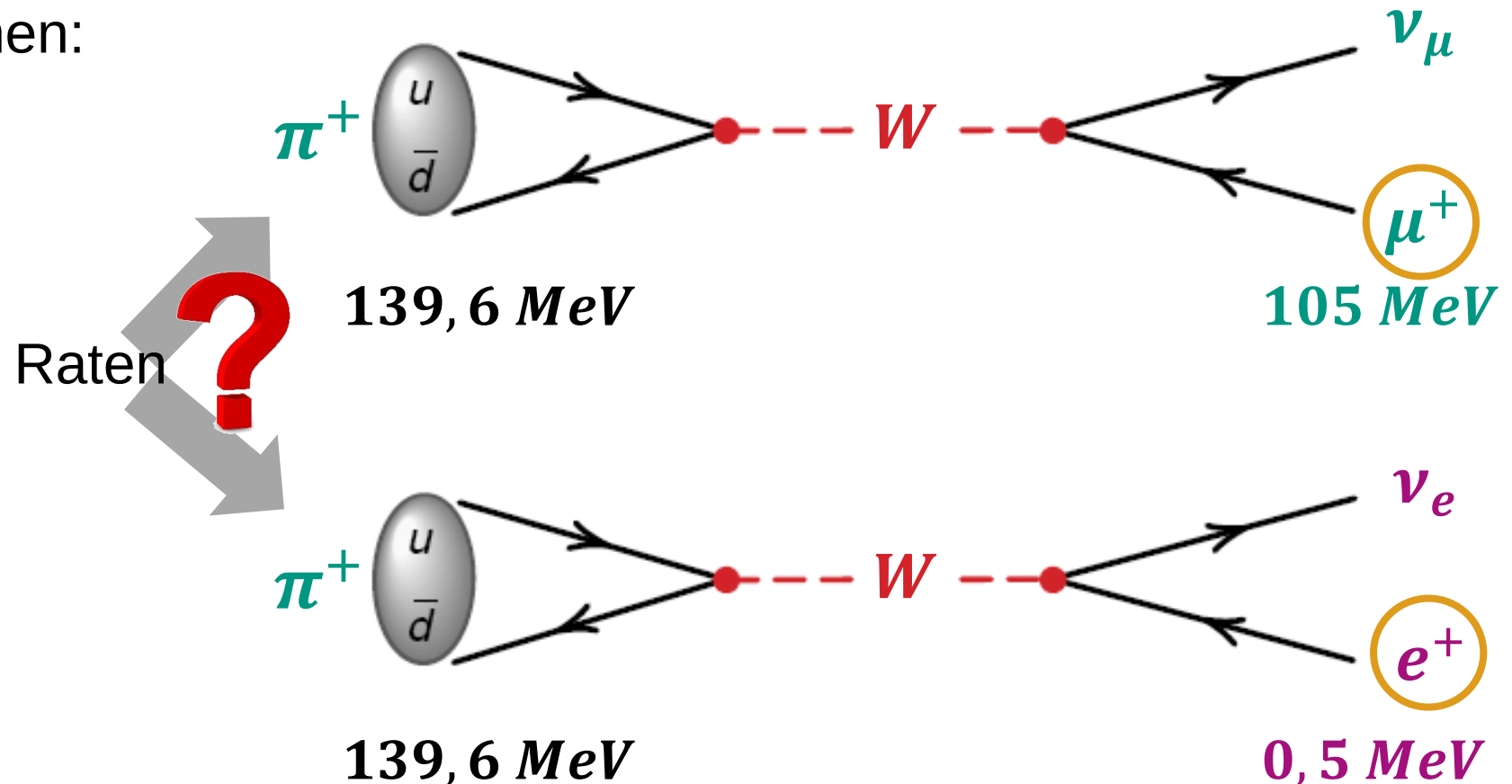
Leptonen (e^- , μ^-)

$$\text{Helizität } h = -v/c$$

Antileptonen (e^+ , μ^+)

$$\text{Helizität } h = +v/c$$

- Raten in μ^+ bzw. e^+ ?



Q: LANL, American IoP

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

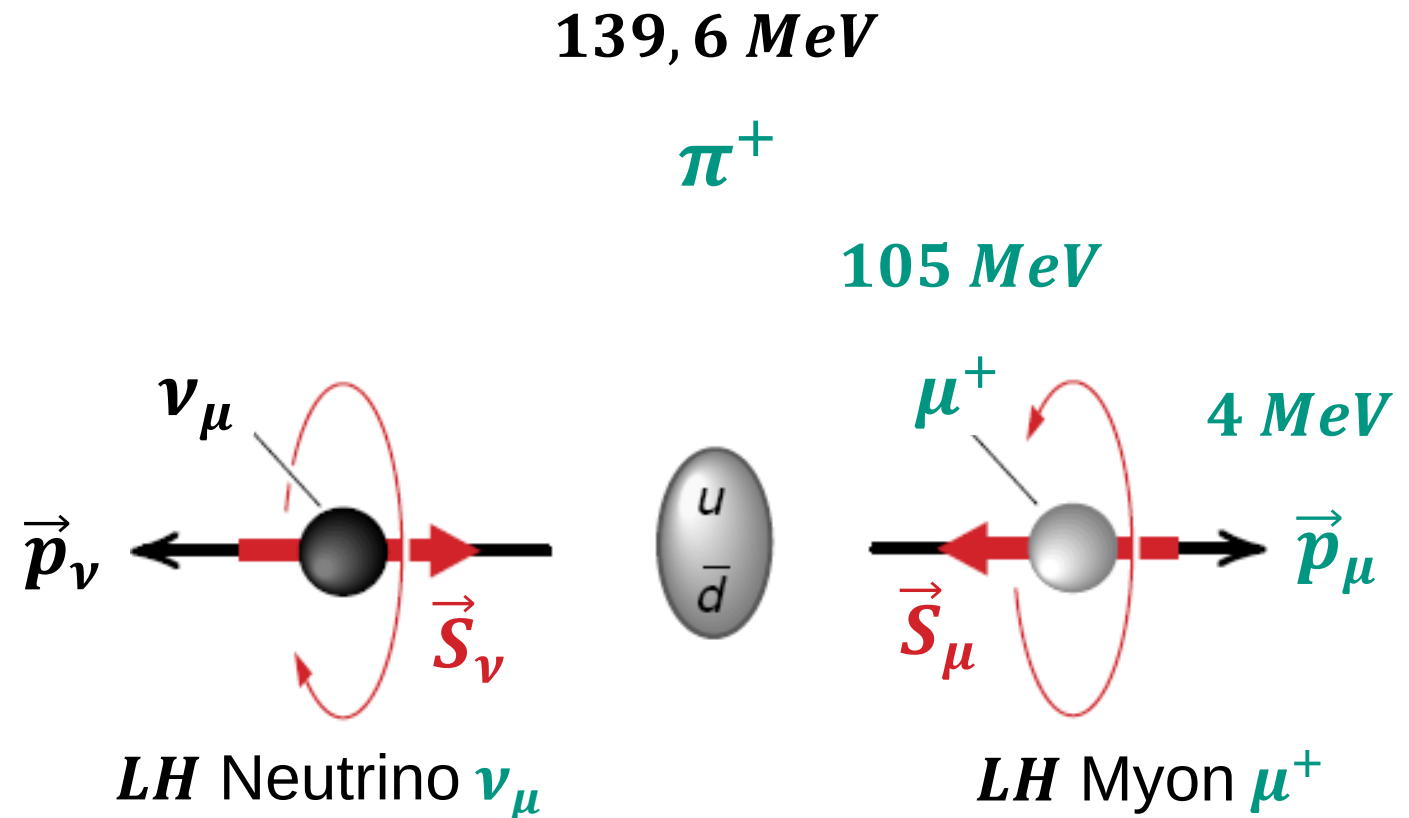
■ Ausgangszustand $J^P = 0^-$, im π^+ – Ruhesystem gilt : $\Sigma \vec{p}_i = 0$ $\Sigma \vec{S}_i = 0$

- 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^+

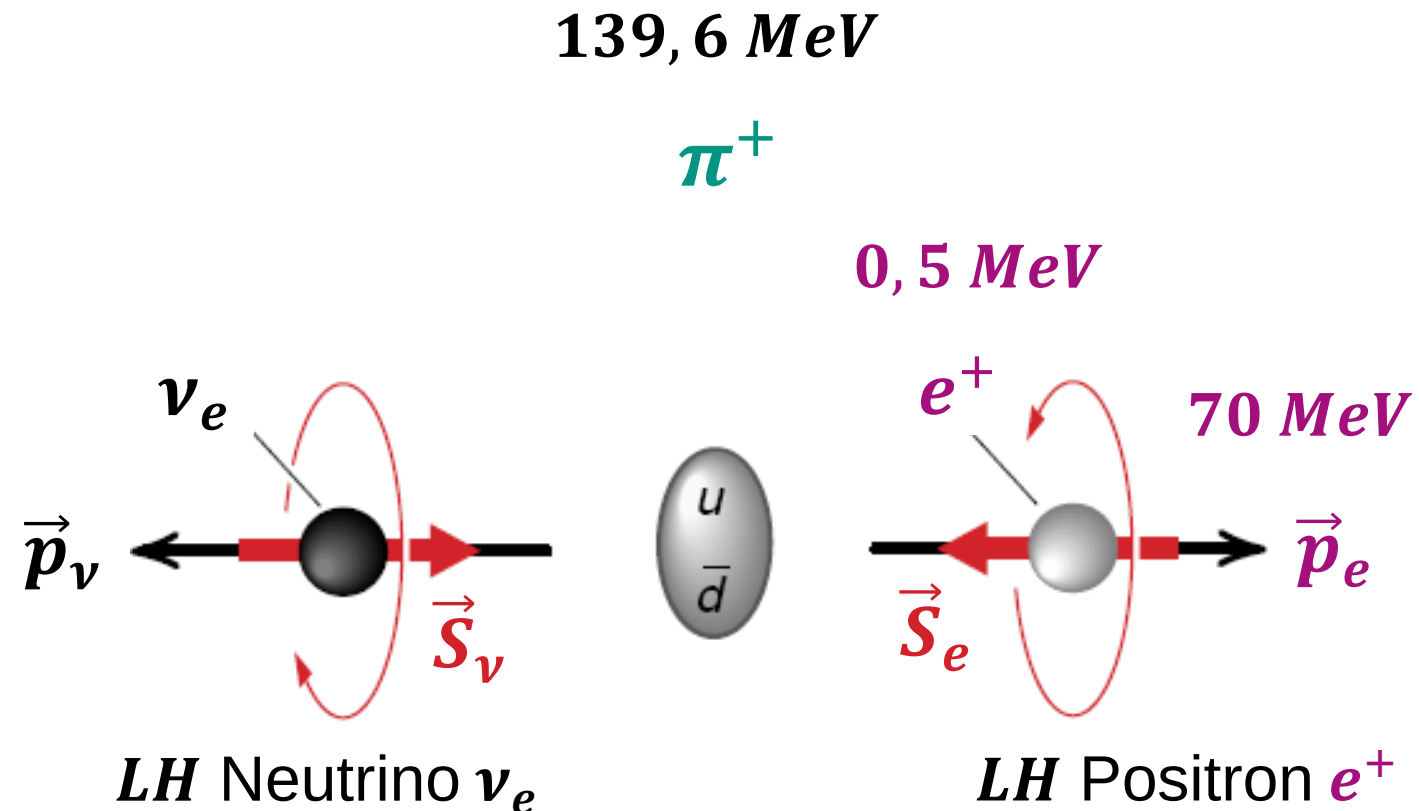
■ Ausgangszustand $J^P = 0^-$, im π^+ – Ruhesystem gilt : $\Sigma \vec{p}_i = 0$ $\Sigma \vec{S}_i = 0$

- 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



Paritätsverletzung beim Pion-Zerfall

- 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**

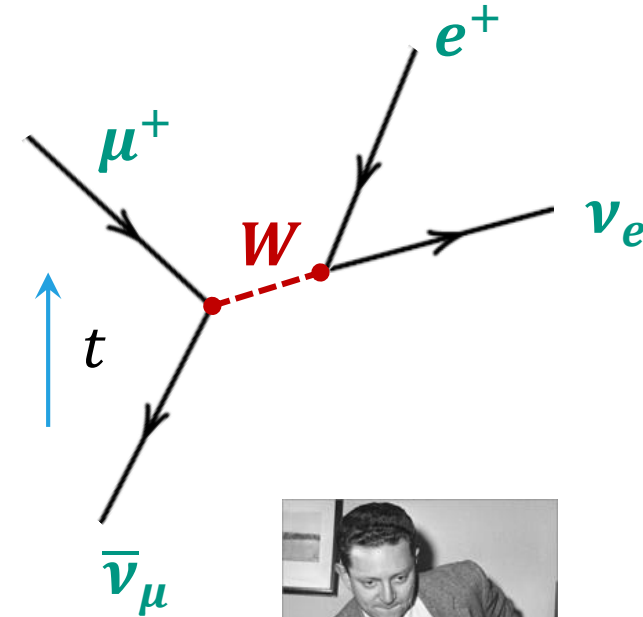
- gute Übereinstimmung von Theorie & Experiment

- **Neutrinos ausschließlich LH , Antineutrinos ausschließlich RH**

Paritätsverletzung, nachgefragt von Leon

■ 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



李政道

杨振宁

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



Herwig Schopper* & Team

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

...

März 1957

*erster Leiter des *ETP* in Karlsruhe
später: *CERN* Generaldirektor

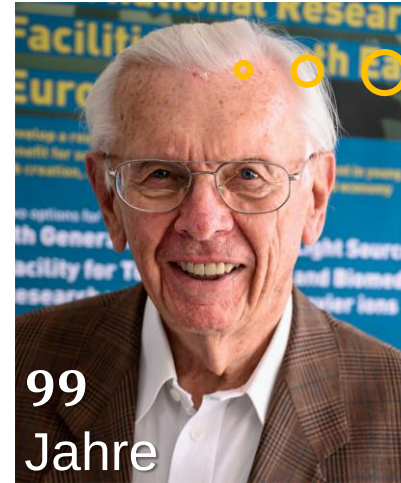


Institut für Experimentelle Teilchenphysik



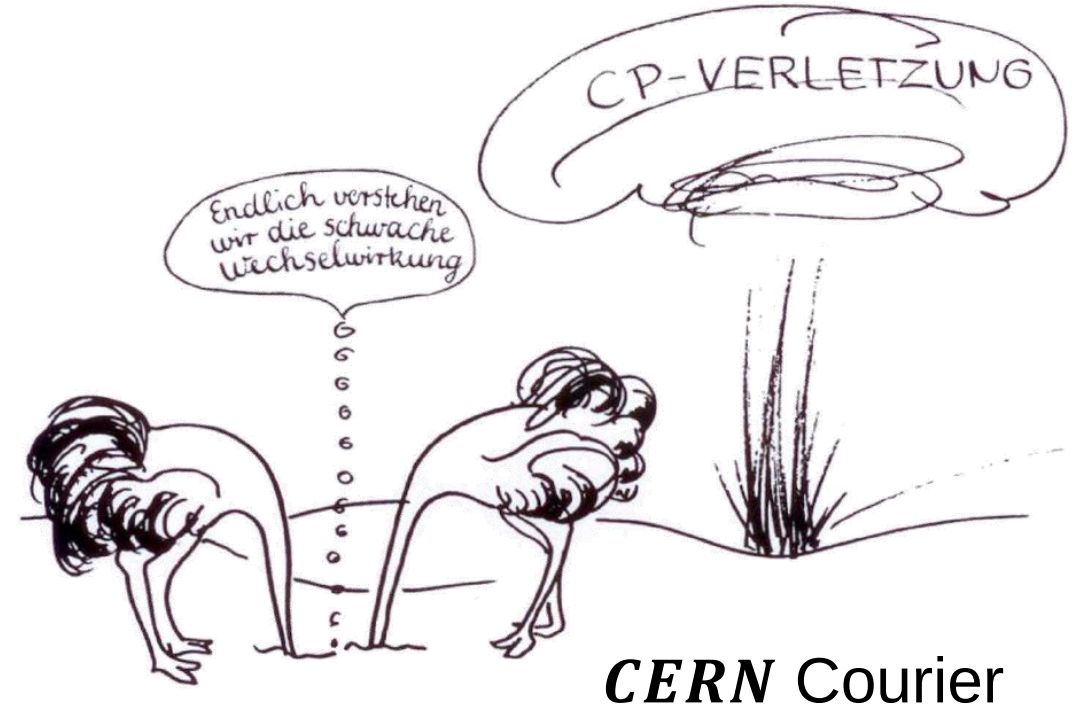
Paritätsverletzung: Zirkularpolarisation Gammas

■ Team '23: Test der Paritäts-Verletzung über zirkular polarisierte Gammas



- 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*

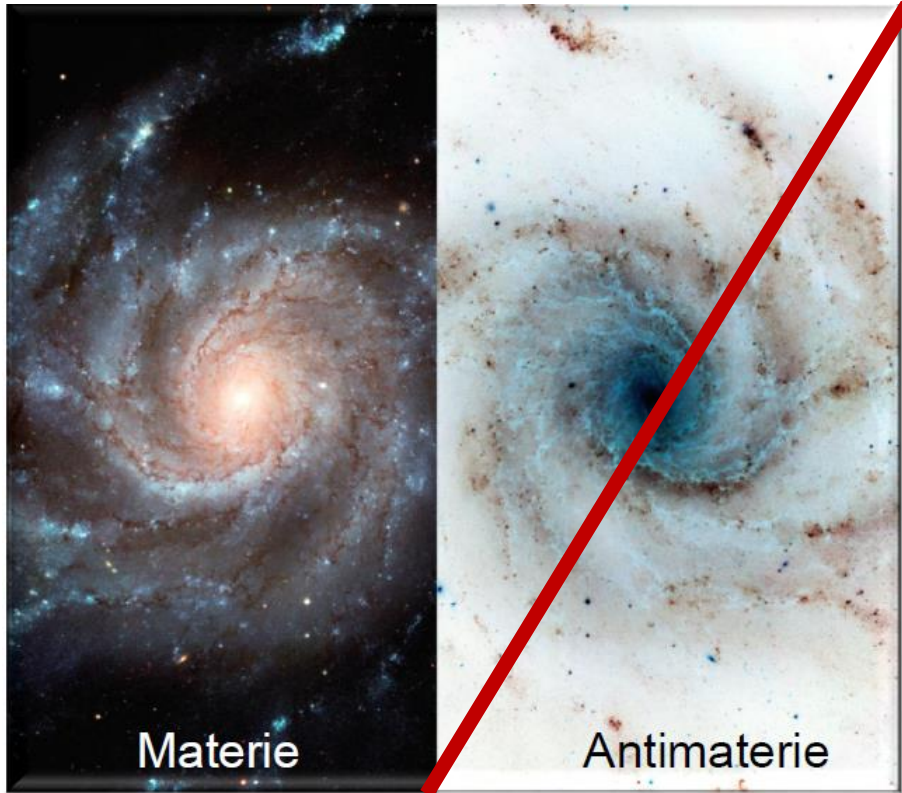


***CP* – VERLETZUNG: SELTSAME KAONEN**

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

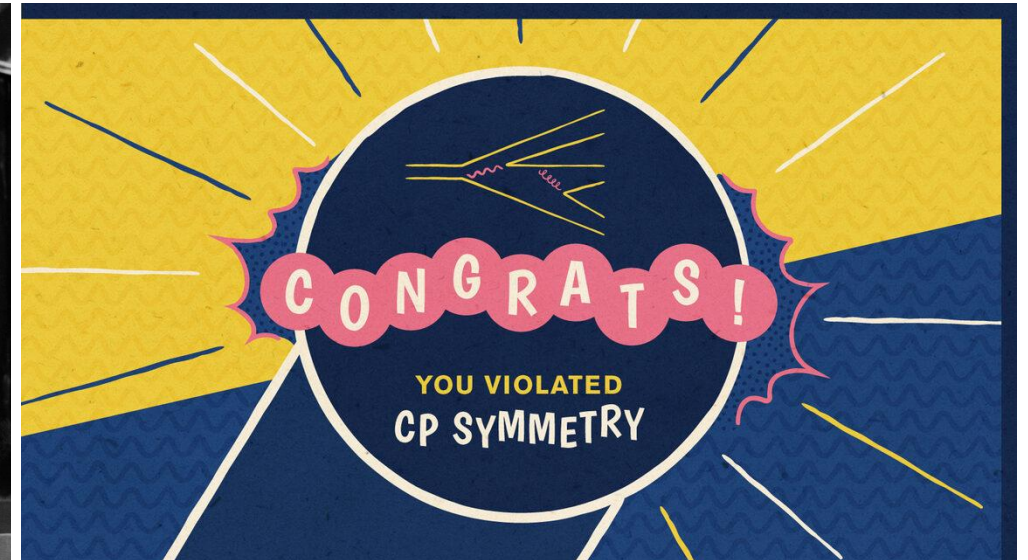
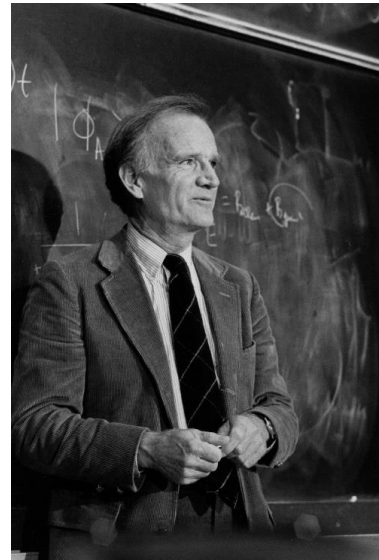
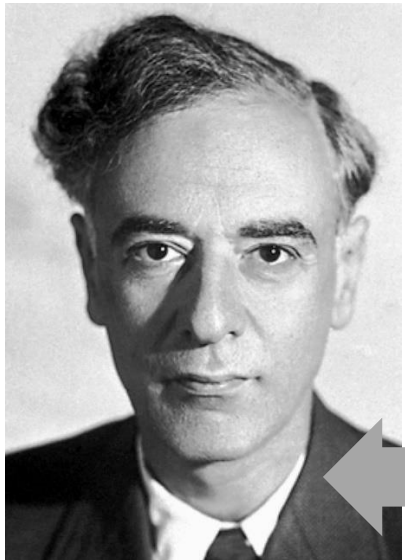
Andrej Dmitrijewisch Sacharov (1921-1989)

1967: **Baryon-Asymmetrie**

Landau: CP – eine Symmetrie der Natur?

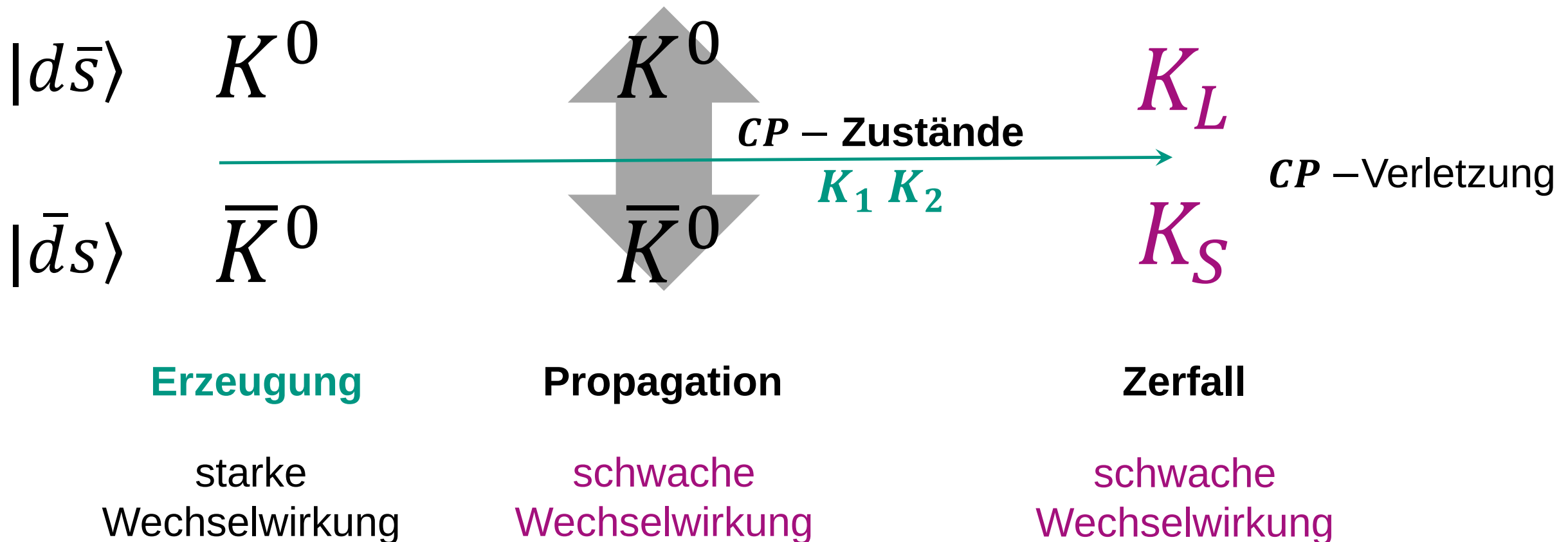
■ *Lev Landau* postuliert zunächst, dass die CP – Symmetrie erhalten ist!

- *Landau*: Physik invariant, wenn Kombination von P – Operation (Spiegelbild) & Ladungskonjugation C (Teilchen-Antiteilchen) erfolgt: CP – Symmetrie
- *Cronin & 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.**



Neutrale Kaonen: Grundlagen

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

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

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

Teilchen Antiteilchen

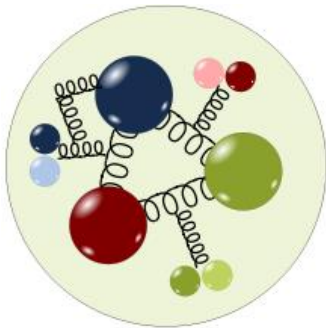
- Masse: $497,6 \text{ MeV}$, instabile Zustände mit Lebensdauern
 $\tau: \sim 10^{-10} \text{ s} (K_S)$, $\tau: \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ s} (K_L)$
- Erzeugung über starke Wechselwirkung (Erhaltung der Strangeness)
- Zerfall über schwache Wechselwirkung (Verletzung der Strangeness)

Neutrale Kaonen: Erzeugung

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

- Beispiel: Wechselwirkung eines energetischen Pions mit Proton

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$$



$$|uds\rangle$$

Strangeness $S = -1$

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

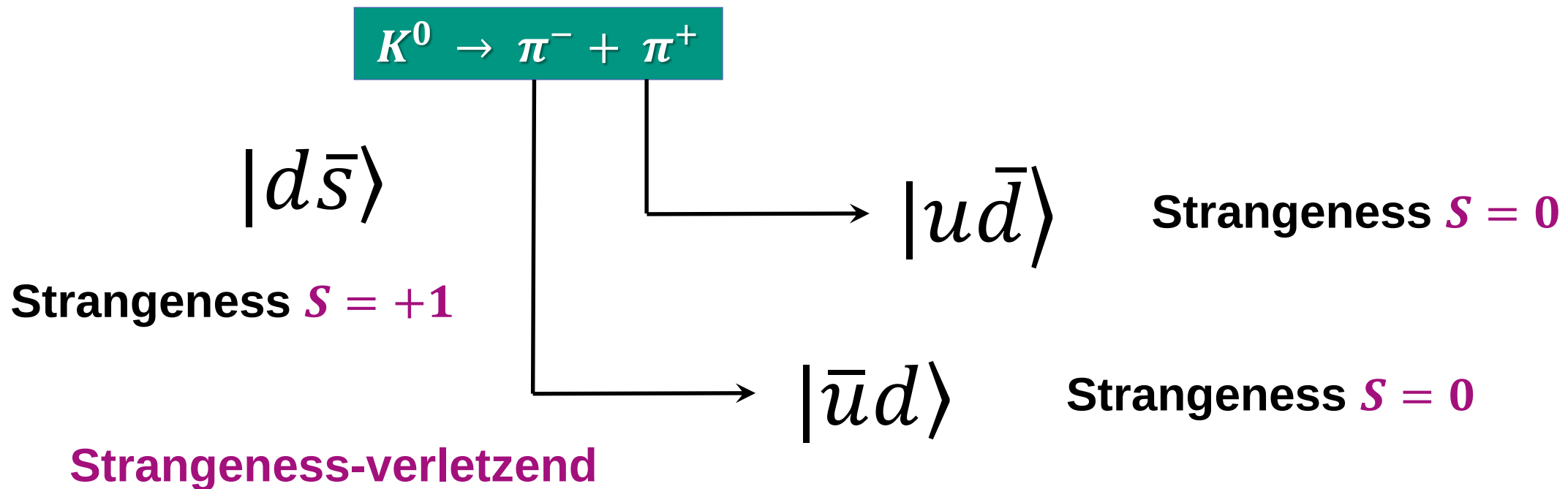
Strangeness $S = +1$

Strangeness-erhaltend

Neutrale Kaonen: Zerfall

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

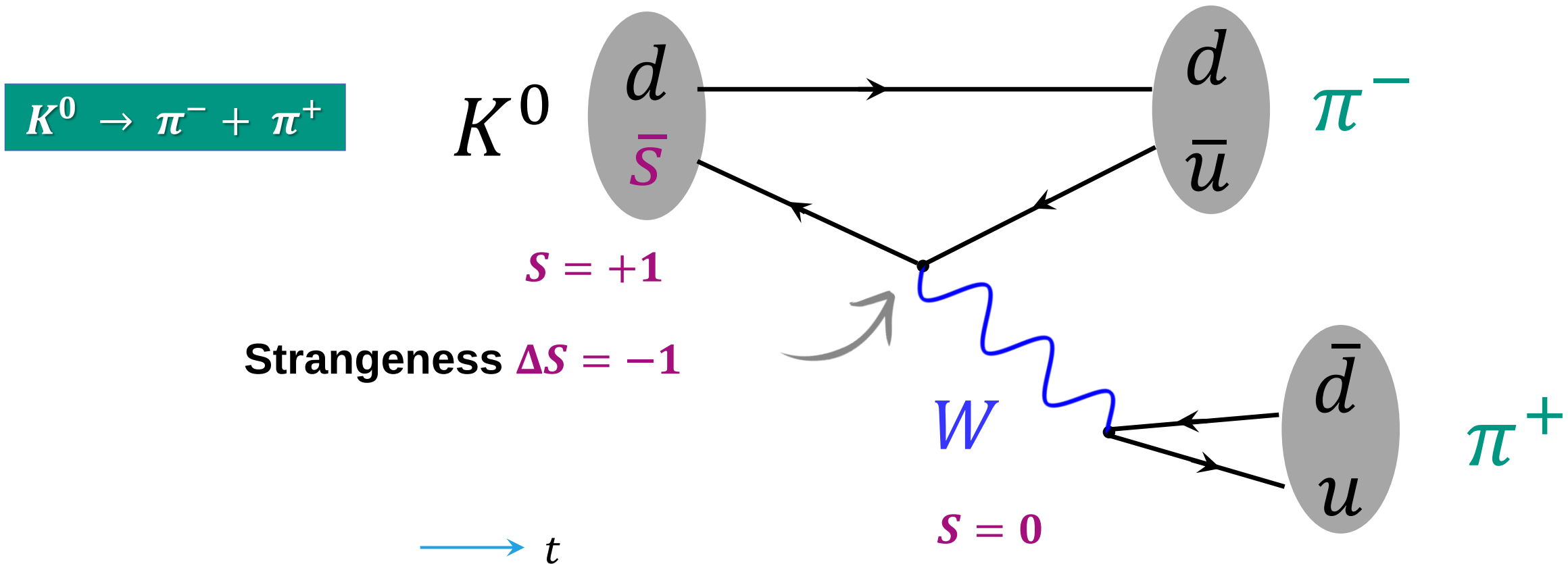
- Beispiel: **Zerfall** eines Kaons in 2 Pionen



Neutrale Kaonen: Zerfall

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

- Beispiel: **Zerfall** eines Kaons in 2 Pionen



Neutrale Kaonen: Zerfallseigenschaften

- 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 **CP – Symmetrie im System neutraler Kaonen** erhalten?

Neutrale Kaonen: Mesonen mit Strangeness

■ Neutrale Kaonen und P , C und CP – Eigenwerte

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

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

- 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

Neutrale Kaonen: CP –Eigenzustände

■ (zunächst rein) formale Definition von CP –Eigenzuständen K_1 & K_2

- bilde **Linearkombinationen** K_1 & K_2 mit definierten CP – **Eigenwerten**

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$$

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

Mischung
von K^0 & $\bar{K}^0$

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

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

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

Eigenwerte
= **+1, -1**

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

Neutrale Kaonen: starke & CP – Eigenzustände

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

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

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

- 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 K^0 und $\bar{K}^0$

⇒ neue Zustände mit unterschiedlicher $\left\{ \begin{array}{l} \text{Masse} \\ \text{Lebensdauer} \end{array} \right.$