

Moderne Experimentalphysik II

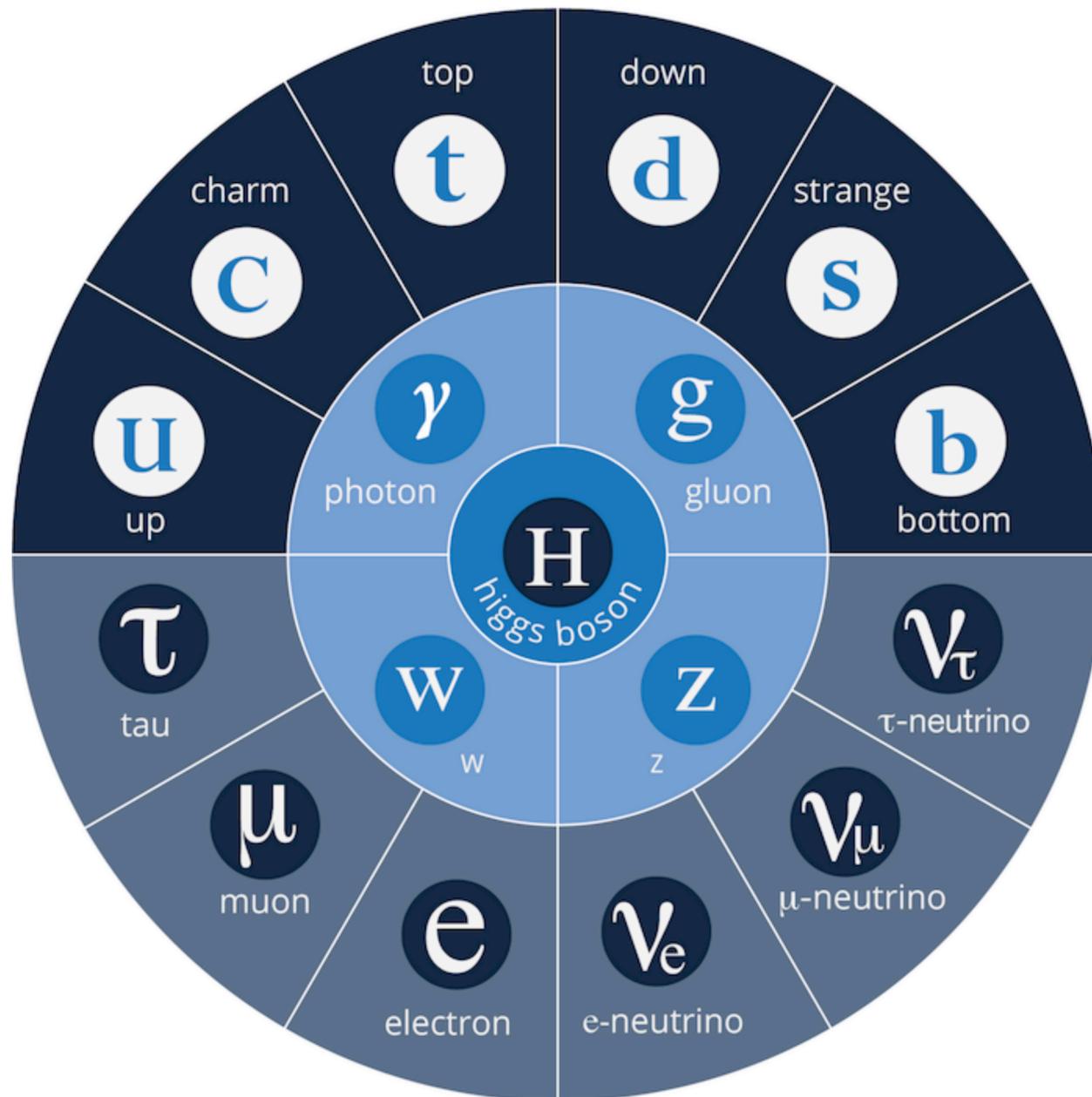
Teilchenphysik - Vorlesung 07

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



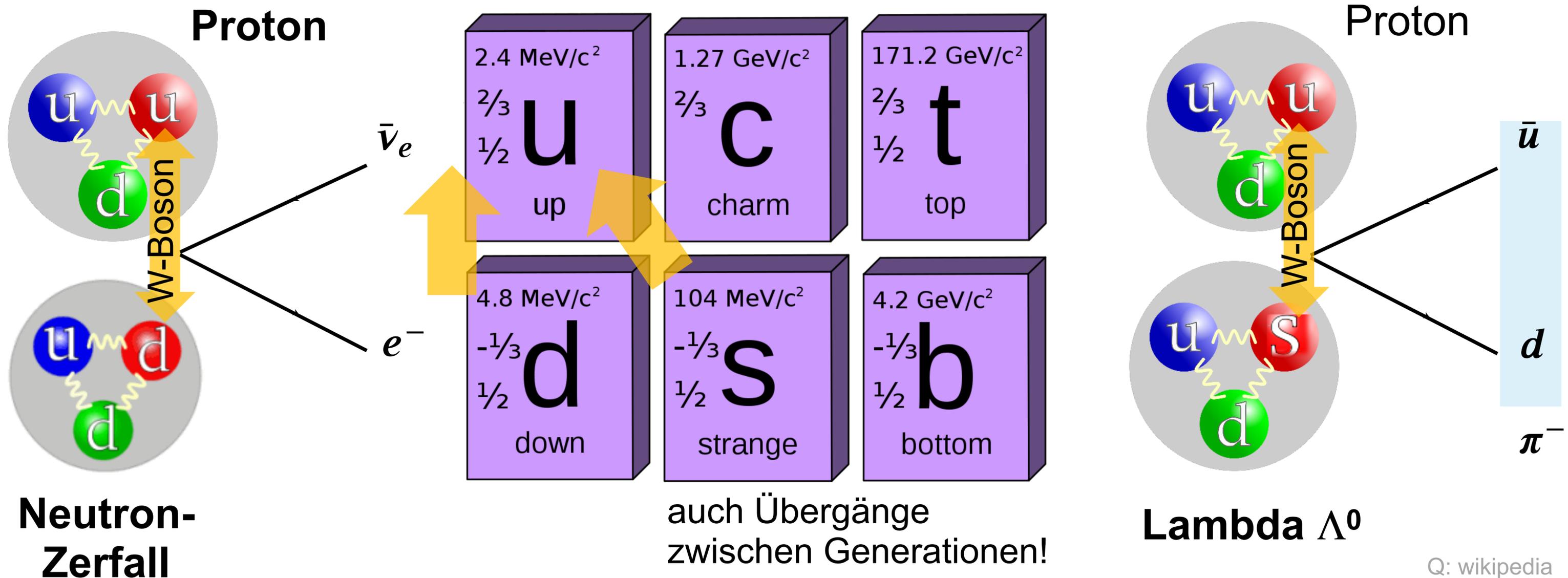
■ 4. Symmetrien und Erhaltungssätze

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



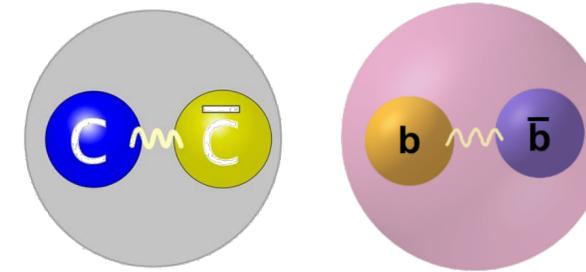
RECAP: Flavour als Quantenzahl: u, d, c, s, t, b

- **Flavourquantenzahlen** der Quarks: schwache Wechselwirkung ändert die Quark-Flavours (\Leftrightarrow gebrochene Flavour-Symmetrie)!



Q: wikipedia

RECAP: Nachweis der Quarkflavours



Erzeugung der Quarkflavours an Collidern

- **niedrige Energien:**

2.4 MeV/c ²
$\frac{2}{3}$
u
up

4.8 MeV/c ²
$-\frac{1}{3}$
d
down

104 MeV/c ²
$-\frac{1}{3}$
s
strange

leichte Quarks manifestieren sich in **Mesonen**, Baryonen
- **mittlere Energien:**

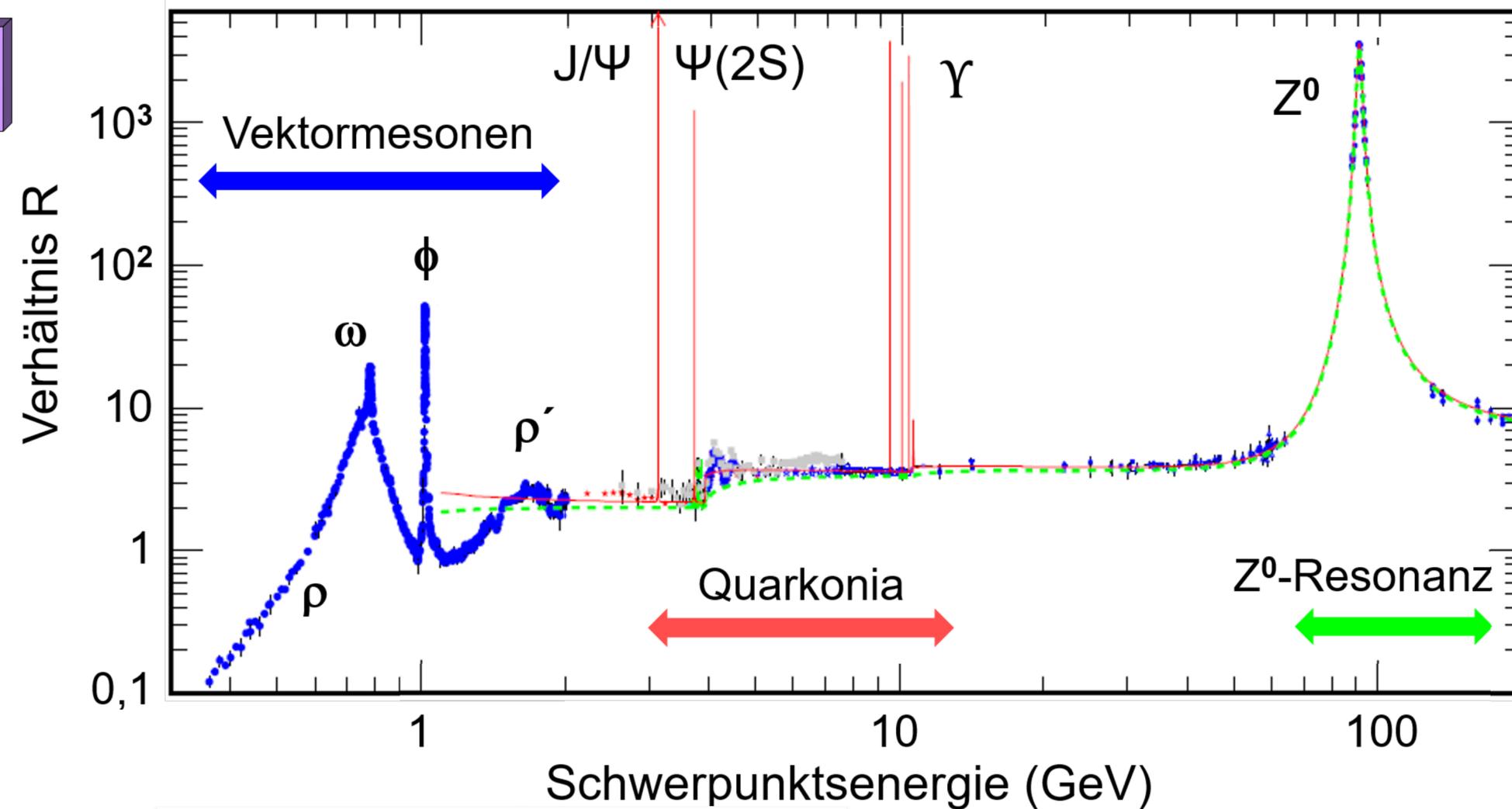
1.27 GeV/c ²
$\frac{2}{3}$
c
charm

4.2 GeV/c ²
$-\frac{1}{3}$
b
bottom

Quarkonia **J/ψ**, **γ** und Anregungen – gebundene Zustände
- **hohe Energien:**

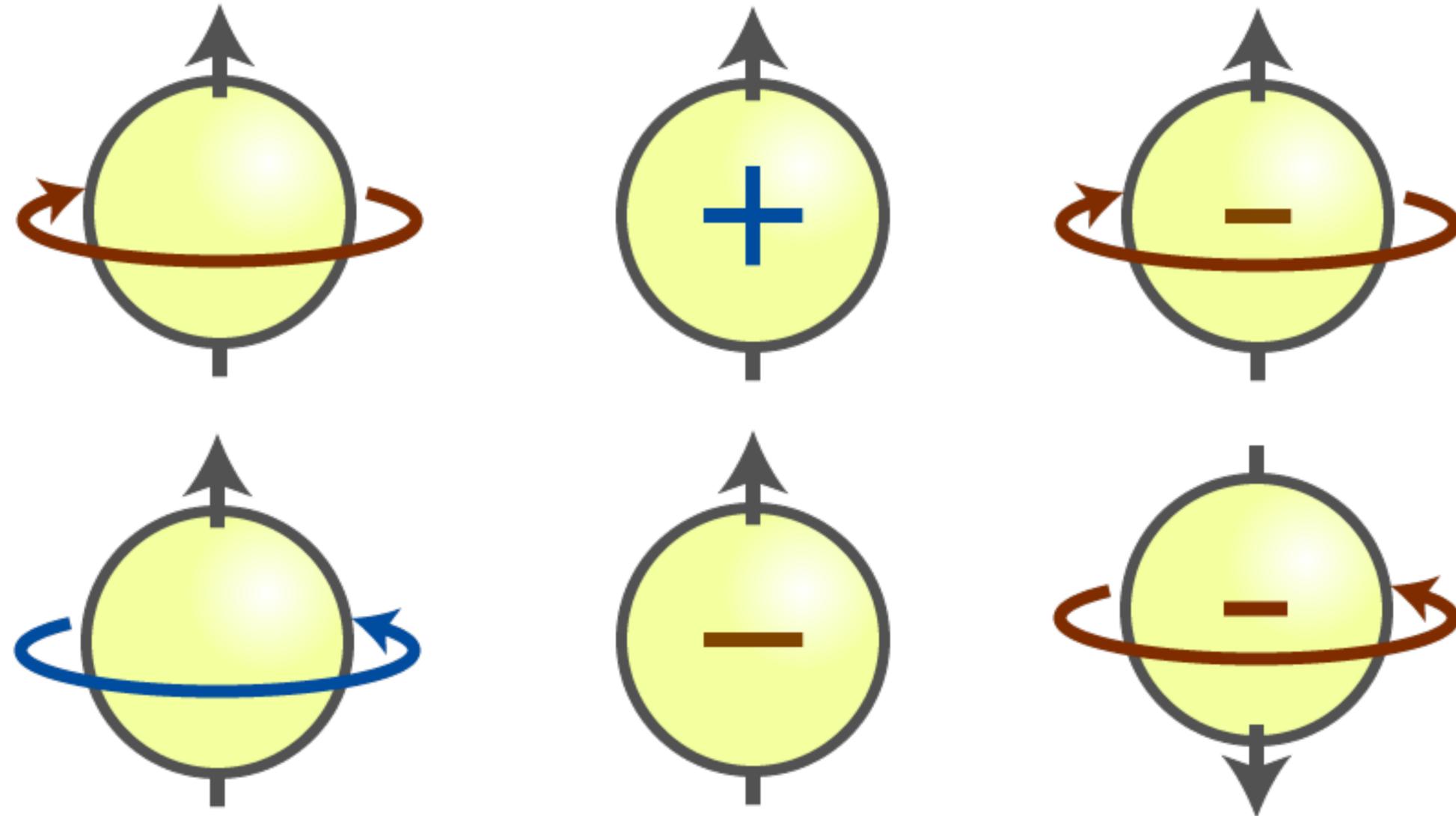
171.2 GeV/c ²
$\frac{2}{3}$
t
top

top/anti-top Produktion, keine gebundenen Zustände



$$R = \frac{\sigma^{(0)}(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

$$R = 3 \sum_q e_q^2 / e^2$$



KAPITEL 4.2 DISKRETE SYMMETRIEN

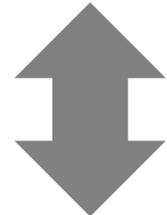
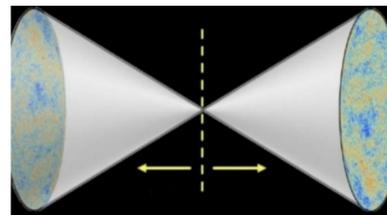
P, C, T

Diskrete Symmetrien P , C , und T in der Natur

- diskrete, nicht-kontinuierliche Symmetrien P , C , T

CPT -Theorem:

CPT die einzig mögliche Kombination von P , C , T die eine **exakte Symmetrie** in der Natur darstellt!



Spin-Statistik-Theorem:
Fermionen & Bosonen



W. Pauli



- diskrete, nicht-kontinuierliche Symmetrien P, C, T :

⇒ **multiplikative Quantenzahlen**

- **Paritätsoperation** P : Punktspiegelung am Ursprung $\vec{r} \Leftrightarrow -\vec{r}$

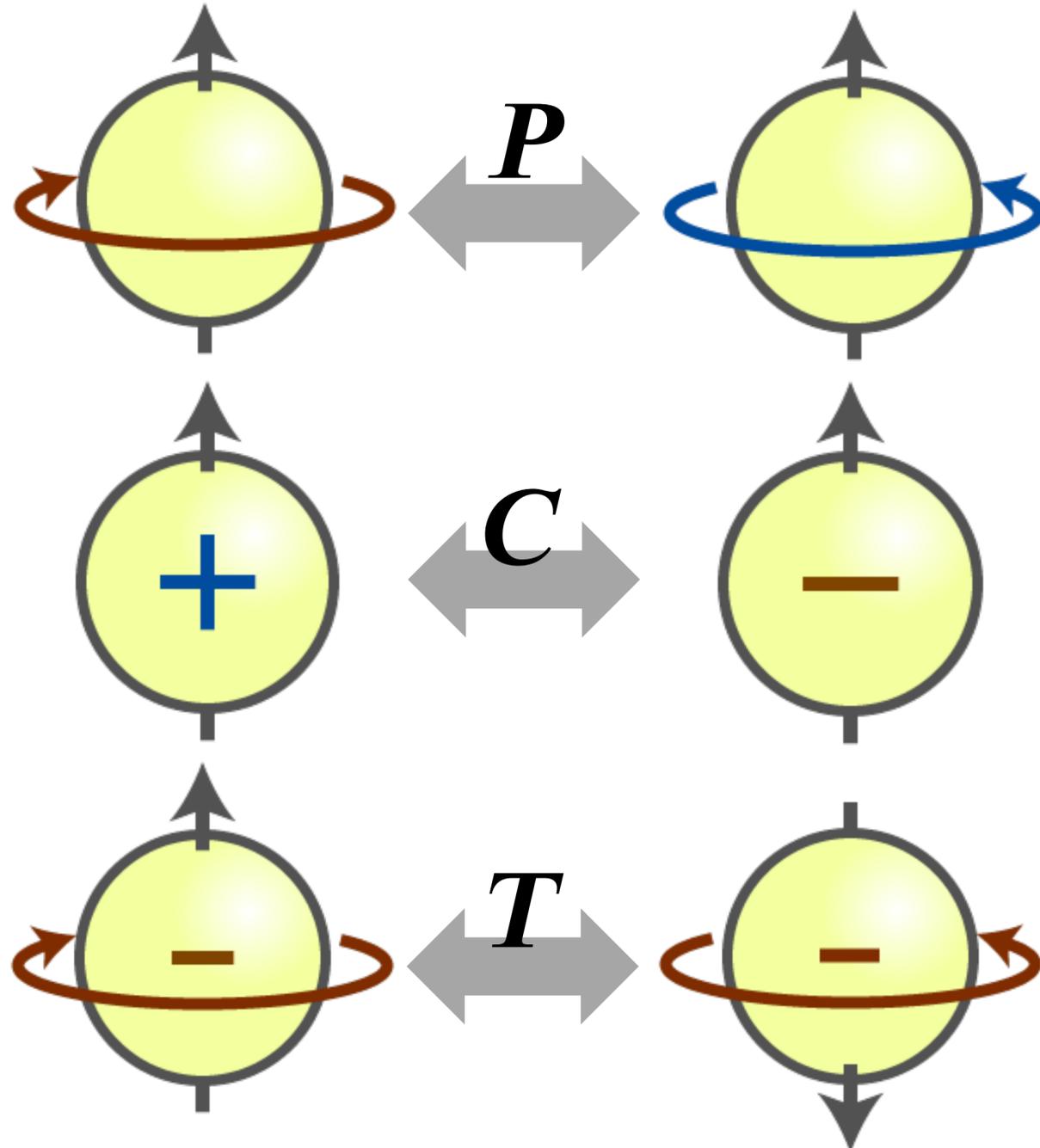
- **Ladungskonjugation** C : Umwandlung **Teilchen** \Leftrightarrow **Antiteilchen**

- **Zeitumkehroperator** T : Zeitspiegelung **Zeitachse** $+t \Leftrightarrow$ **Zeitachse** $-t$

Symmetrieoperation	unbeobachtbare Größe	Erhaltungsgröße
Raumspiegelung	absolute Händigkeit	Parität
Materie - Antimaterie	Materieart	Ladungspartität
Zeitumkehr	absolute Zeitrichtung	Zeitparität

Standardmodell: Symmetrien P , C , und T

- diskrete, nicht-kontinuierliche Symmetrien P , C , T



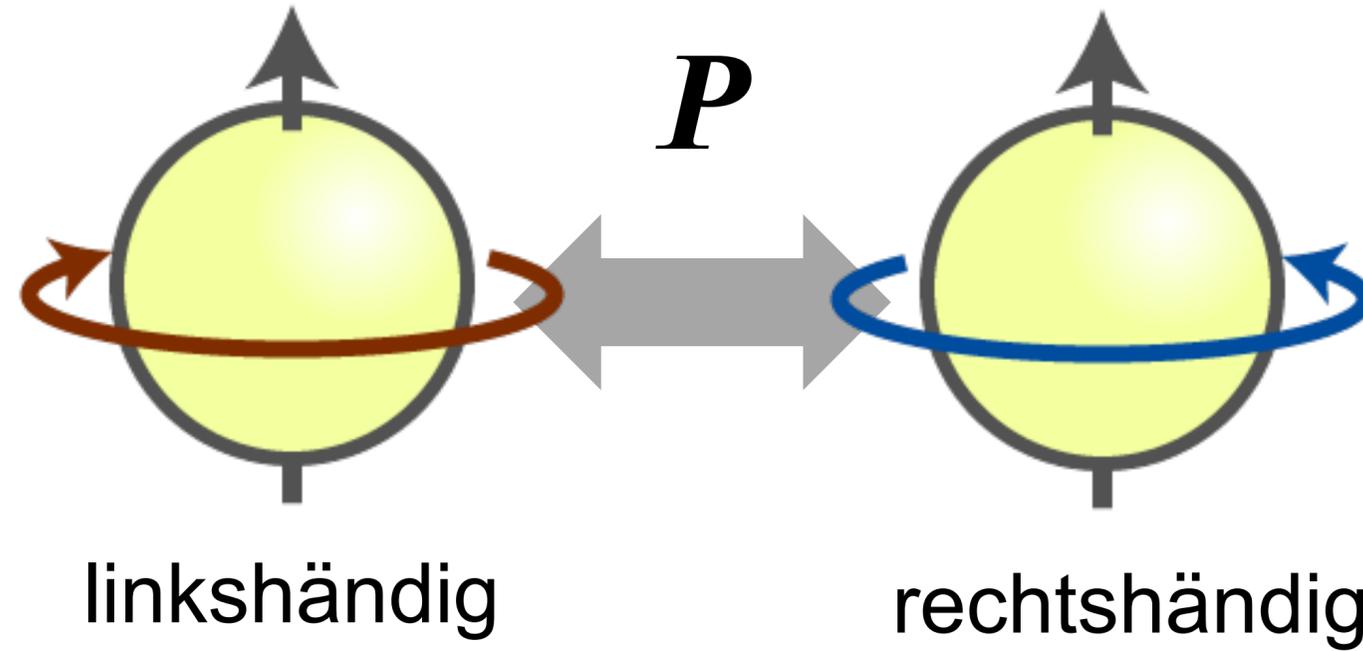
Parität P : physikal. Prozesse unverändert bei **Punktspiegelung** am Ursprung ($\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$)
→ Unterscheidung der **Händigkeit**

Ladungskonjugation C : physikal. Prozesse unverändert bei **umgekehrtem Ladungsvorzeichen** → Unterscheidung **(Anti-)Teilchen**

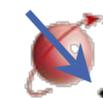
Zeitumkehr T : physikal. Prozesse unverändert, wenn Zeit rückwärts abläuft ($+t \rightarrow -t$)
→ Unterscheidung der **Bewegungsrichtung**

Parität P

■ Paritätsoperation P



linkshändiges e^-

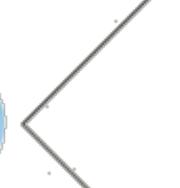


Spiegel

Proton



rechtshändiges e^-



©nature

Parität P & Spiegelbild

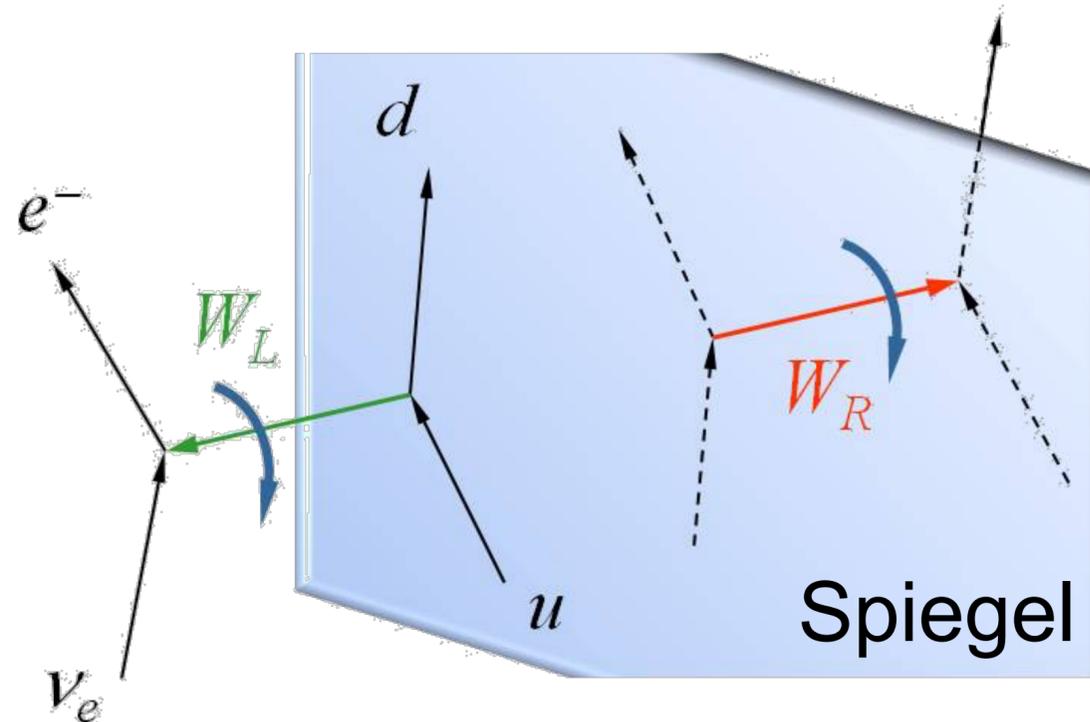
- Paritätsoperation P : räumliche Spiegelung am Ursprung

rechtshändiges Koordinatensystem \rightarrow
linkshändiges Koordinatensystem

$$P = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- Paritätsoperation P : oft Darstellung als Spiegelbild

OK, wenn nur *eine* räumliche Koordinate relevant ist



Feynman-Diagramm:
Bild und Spiegelbild

Recap: Parität P & polare Vektoren

- Paritätsoperation P : räumliche Spiegelung am Ursprung

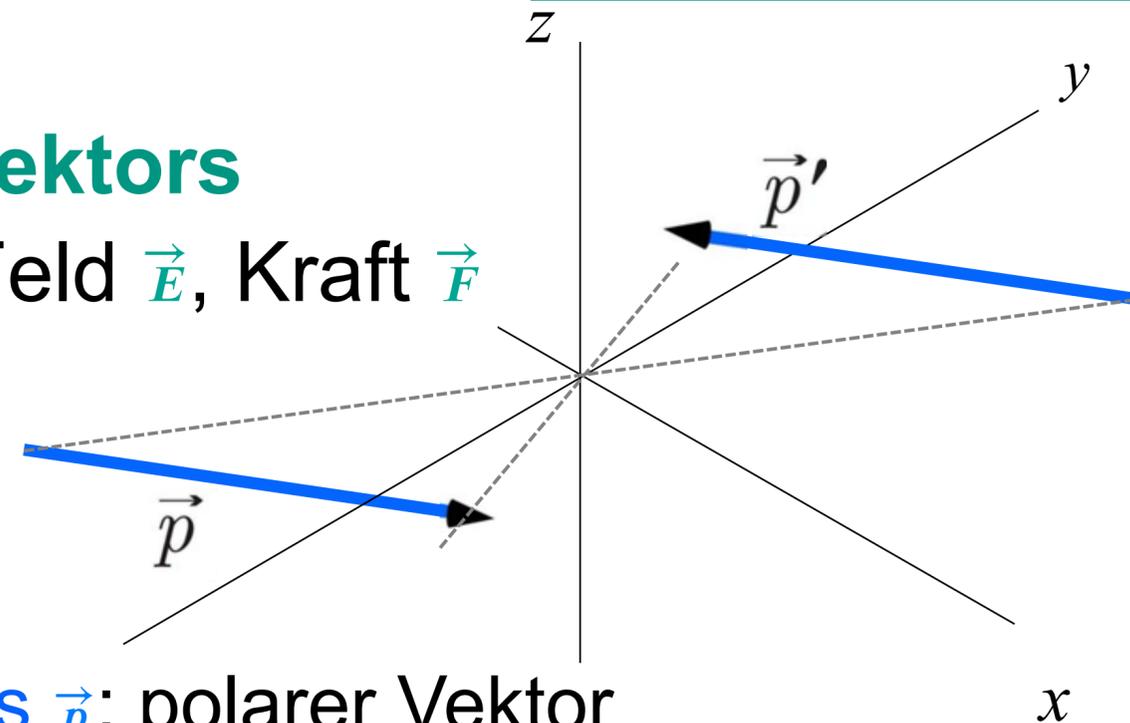
rechtshändiges Koordinatensystem \rightarrow
linkshändiges Koordinatensystem

$$P = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

- geändertes Vorzeichen eines **polaren Vektors**

Beispiele: Ort \vec{r} , Impuls \vec{p} , elektrisches Feld \vec{E} , Kraft \vec{F}

$$\vec{r} \xrightarrow{P} -\vec{r} \quad \vec{p} \xrightarrow{P} -\vec{p}$$



Impuls \vec{p} : polarer Vektor

Recap: Parität bei axialen Vektoren

- Paritätsoperation P – Auswirkung auf Spin, Drehimpuls

- **axialer Vektor:**

nicht geändertes Vorzeichen des (Pseudo-) Vektors nach Paritätsoperation

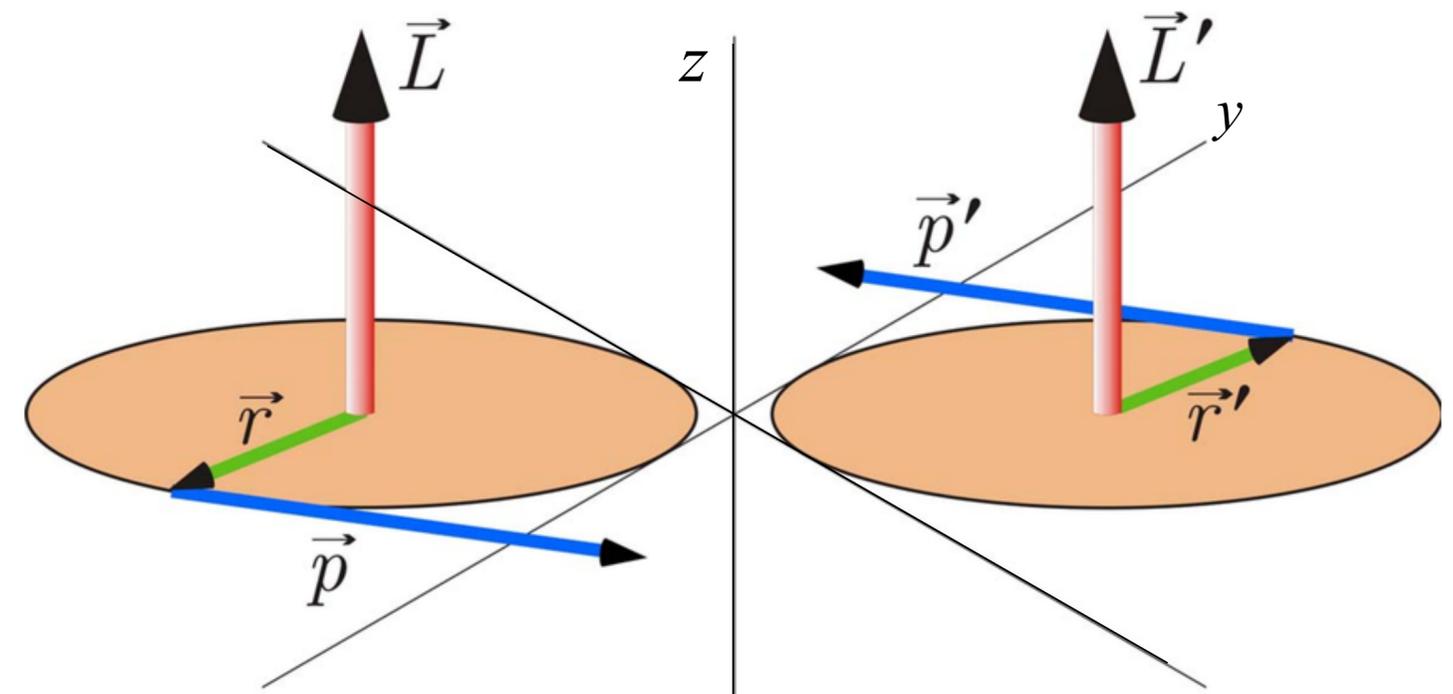
- Drehimpulse: Spin \vec{s} , Drehimpuls \vec{L}

- Magnetfeld \vec{B}

$$\vec{J} \xrightarrow{P} \vec{J}$$

Q: F. Grossmann, TU Dresden

Drehimpuls \vec{L} : axialer Vektor



Impuls \vec{p} : polarer Vektor

■ Konvention des Eigenwerts der Parität bei Fermionen

- **Fermionen:** Teilchen & Antiteilchen mit entgegengesetzter Parität

- **Teilchen:** $P(e^-, \mu^-, u, d, \dots) = +1$

Leptonen: $P(e^-) = +1$ $P(\mu^-) = +1$ $P(\tau^-) = +1$

Quarks: $P(q) = +1$

Baryonen: Proton, Neutron, Lambda Λ : $P = +1$

- **Antiteilchen:** $P(e^+, \mu^+, \bar{u}, \bar{d}, \dots) = -1$

Antileptonen: $P(e^+) = -1$ $P(\mu^+) = -1$ $P(\tau^+) = -1$

Antiquarks: $P(\bar{q}) = -1$ Antibaryonen: $P(\bar{p}) = -1$

Eigenparität von Teilchen – Bosonen

- Eigenparität P von elementaren Bosonen (γ, H) & von Mesonen ($q\bar{q}$)

Photon: $P(\gamma) \equiv -1 \Rightarrow$ negative Eigenparität

Vektorboson mit Spin $S=1$ und $P=-1$

spektroskopische Notation: $J^P = 1^-$

Higgs: $P(H) = +1 \Rightarrow$ positive Eigenparität [Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$]

Mesonen: Teilchen & Antiteilchen mit gleicher Parität

Beispiel Pion: $P(\pi^+, \pi^-) = -1$

- Mesonen als gebundene $q\bar{q}$ Systeme: intrinsische Parität?

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

- ⇒ relativer Drehimpuls des $q\bar{q}$ Paaars

- 'Arten' von Mesonen: pseudoskalar bzw. vektoriell

- “pseudo-skalare“ Mesonen (π, η, K): $J^P = 0^-$

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

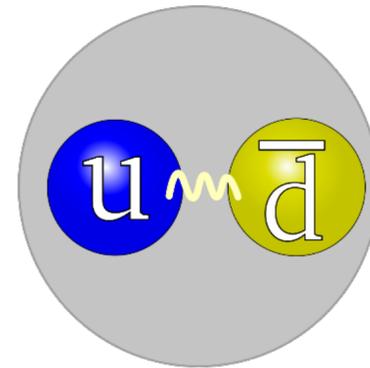
- “vektorielle“ Mesonen (ρ, ω, ϕ): $J^P = 1^-$

- Spin = 1 ($\uparrow\uparrow$), rel. $q\bar{q}$ Bahndrehimpuls $\ell = 0$

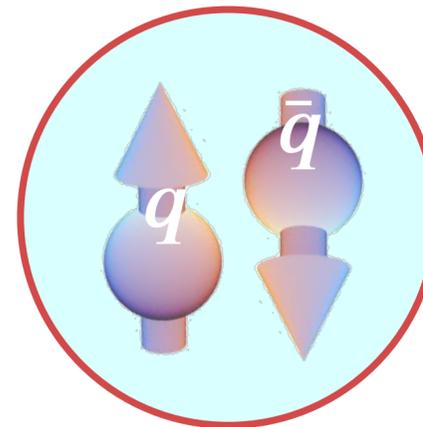
Eigenparität von Mesonen, nachgefragt

- wir machen uns vertraut mit Mesonen & ihrer Parität P

mein Name & meine Parität P ?



Pion π^+ $u\bar{d}$



Eigenschaften $J^P = 0^-$

pseudoskalar mit $\ell = 0$

$$P = - 1^{0+1} = - 1$$

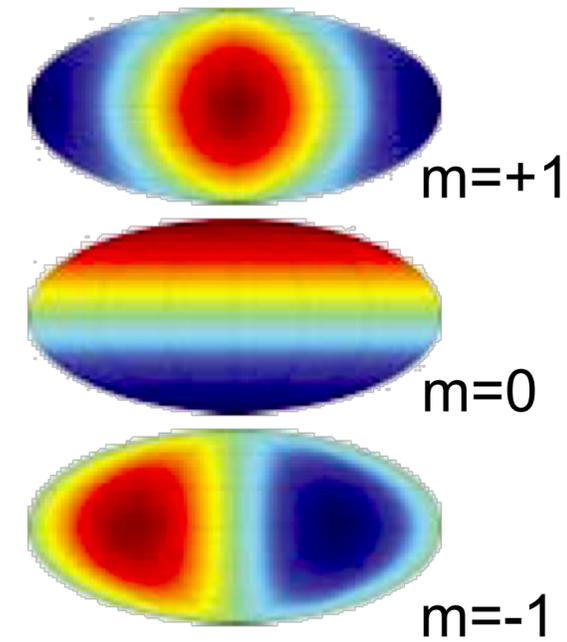
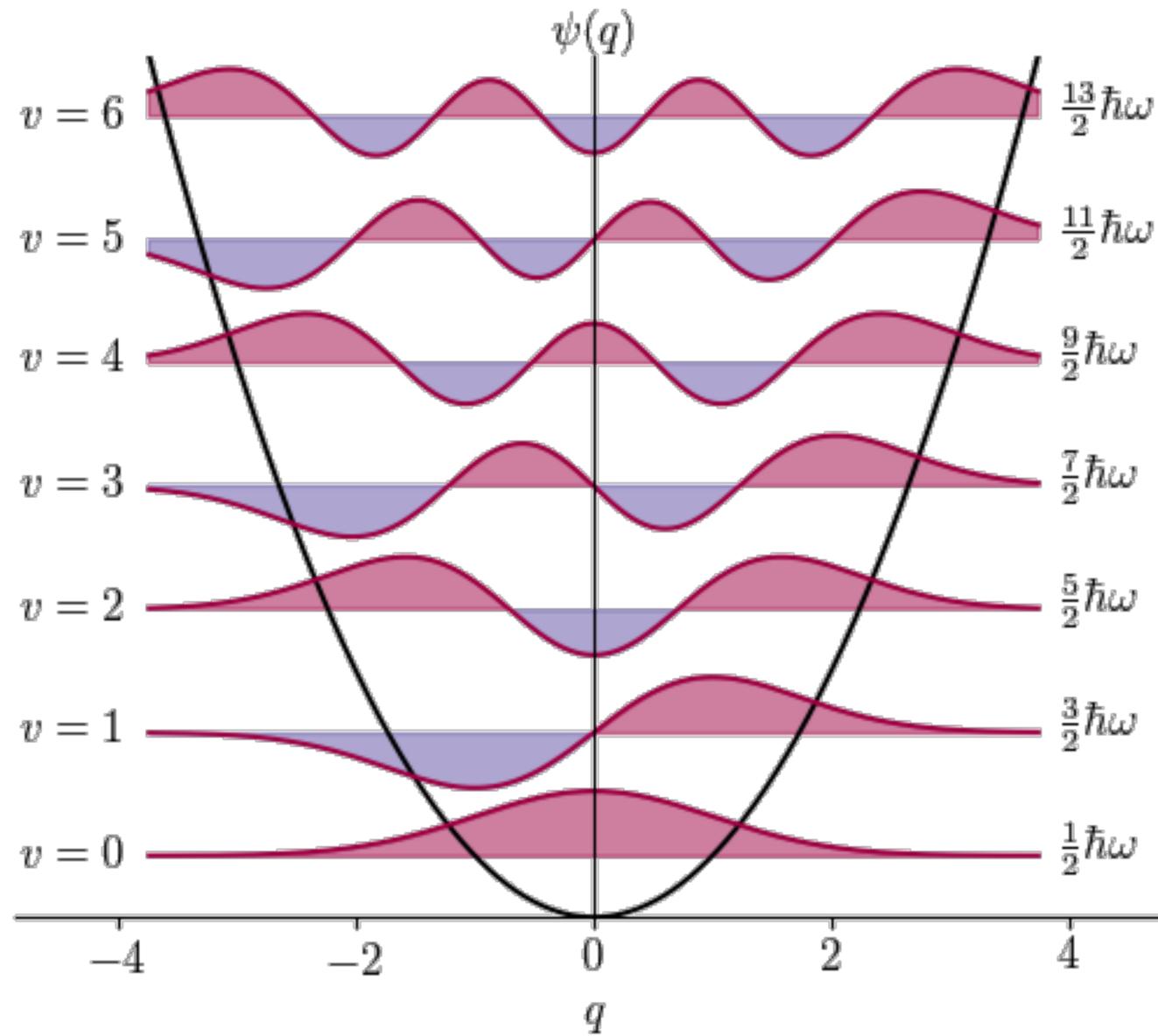
- **Gesamtparität P eines Systems von Teilchen: multiplikativer Charakter**

- ein System aus 2 wechselwirkenden Teilchen reagiert
via $a + b \rightarrow c + d$:

$$P_a \cdot P_b \cdot (-1)^\ell = P_c \cdot P_d \cdot (-1)^{\ell'}$$

ℓ, ℓ' : relative Bahndrehimpulse wichtig!

- falls eine Wechselwirkung paritätserhaltend ist, können Aussagen über die **relativen Bahndrehimpulse** getroffen werden...
(z.B. elektromagnetische Wechselwirkung, harmonischer Oszillator)



DIPOL

Q: scipython,

EINSCHUB/RECAP: PARITÄT VON GAMMAS & BEIM HARMONISCHEN OSZILLATOR

- **Parität** P einer Wellenfunktion

$$P \Psi(\vec{r}) = e^{i\varphi/2} \cdot \Psi(-\vec{r})$$

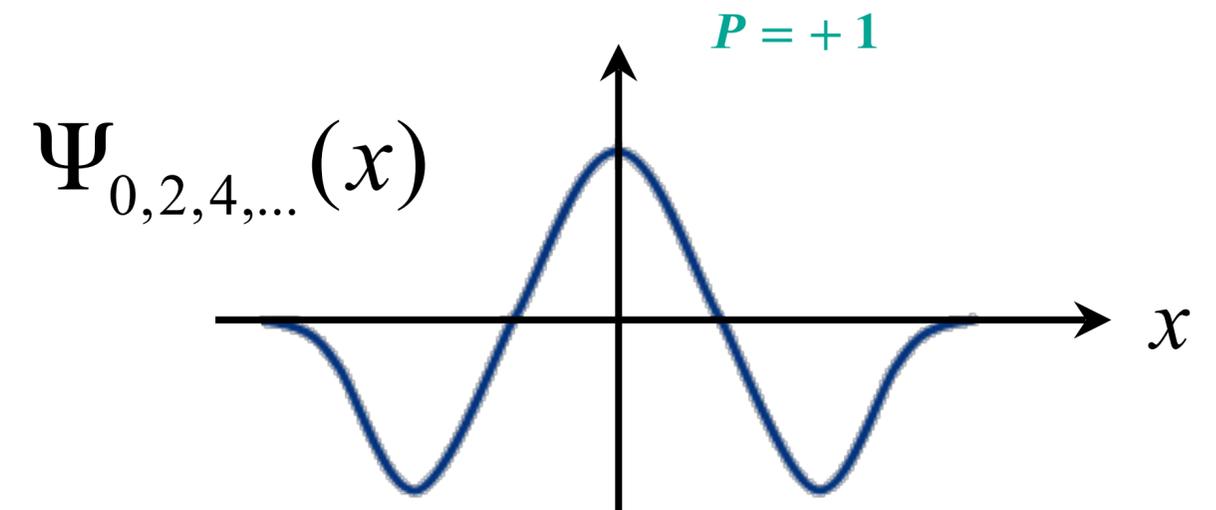
↑ unitärer Operator

$$P = \pm 1 \quad (\pm i)$$

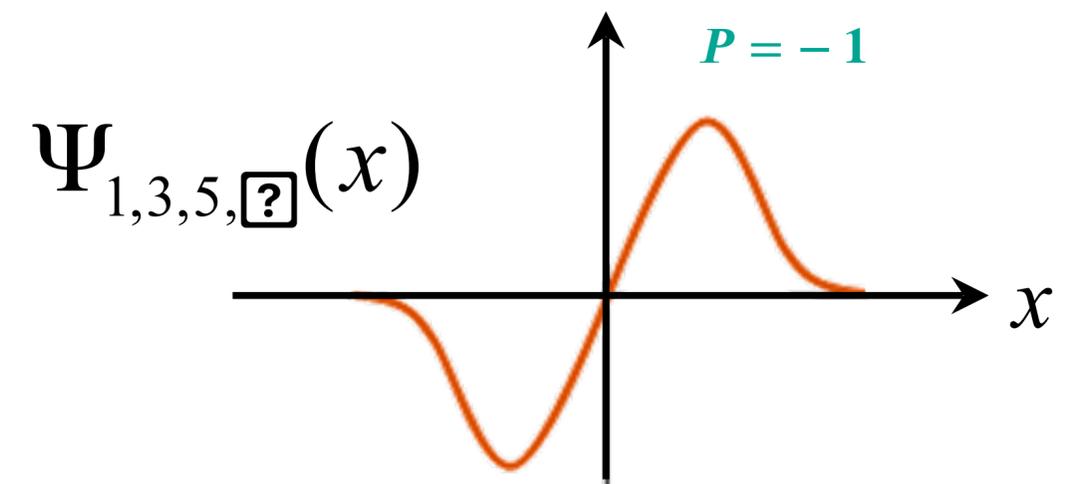
- symmetrisch: $P = +1$

- antisymmetrisch: $P = -1$

symmetrisch (gerade, **even**)



antisymmetrisch (ungerade, **odd**)



Parität in der QM: der harmonische Oszillator

- **Parität P = multiplikative Symmetrie**

P (Photon/Photonen)

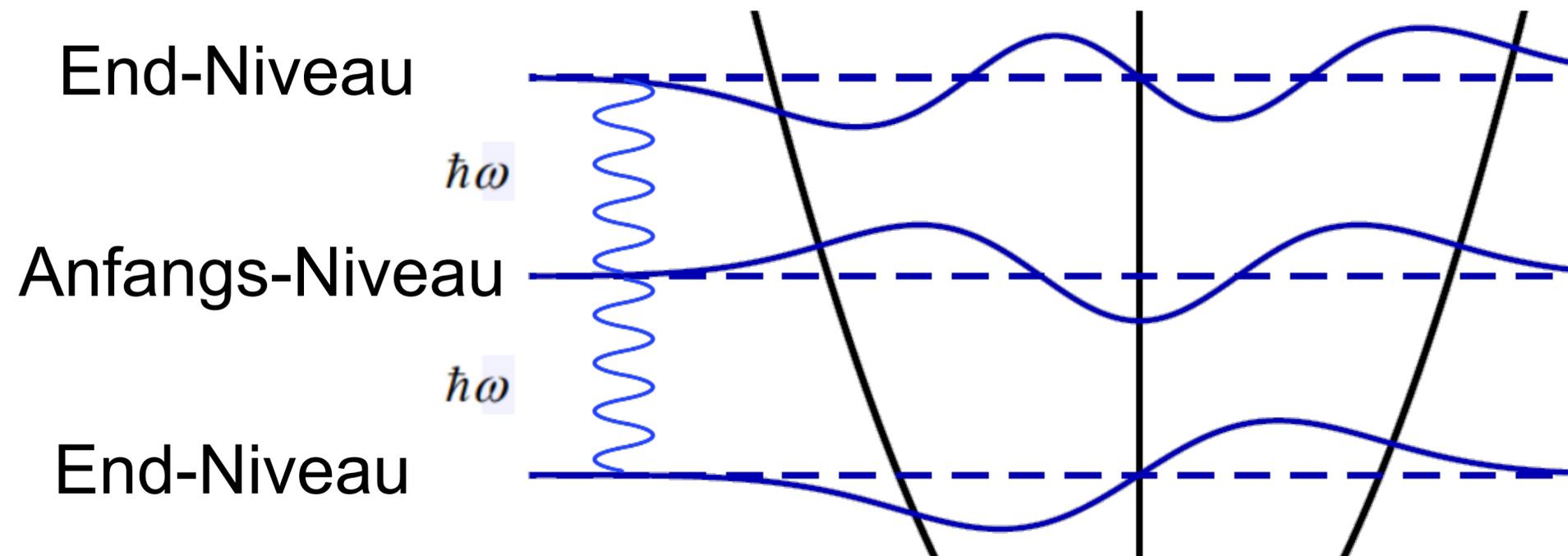
$$P(\Psi_n) = P(\Psi_{n+1,n-1}) \cdot (-1)^1$$

Eigenparität eines Photons:

$P = -1$

Parität des Anfangs-Niveaus

Parität des Endzustands

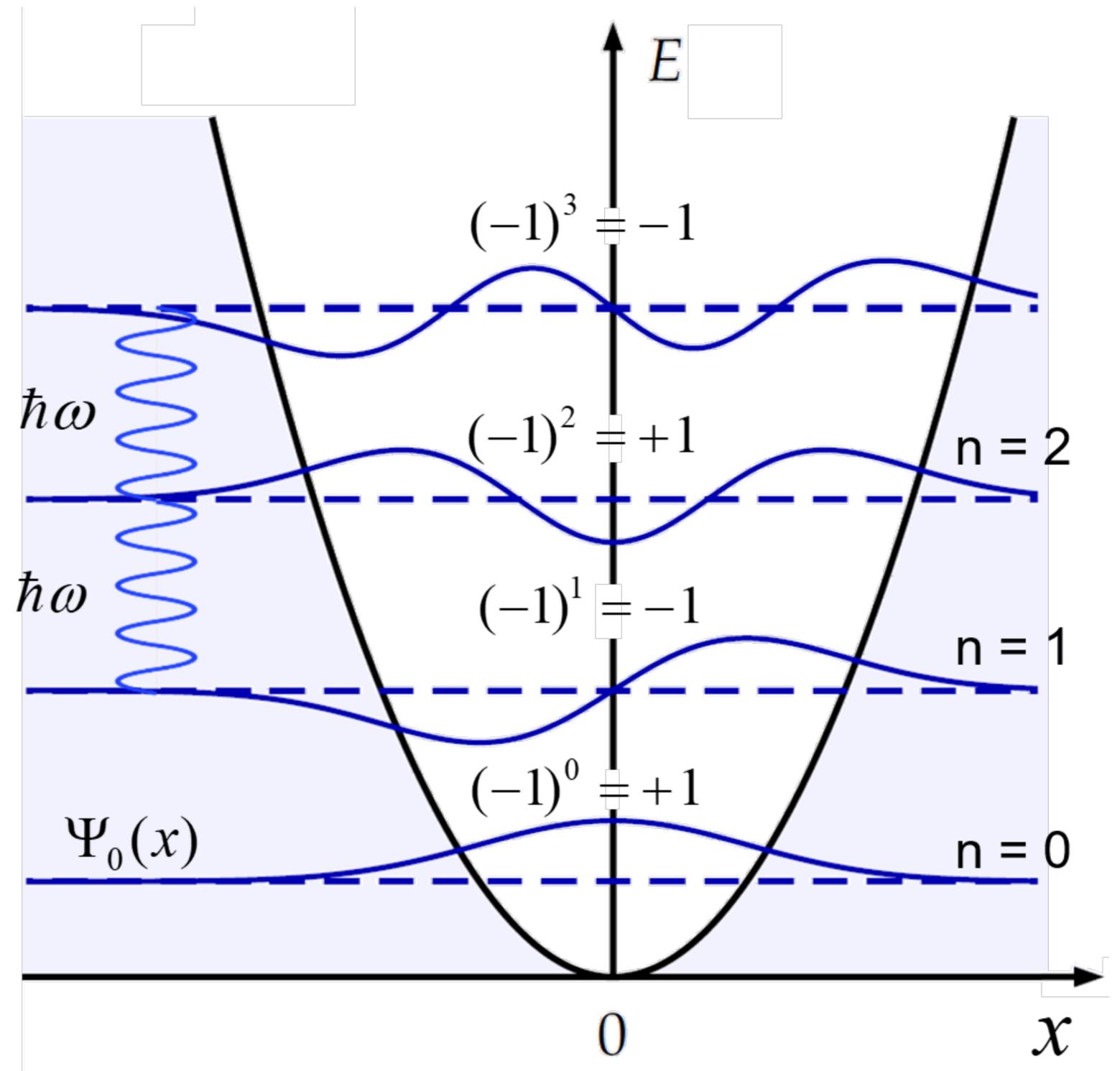


- **Parität P = multiplikative Symmetrie**

Parität bleibt erhalten bei der elektromagnetischen Wechselwirkung

$$P = (-1)^n$$

symmetrische & antisymmetrische Zustände wechseln sich ab



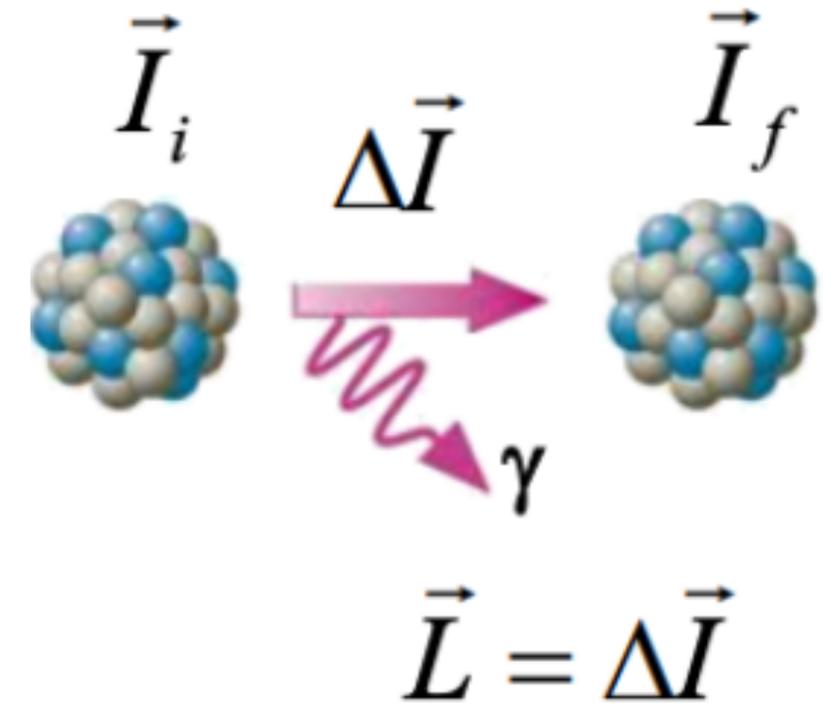
Q: semibyte.de

Parität bei Multipol-Übergängen von Gammas

- bei Emission eines Gammaquants ($J^P = 1^-$) kann sich der Spin des Kerns vom Anfangszustand \vec{I}_i zum Endzustand \vec{I}_f ändern

- Gamma trägt Drehimpuls \vec{L} weg
- Bestimmungsgleichung für $|\vec{L}|$

$$|I_i - I_f| \leq L \leq I_i + I_f$$



- niedrigste **Multipol-Ordnungen:**

$L=1$ Dipolstrahlung

$L=2$ Quadrupolstrahlung

$L=3$ Oktupolstrahlung

Multipolarität 2^L
Eigenwert

■ Charakterisierung von Gamma-Übergängen

- **Elektrischer** Multipol: $P = (-1)^L$
schwingender elektrischer Multipol: **E1, E2, E3, ...**

- **Magnetischer** Multipol: $P = (-1)^{L+1}$
schwingender magnetischer Multipol: **M1, M2, M3, ...**

- **Auswahlregel** für Parität elektrischer/magnetischer Multipole:

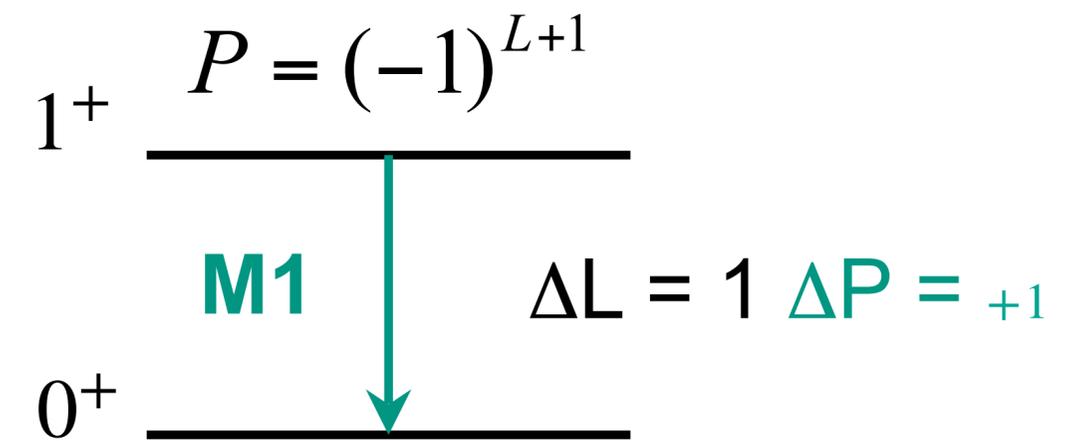
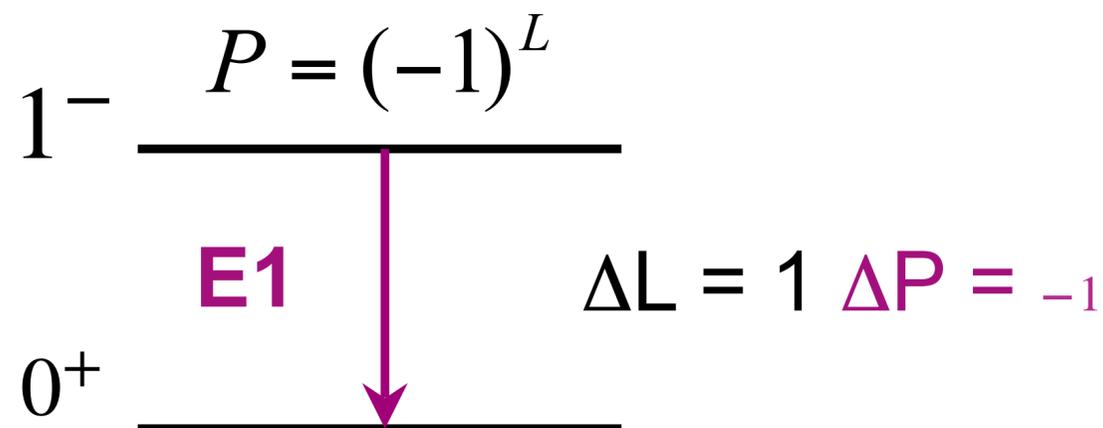
$$EL : P_i = (-1)^L \cdot P_f$$

$$ML : P_i = (-1)^{L+1} \cdot P_f$$

Multipol-Übergänge bei Gammas

■ Auswahlregeln für Gammaübergänge

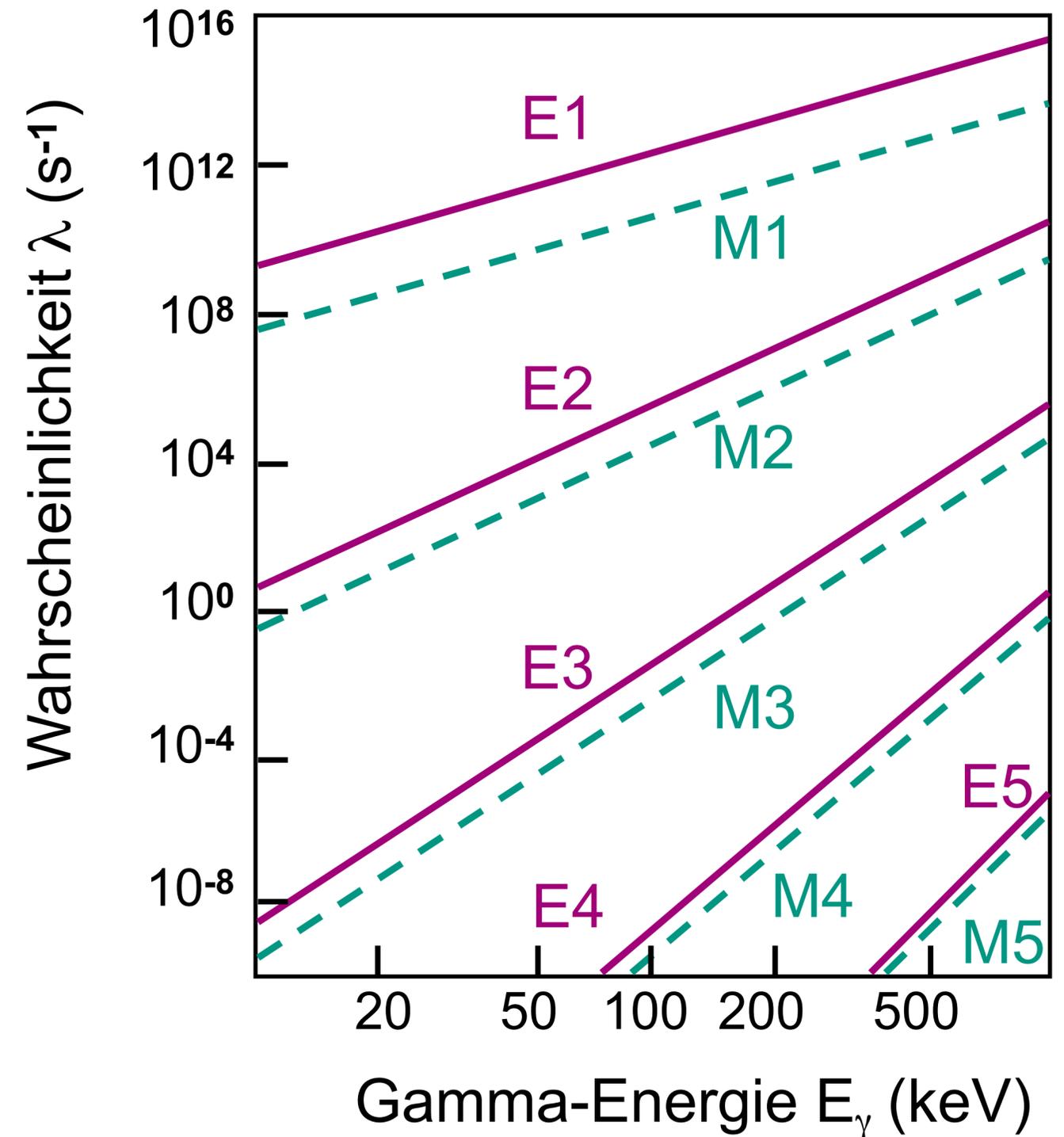
Multipol ℓ	elektrisch			magnetisch		
	$E\ell$	$ \Delta J $	ΔP	$M\ell$	$ \Delta J $	ΔP
Dipol	E1	1		M1	1	
Quadrupol	E2	2		M2	2	
Oktupol	E3	3		M3	3	



Multipol-Übergänge bei Gammas

■ Gamma-Übergänge:

- Beschreibung als Überlagerung verschiedener **Multipolordnungen** (klassisch: Kugelfunktionen Y_{lm} mit jeweils charakteristischen **Winkelverteilungen**)
- man beobachtet fast nur Gamma-Übergänge mit dem niedrigsten möglichen Multipol L
→ **niedrigste Multipolordnung dominiert**



- Paritätsoperation P – ändert die **Händigkeit eines Teilchens**

- **Helizität** h bezeichnet die Projektion des Spins auf die Impulsachse

$$h = \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|} \cdot \frac{\vec{p}}{|\vec{p}|}$$

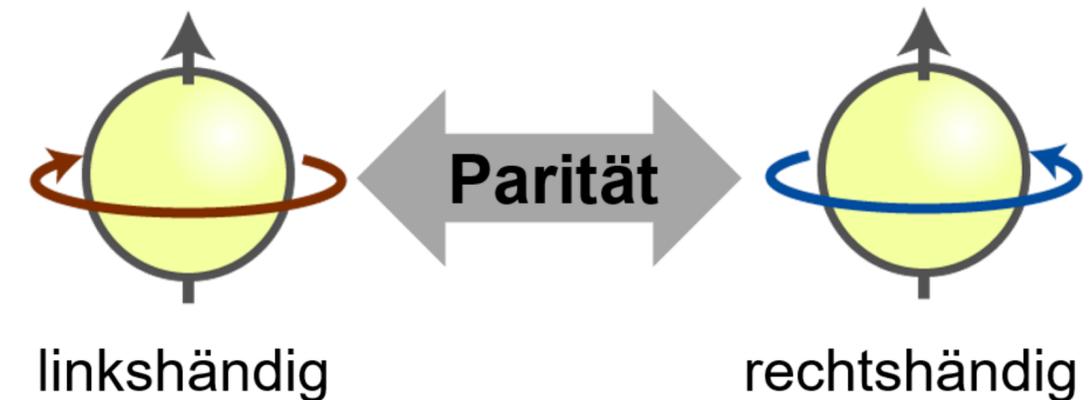
- **linkshändiges Teilchen:** Impuls \vec{p} ist **antiparallel** zum Spin \vec{S}
- **rechtshändiges Teilchen:** Impuls \vec{p} ist **parallel** zum Spin \vec{S}

- **Paritätsoperation P – Pseudoskalare ändern ihr Vorzeichen**

- **Helizität h eines Teilchens als Beispiel einer pseudoskalaren Größe:**
geändertes Vorzeichen des Pseudoskalars nach Paritätsoperation

$$h = \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|} \cdot \frac{\vec{p}}{|\vec{p}|}$$

**Pseudoskalar =
Axialvektor · Vektor**

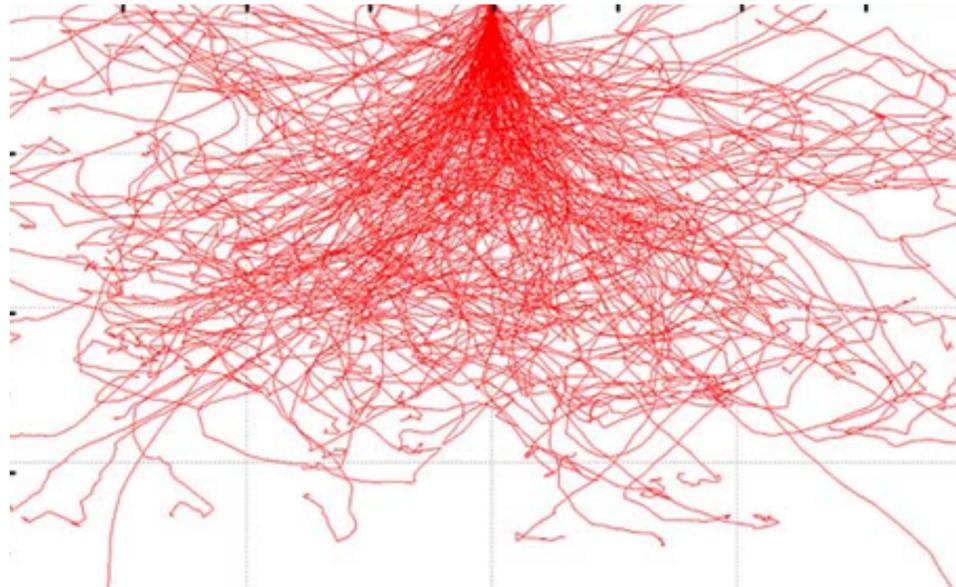


- **pseudoskalare Größe:**
geändertes Vorzeichen des Pseudoskalars nach Paritätsoperation
- **Helizität (Händigkeit) eines Teilchens:** Beispiel eines Pseudoskalars

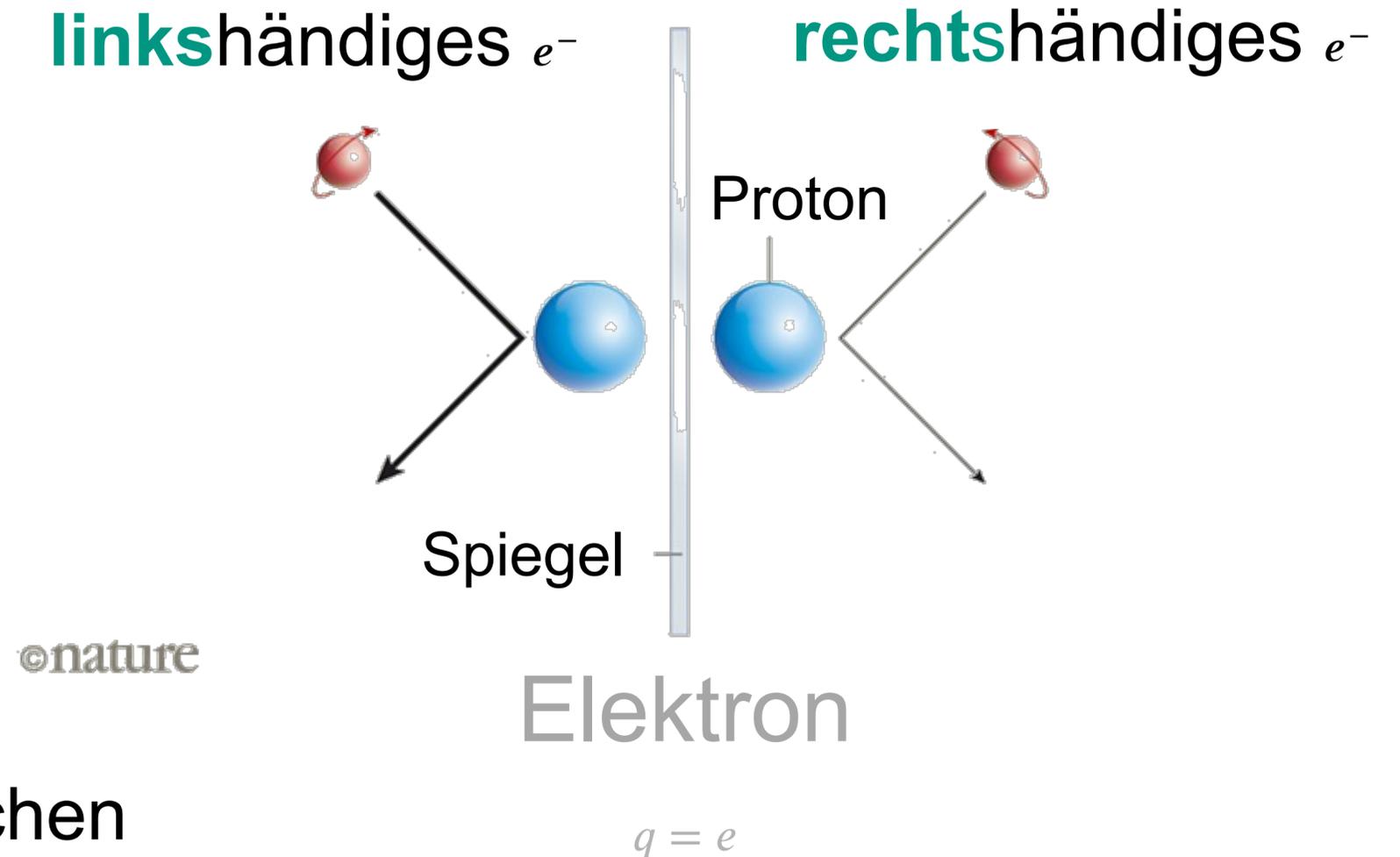
Parität und Händigkeit von Teilchen

- Paritätsoperation P – ändert die Händigkeit eines **Elektrons**

- **Helizität h** : keine relevante Größe z.B. bei Abbremsung eines Elektrons*



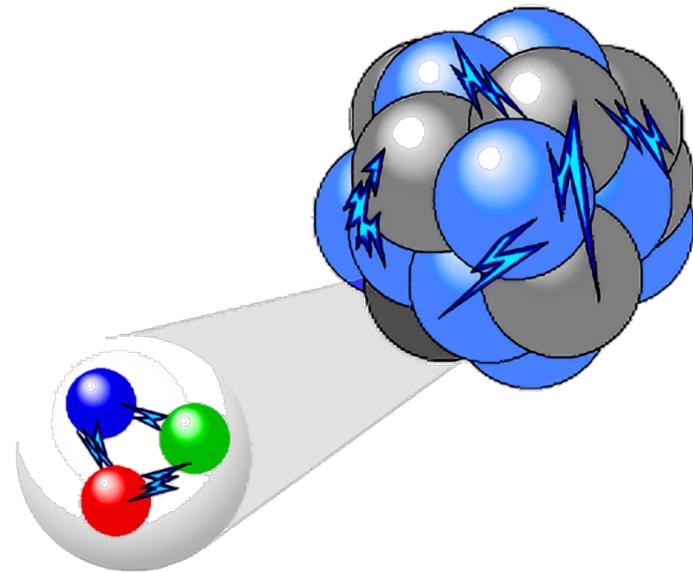
- **linkshändiges Elektron & rechtshändiges Elektron**: gleiche Ladung e , gleiche elektromagnetische Ww. von 2 Teilchen



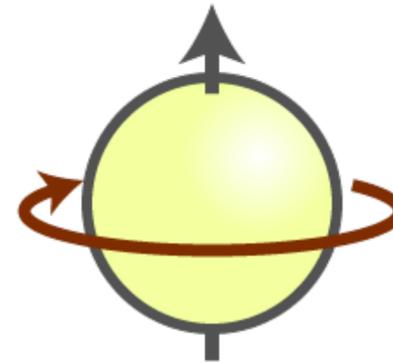
Parität und Händigkeit von Teilchen

- Paritätsoperation P – ändert die Händigkeit eines **Neutrons**

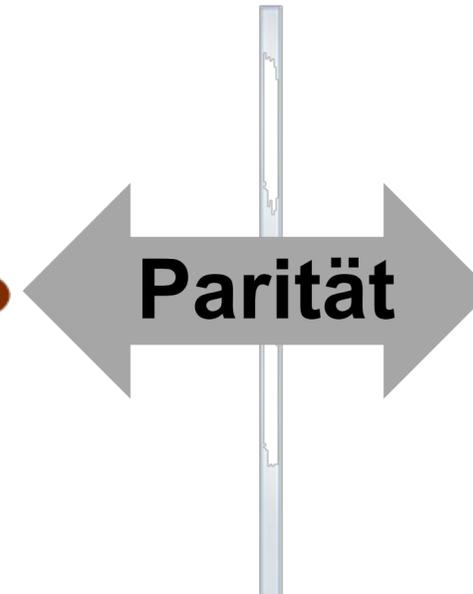
- **Helizität h** : keine relevante Größe bei Prozessen der starken Wechselwirkung



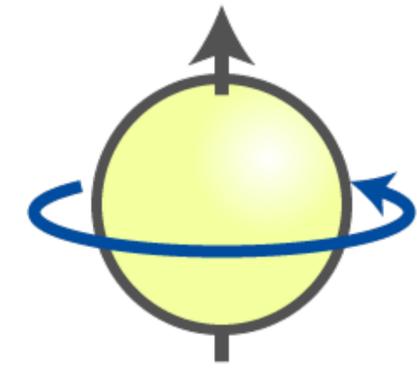
LH



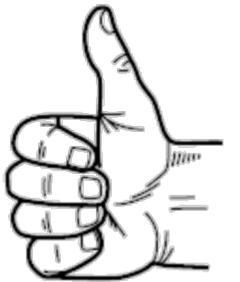
linkshändig



Neutron



rechtshändig

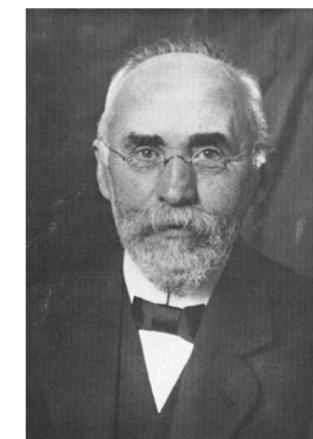
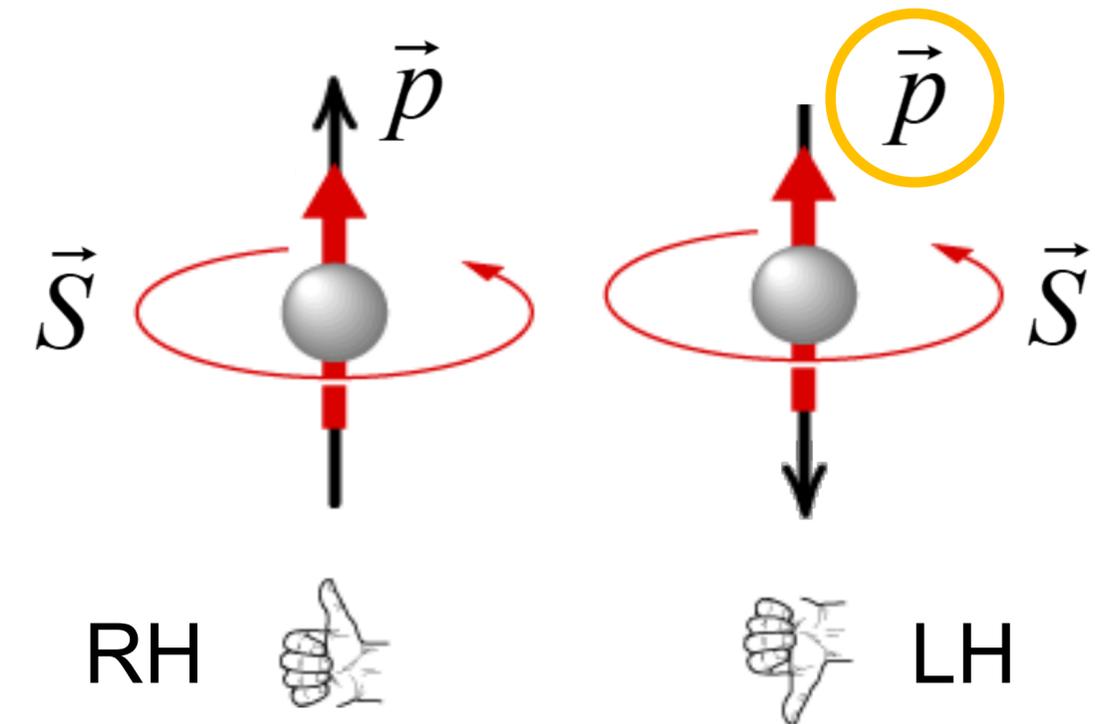


RH

- **linkshändiges Neutron & rechtshändiges Neutron:**
gleiche starke Wechselwirkung, unabhängig von Händigkeit

■ Helizität eines Teilchens: ist dies eine Lorentz-invariante Größe?

- Helizität h ist keine Lorentz-invariante Größe !
- **Helizität** h ist nur für masselose Teilchen (**Photonen mit $v = c$**) eindeutig & invariant
- **massebehaftete Teilchen** besitzen immer **2 Helizitätsanteile** : durch **Lorentz-Boost** kann der **Impuls \vec{p}** 'umgeklappt' werden!



H.A. Lorentz

Helizität für Fermionen mit $S = 1/2$

- Massebehaftete **Spin-1/2** Teilchen

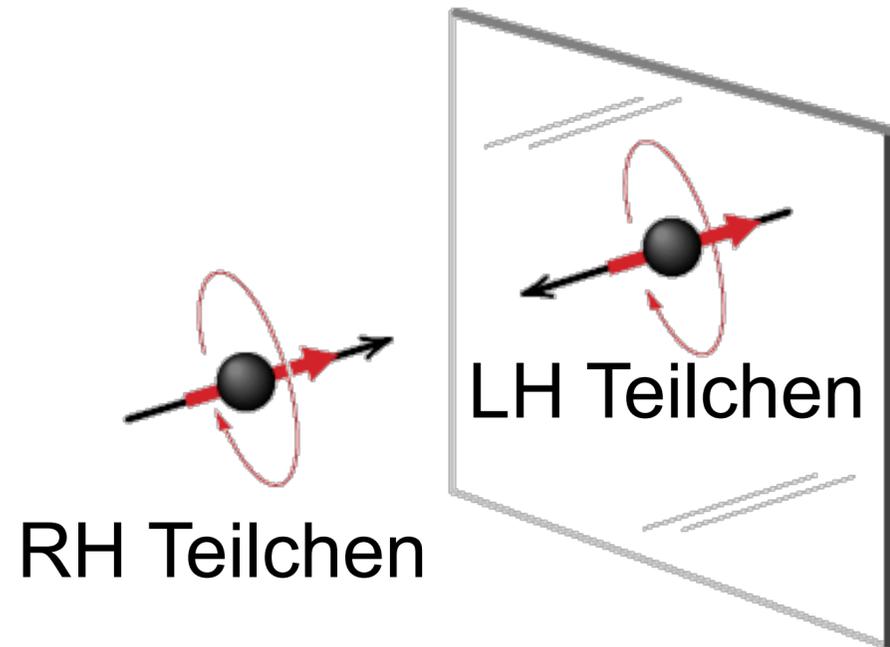
- **4 Zustände** mit

\vec{p} = Impuls \vec{s} = Axialvektor

RH, LH Teilchen

RH, LH Antiteilchen

- Helizität = Pseudoskalar



Teilchen

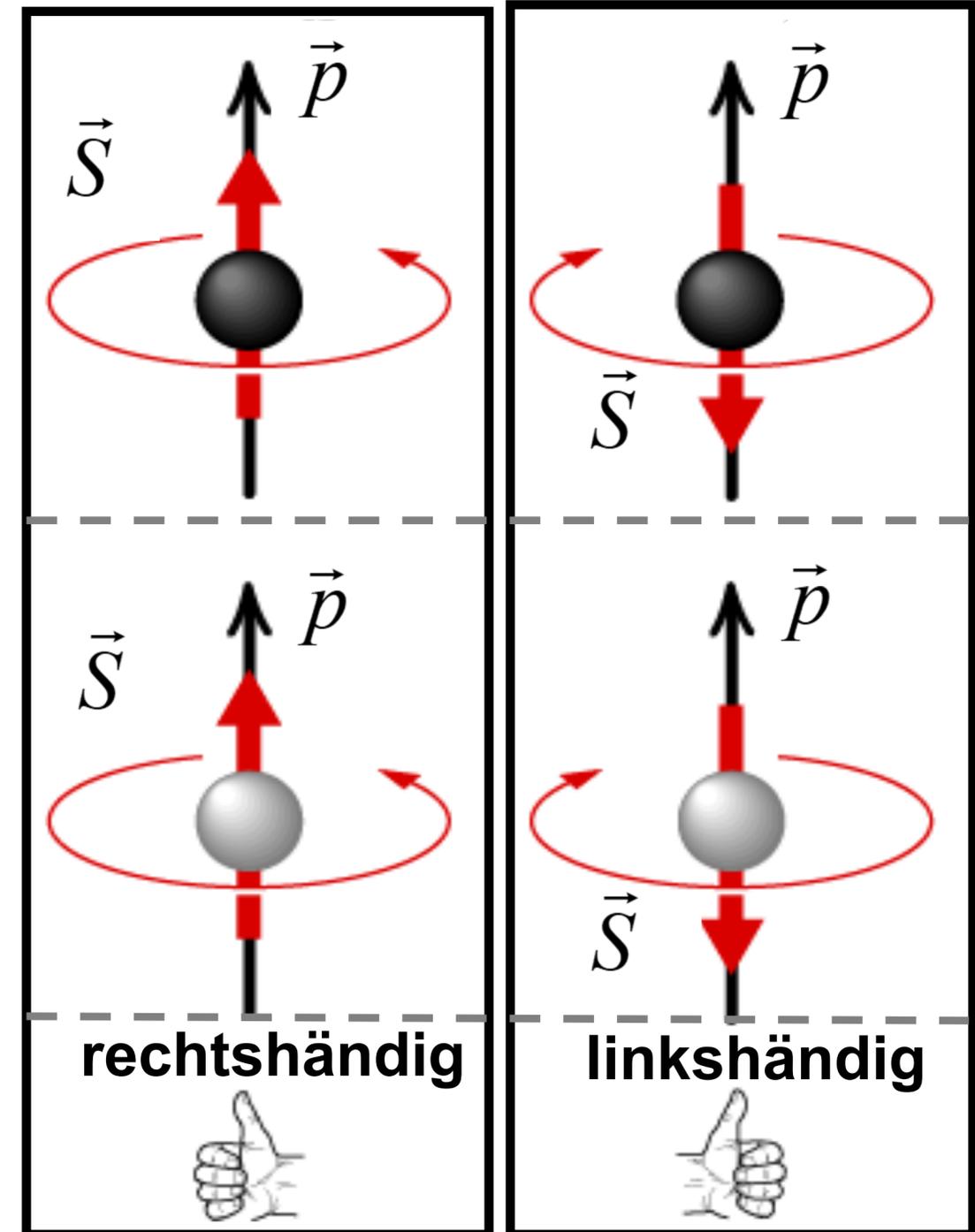
e^-, μ^-

u, d, p, n

Anti-Teilchen

e^+, μ^+

$\bar{u}, \bar{d}, \bar{p}, \bar{n}$



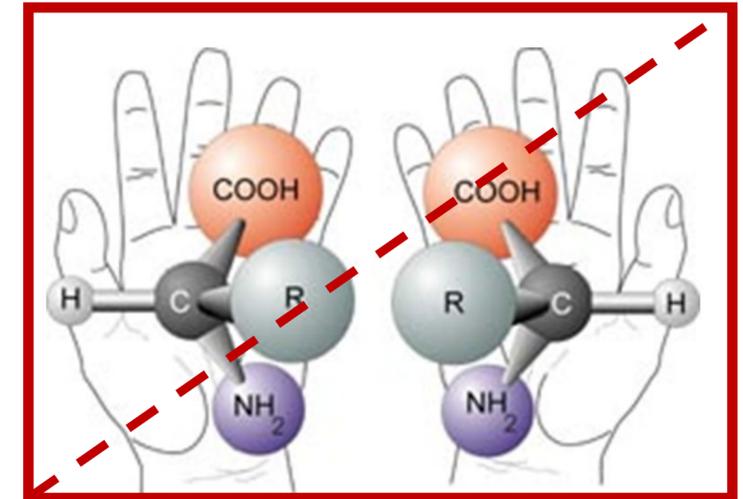
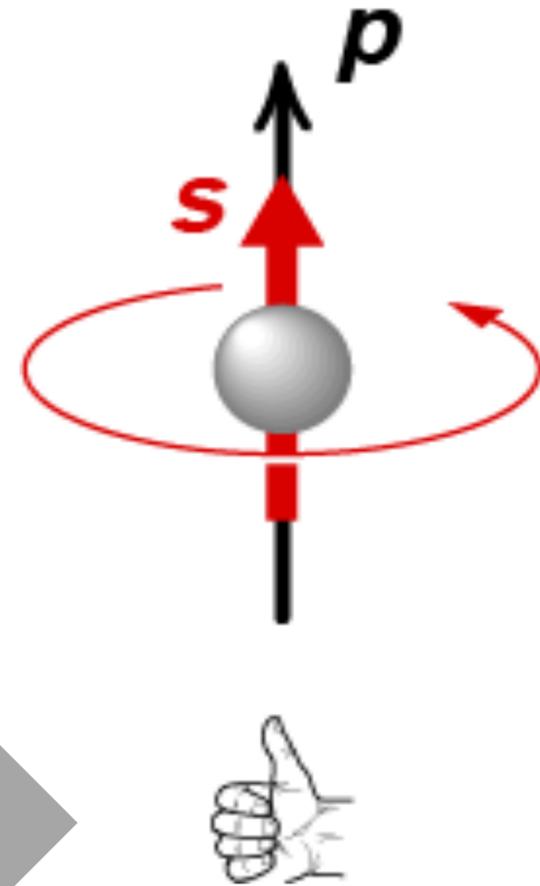
Q: LANL

Katzen

- Skye



$$(e^-)_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma^5)e$$



EINSCHUB: CHIRALITÄT UND HELIZITÄT

- **Chiralität: ein „abstraktes“ Konzept von Quantenfeldtheorien**

- **Chiralität** wichtig bei Prozessen der **schwachen Wechselwirkung**:
W-Bosonen koppeln nur an **Quarks & Leptonen mit linkshändiger Chiralität**

- **Chiralität = Eigenwert** eines **Spinors** unter dem Operator
+1: **RH** (positive) -1: **LH** (negative) **Chiralität**

$$\gamma^5 = i \gamma^0 \gamma^1 \gamma^2 \gamma^3$$

$$\gamma^5 = \begin{pmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{pmatrix}$$

Recap / Vorschau: **Dirac-Gleichung** mit γ -Matrizen



$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix}$$

$$\vec{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & \vec{\sigma} \\ -\vec{\sigma} & 0 \end{pmatrix}$$

$$i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi = mc\psi$$

4x4 Matrizen mit speziellen Antikommutator-Eigenschaften

- **Chirale Projektionsoperatoren für Spinoren:**

$$\frac{1}{2} \cdot (1 + \gamma^5) \quad \text{chiral RH}$$

$$\frac{1}{2} \cdot (1 - \gamma^5) \quad \text{chiral LH}$$

$$\left(e^- \right)_R = \frac{1}{2} (1 + \gamma^5) e$$

chiral RH Spinor

- **Chiralität** und Helizität oft verwechselt durch simultane Verwendung des Begriffs der „**Händigkeit**“

- **massebehaftete** Teilchen: **Helizität \neq Chiralität**,
nur bei **masselosen Teilchen: Helizität = Chiralität**
(bzw. im ultra-relativistischen Fall $v \rightarrow c$)

$$\frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{p}|} \xrightarrow{v \rightarrow c} \gamma^5$$

- Chiralität & Helizität zusammengefasst

	Chiralität	Helizität
relevante phys. Größe	schwache Ladung	Projektion Spin auf Impuls
Operator	Spinor $\Psi_{L,R} = \frac{1}{2} \cdot (1 \pm \gamma^5)$	$h = \frac{1}{2} \cdot (1 \pm \vec{S} \cdot \vec{p} / \vec{p})$
Interpretation LH/RH	nur ein 'Label'	entspricht einem Drehsinn
Lorentz-Invarianz	ja (ist pseudoskalar)	nein (p klappt um, Spin nicht)
wirkt auf	Spinor-Raum	Spin, Impuls (physikal. Raum)
Paritätstransformation	LH \leftrightarrow RH	LH \leftrightarrow RH



■ Händigkeit von Teilchen & Wechselwirkungen

A) Beim Zerfall angeregter **Ni*** Zustände (Mod Phys I) beobachtet man Niveau-Übergänge von $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$. Welche Multipolarität wird bei den beiden Übergängen bevorzugt emittiert?

1 – E2

2 – M3

3 – M4 & E3

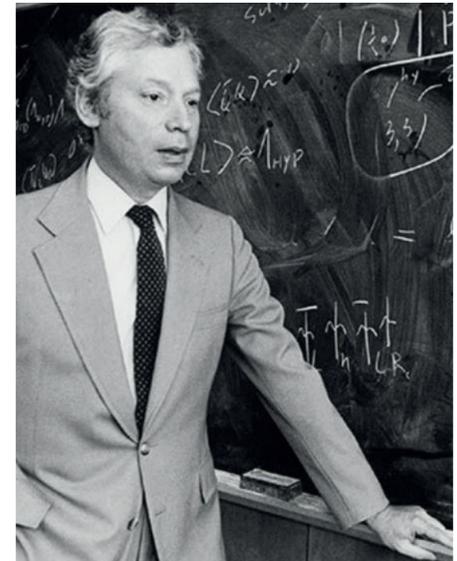
B) Bei einer hadronischen Wechselwirkung wird ein **Pion** π^- erzeugt. Welche Eigenschaften hat es?

1 – Baryonenzahl

3 – Spin

2 – Quark-Flavourinhalt

4 – Parität



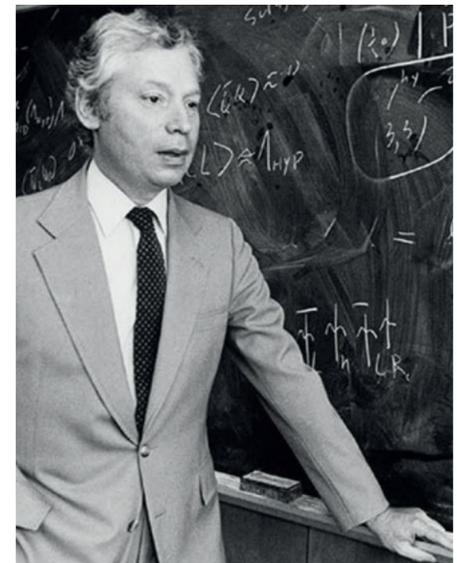
Steven Weinberg



- **Händigkeit von Teilchen & Wechselwirkungen**

C) Bei Zerfallsprozessen werden langsame **negative Myonen** μ^- und langsame **positive Myonen** μ^+ erzeugt.
Was kann man über die **Chiralität** und **Helizität** dieser beiden Teilchen sagen?

- 1) Chiralität und Helizität stimmen überein
- 2) Chiralität und Helizität stimmen nicht überein
- 3) Es kommt auf den Zerfallsprozess an



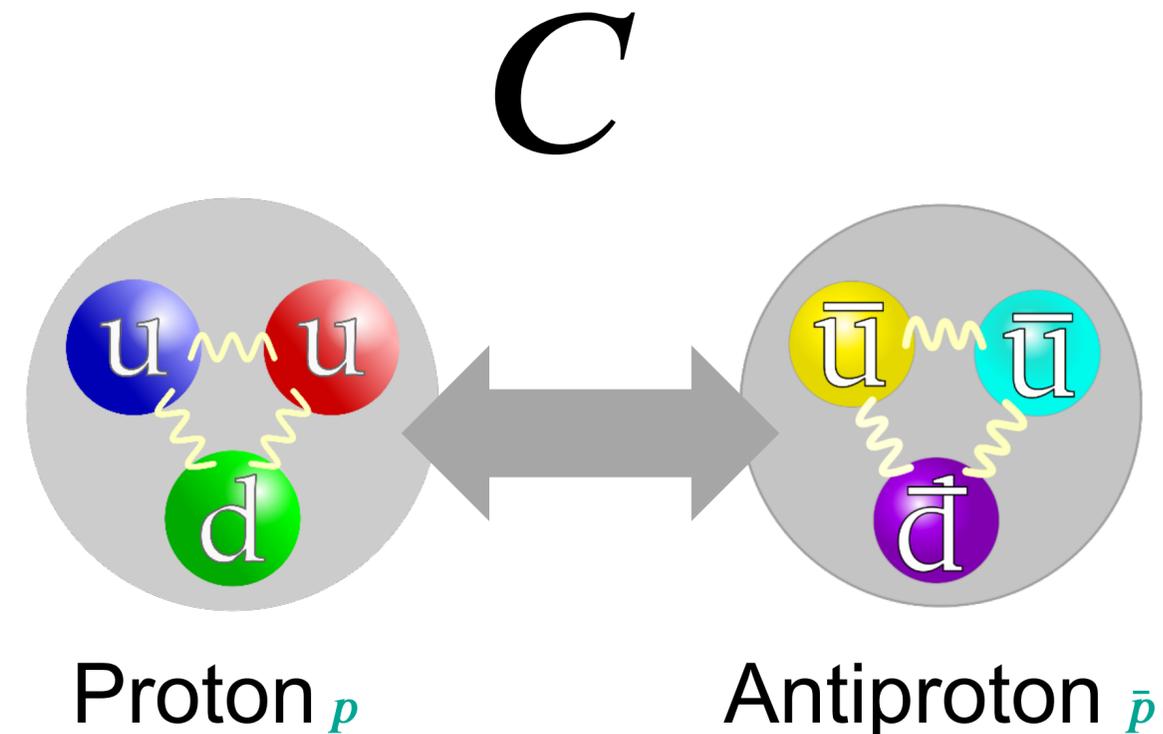
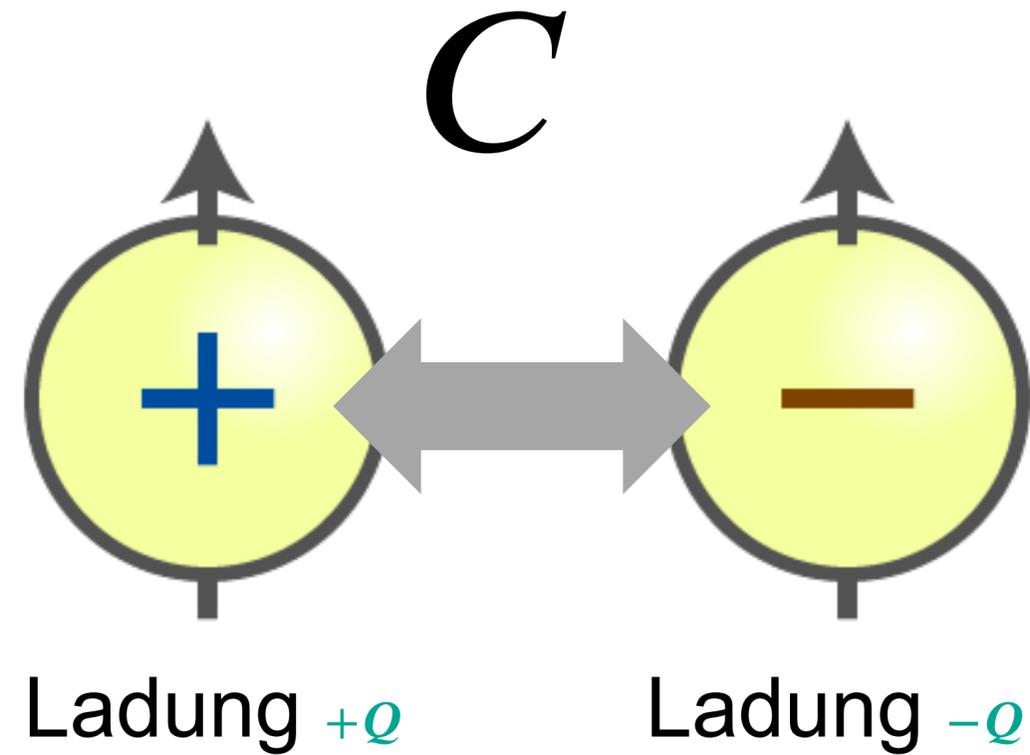
Steven Weinberg

Ladungskonjugation C

- Ladungskonjugations-Operator c :**
 bewirkt eine (mathematische*)
 Umwandlung
Teilchen \leftrightarrow **Antiteilchen**

* kein physikalischer Prozess

- Universum nicht invariant unter c



Ladungskonjugation C : Grundlagen

■ Ladungskonjugations-Operator c

- diskrete Symmetrie \Leftrightarrow multiplikative Quantenzahl

- c -Operator angewendet auf **Felder** (felderzeugende Teilchen $e^- \Leftrightarrow e^+$)

$$\vec{B} \rightarrow -\vec{B}, \quad \vec{E} \rightarrow -\vec{E}$$

- c -Operator angewendet auf **Teilchen**:

\Rightarrow Änderung von allen **ladungsartigen Quantenzahlen**:

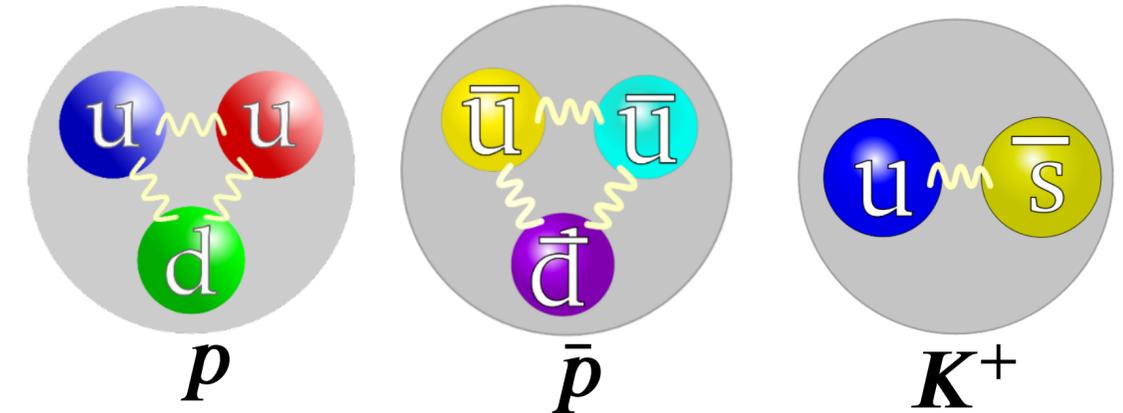
Ladung	$+Q \leftrightarrow -Q$	Strangeness	$+S \leftrightarrow -S$
Baryonenzahl	$+B \leftrightarrow -B$	Leptonzahl	$+L \leftrightarrow -L$

\Rightarrow wirkt nicht auf Masse M da $M(e^+) = M(e^-)$

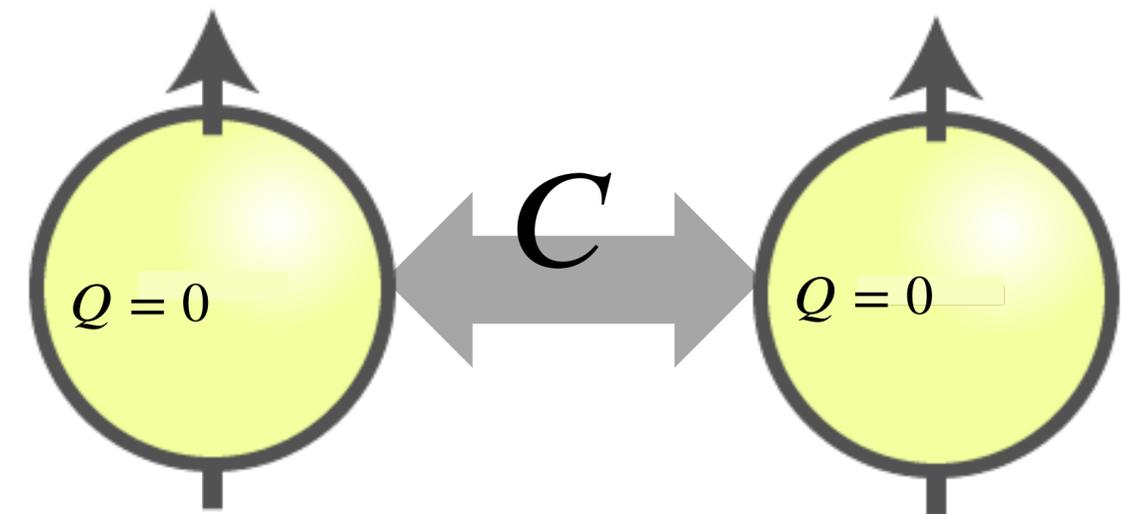
Ladungskonjugation C : Eigenzustände

- welche Teilchen sind Eigenzustände des Operators c ?

- alle Teilchen ($p, \bar{p}, e^-, \mu^+, K^+, u, d, t \dots$) mit ladungsartigen Quantenzahlen $B, L, Q \dots \neq 0$ sind **keine** Eigenzustände von c



- alle **neutralen** Teilchen (γ, π^0) mit $Q = 0, B = 0, L = 0, T_3 = 0$ **sind** Eigenzustände des Ladungskonjugationsoperators c mit der **Eigenparität** $c = +1, -1$ da $c^2 |Y\rangle = +1 |Y\rangle$ man spricht von „selbstkonjugierten“ Teilchen



Q:quantum diaries, wikicommons

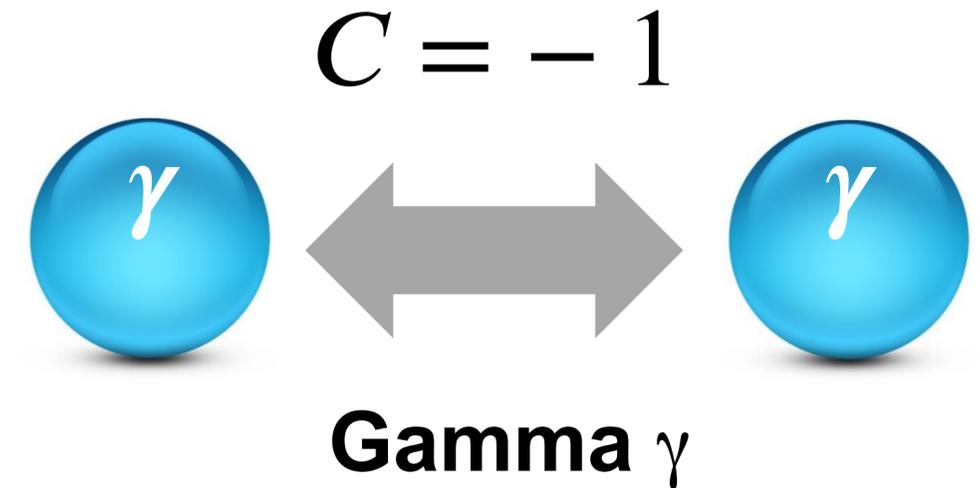
Ladungskonjugation C : neutrale Teilchen

- **Photon γ : $C = -1$**

$$C|\gamma\rangle = -1 |\gamma\rangle$$

da Potenziale ($\Phi \rightarrow -\Phi, \vec{A} \rightarrow -\vec{A}$)

bei Vorzeichenwechsel der Ladung: $q \rightarrow -q$

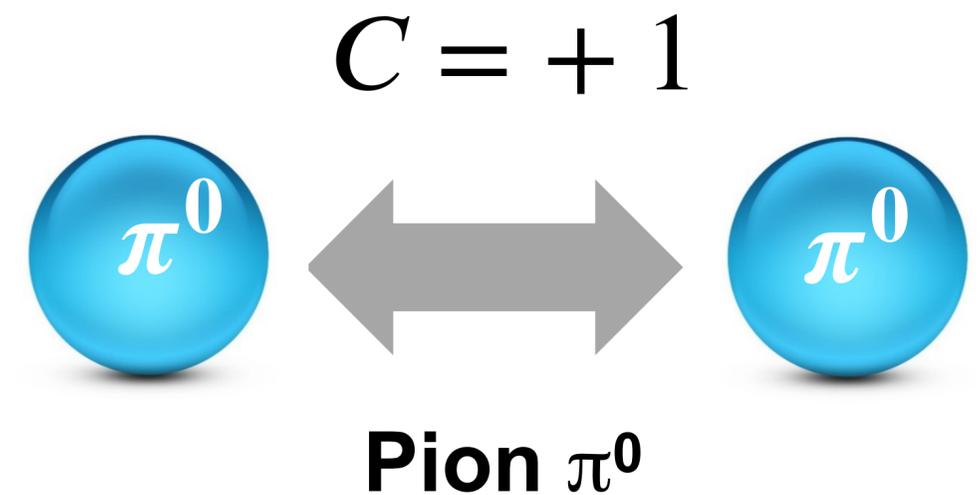


- **Neutrales Pion π^0 : $C = +1$**

$C|\pi^0\rangle = +1 |\pi^0\rangle$ da Zerfall $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

↪ kein Zerfallsmodus: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ (**b.r.** $< 3 \times 10^{-8}$)

↪ neutrales Pion π^0 mit $J^{PC} = 0^{-+}$



C-Parität von neutralen Mesonen

- **c-Parität** von **neutralen Mesonen**: sind als $q\bar{q}$ -Paare bzw. generell als Teilchen-Antiteilchen ($T\bar{T}$ -Paare) sog. selbstkonjugierte Systeme & **Eigenzustände von c**

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

- **neutrales Pion π^0** und **neutrales ω -Meson**

$$|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle \right)$$

pseudoskalares Pion mit

$$s = 0, \ell = 0 \quad c = (-1)^0 = +1$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} + u\bar{u}\rangle$$

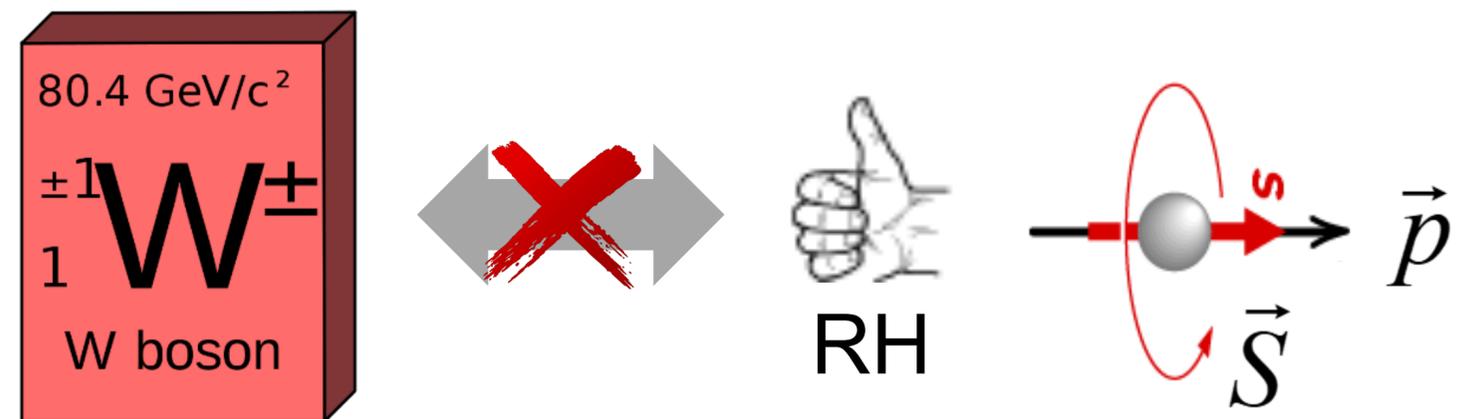
ω -Vektormeson mit

$$s = 1, \ell = 0 \quad c = (-1)^1 = -1$$

Wechselwirkungen: Parität P & C -Parität

■ Parität P

- **starke & elektromagnetische** Wechselwirkung: **Erhaltung der Parität**
- **schwache Wechselwirkung: maximale Verletzung der Parität** (*Wu et al.*):
Wechselwirkung ist abhängig von der **Händigkeit** (Helizität, Chiralität) eines Teilchens



■ Ladungskonjugation C

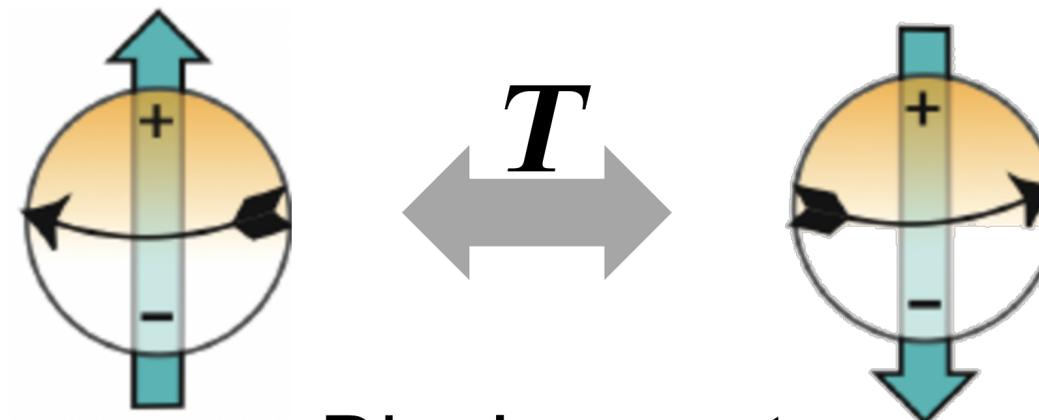
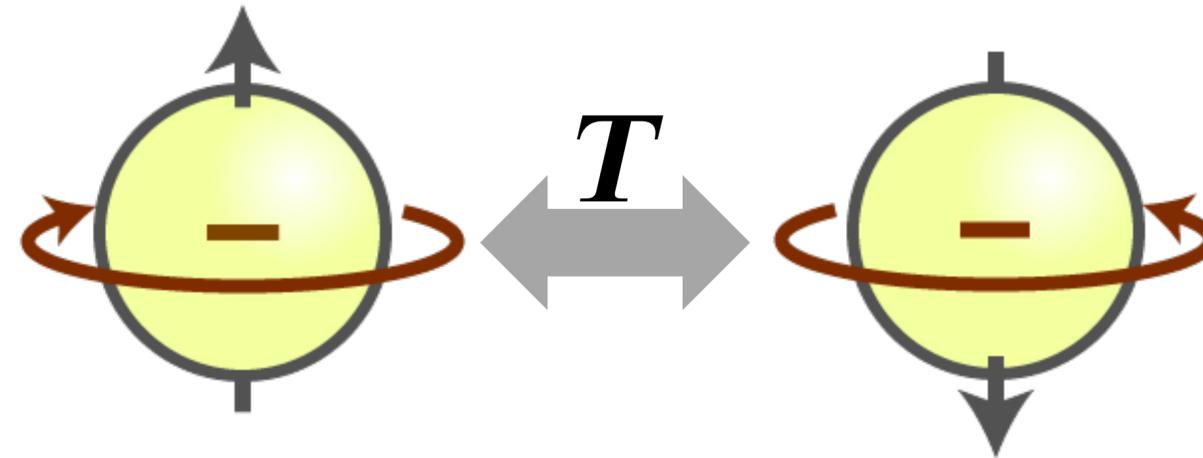
- **starke & elektromagnetische** Wechselwirkung: **Erhaltung der C -Symmetrie**
- **schwache Wechselwirkung: maximale Verletzung der C -Parität** (*Wu et al.*)

Zeitumkehr T

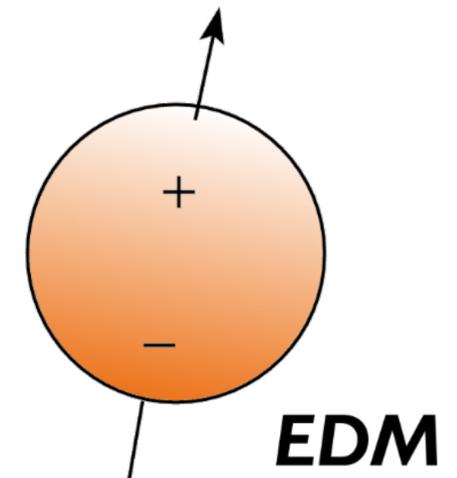
■ Zeitumkehroperator T : $+t \rightarrow -t$

- makroskopisch verletzt für Teilchenensemble (Entropie)

- hier: Eigenschaften von Wechselwirkungen & Elementarteilchen (nEDM)



Dipolmomente



Zeitumkehrinvarianz T

- **Zeitumkehroperator T :** $t \rightarrow -t$

- **Invarianz:** identischer Wirkungsquerschnitt für Hin- und Rückreaktion:

$$a + b \leftrightarrow c + d$$

- **T-Operator:** Wirkung auf **klassische Variable:**

keine Änderung $\vec{x} \rightarrow \vec{x}, \vec{E} \rightarrow \vec{E}, \vec{F} \rightarrow \vec{F}$

Änderung $\vec{v} \rightarrow -\vec{v}, \vec{p} \rightarrow -\vec{p}, \vec{B} \rightarrow -\vec{B}, \vec{J} \rightarrow -\vec{J}$

- **T-Operator:** Indikator bei Teilchen ist **elektrisches Dipolmoment**

Elektrisches Dipol-Moment (EDM) von Elektron, Neutron:

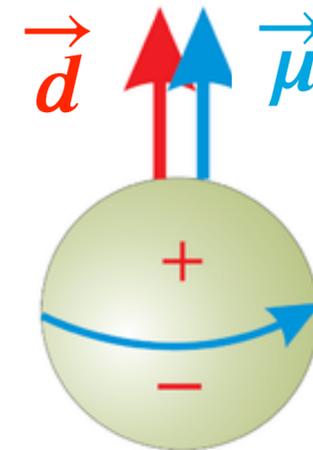
ein Indikator für **Verletzung der T-Invarianz** (bzw. CP- Verletzung)

Symmetrien P, T und das nEDM

- Elektrisches Dipolmoment \vec{d} eines Teilchens, hier: Neutron (nEDM)

- elektrisches Dipolmoment \vec{d} : **asymmetrische intrinsische Ladungsverteilung** entlang Spinachse $\vec{\mu}$

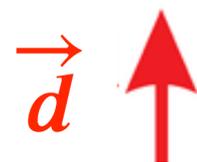
- magnetisches Dipolmoment $\vec{\mu}$:
einzige ausgezeichnete **Achse*** im System



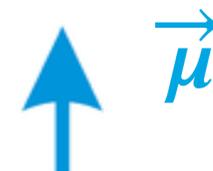
$$\mu_n = -1,91 \mu_N$$

$$\vec{\mu}_n \uparrow \downarrow \vec{S}_n$$

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



Orientierung des elektr. Dipolmoments (EDM)



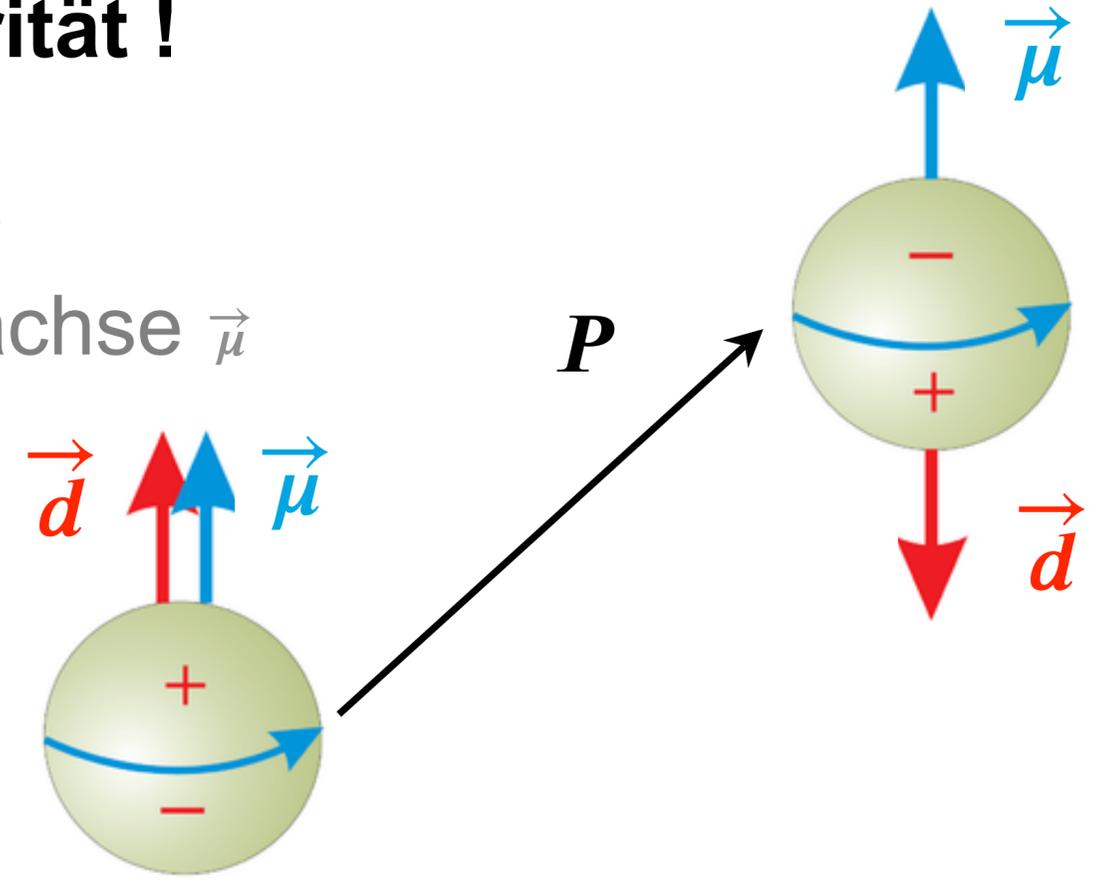
Achse des magnetischen Moments (bzw. des Spins)

■ **Elektrisches Dipolmoment \vec{d} : Verletzung der Parität !**

- elektrisches Dipolmoment \vec{d} : asymmetrische intrinsische Ladungsverteilung entlang Spinachse $\vec{\mu}$

- magnetisches Dipolmoment $\vec{\mu}$:
einzige ausgezeichnete **Achse** im System

- permanentes elektr. Dipolmoment \vec{d}
verletzt Parität P



Q: wikicommons: A. Knecht

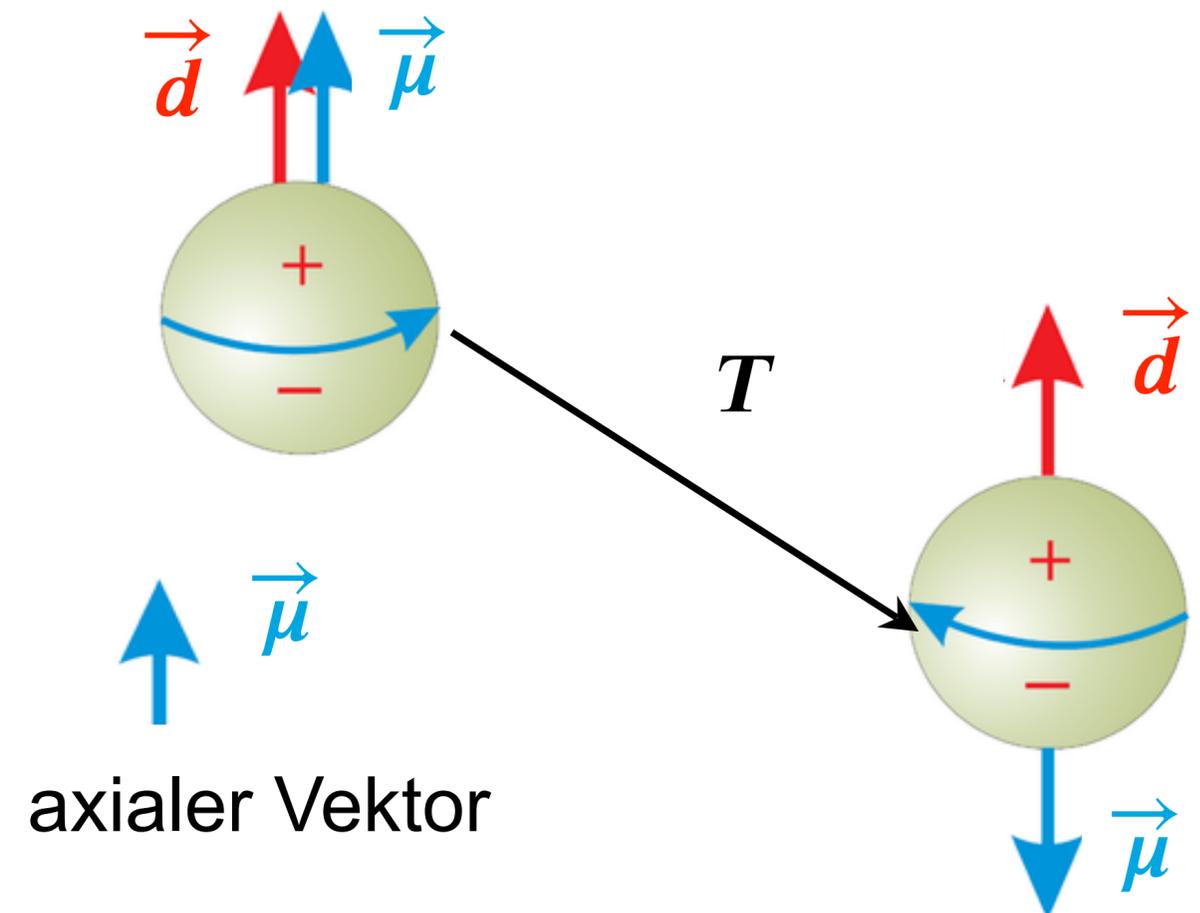
Zeitumkehrinvarianz T und nEDM

- **Elektrisches Dipolmoment \vec{d} : Verletzung der Zeitumkehr !**

- elektrisches Dipolmoment \vec{d} : asymmetrische intrinsische Ladungsverteilung entlang Spinachse $\vec{\mu}$

- magnetisches Dipolmoment $\vec{\mu}$:
einzige ausgezeichnete **Achse** im System

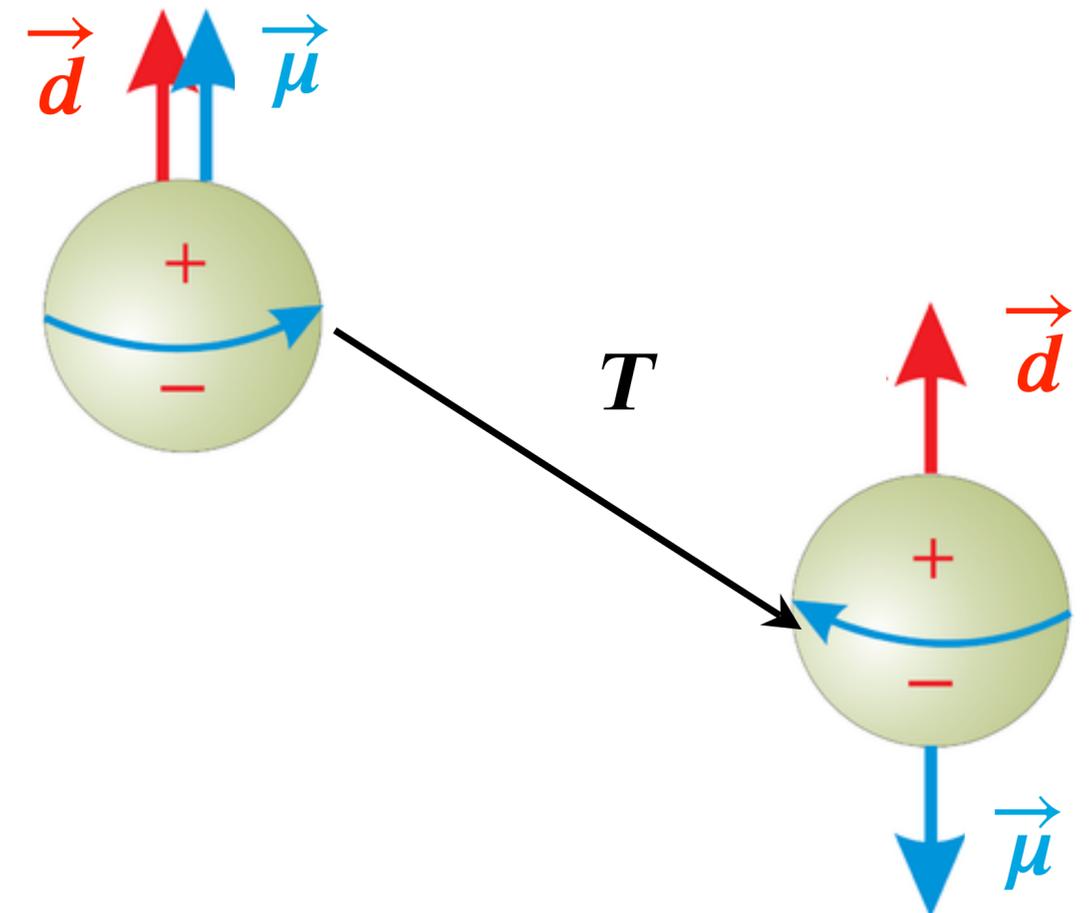
- permanentes elektr. Dipolmoment \vec{d}
verletzt Zeitumkehr T



Zeitumkehrinvarianz T und nEDM

- **Elektrisches Dipolmoment \vec{d} : intensive Suche beim Neutron**

- **elektrisches Dipolmoment \vec{d}** : muss bei T-Invarianz verschwinden
- **wird beim Neutron ein EDM gefunden, ist die T -Invarianz** (und auch die CP -Symmetrie) **gebrochen**
- **aktuelle (2020) nEDM- Obergrenze:**
 $|\vec{d}| < 1,8 \cdot 10^{-26} \text{ e cm}$
 bisher keine Evidenz für nEDM & bzw. eine Verletzung von T

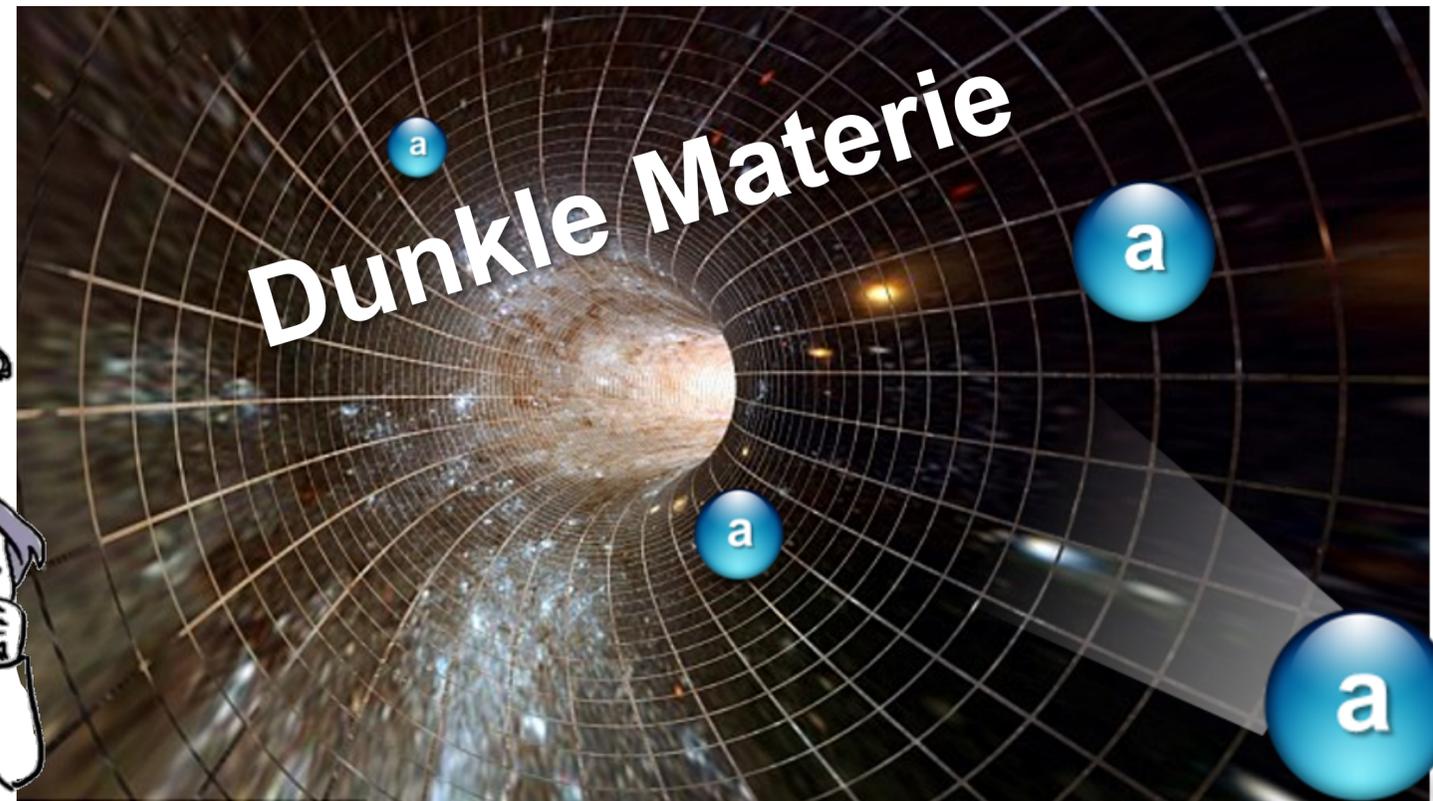


nEDM: Hinweis auf neue Symmetrie & Axionen?

- Elektrisches Dipolmoment \vec{d} eines Teilchens (Neutron)

- elektrisches Dipolmoment \vec{d} : muss bei T-Invarianz (CP-Invarianz) verschwinden

- aber: QCD erlaubt großes nEDM \Leftrightarrow **neue Symmetrie & Teilchen: Axion a ***



Q: wikicommons: A. Knecht

Katzen

- Symmetriebrechung





KAPITEL 4.3 SCHLÜSSELEXPERIMENTE ZUR C-, P- UND CP-VERLETZUNG

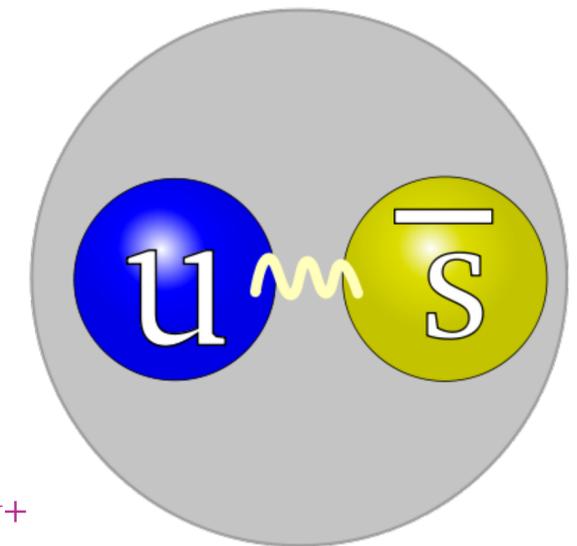
- Beobachtung von zwei Mesonen (θ^+ , τ^+) mit gleicher Masse (493,7 MeV) & Lebensdauer, die in **unterschiedliche Paritätszustände** zerfallen:

„Theta“: 21%	$\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$	$P(\theta^+) = (-1) \cdot (-1) \cdot (-1)^0 = +1$
„Tau“*: 6%	$\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+$	$P(\tau^+) = (-1) \cdot (-1) \cdot (-1) \cdot (-1)^0 = -1$

2 bzw. 3 Pionen: rel. Bahndrehimpuls $\ell = 0$

- heutige Darstellung: Kaon mit Strangeness s

- θ^+ und τ^+ sind identische Teilchen ($\equiv K^+$) !
- **Parität P wird in der schwachen Wechselwirkung verletzt!**

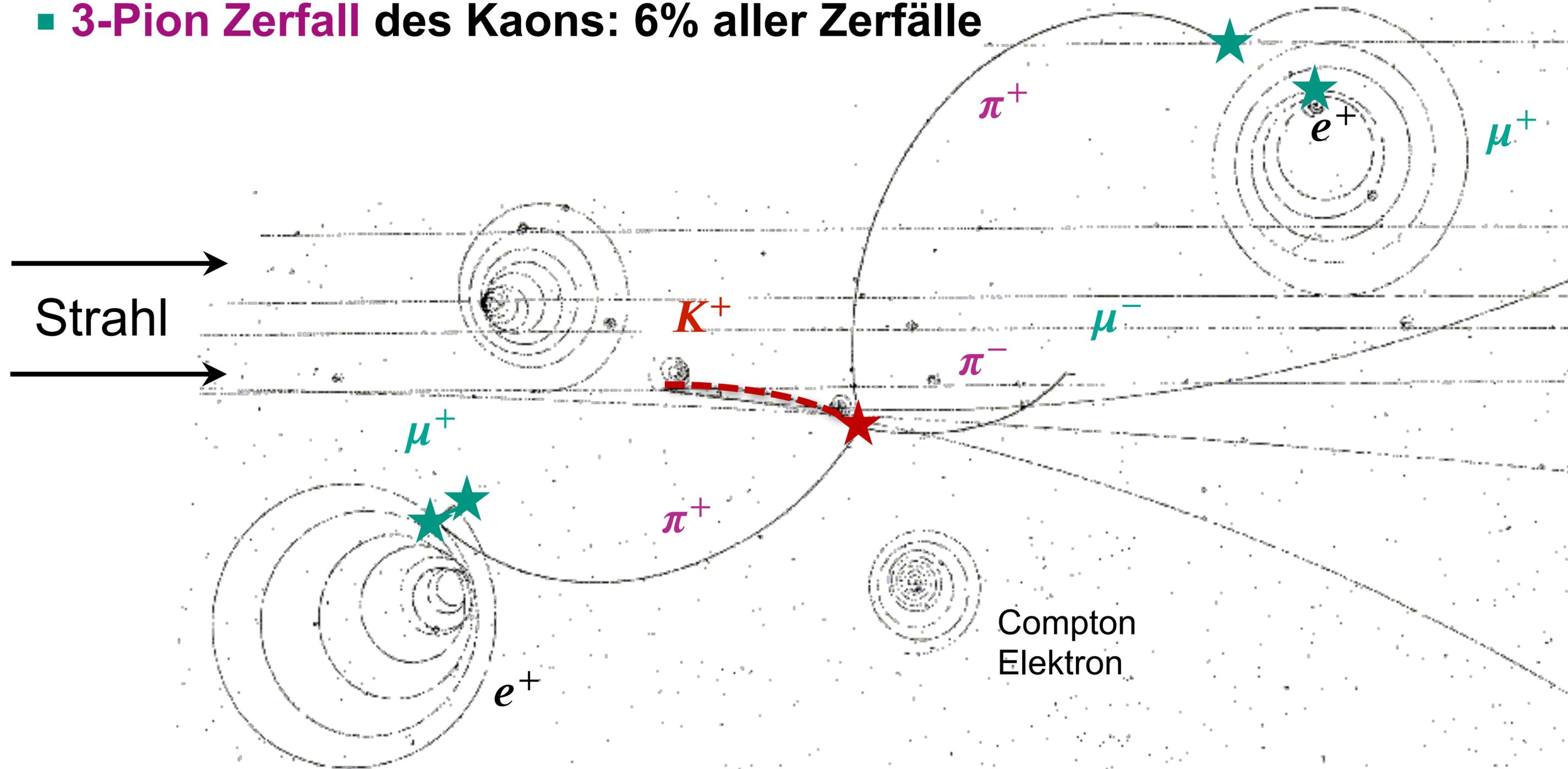


Kaon K^+

*historischer Name, bitte nicht verwechseln mit dem heutigen Lepton „Tau“

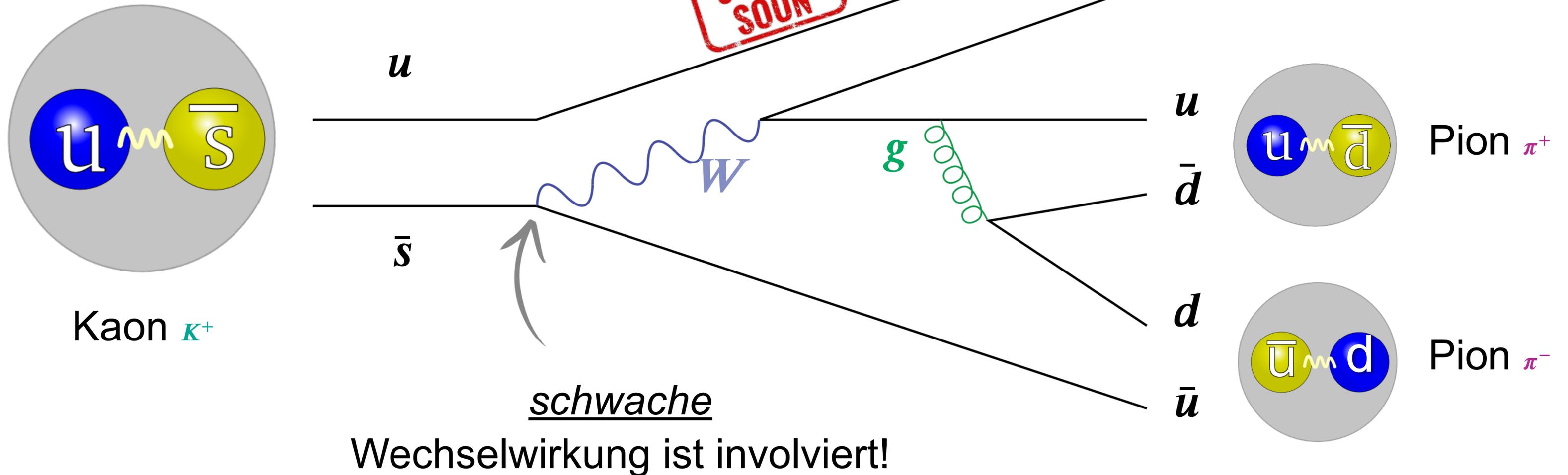
Zerfall eines Kaons: Experimentelle Signatur

- **3-Pion Zerfall** des Kaons: 6% aller Zerfälle



Zerfall eines Kaons: Feynman Diagramm

- **3-Pion Zerfall** des Kaons: 6% aller Zerfälle
Darstellung in Feynman-Diagramm



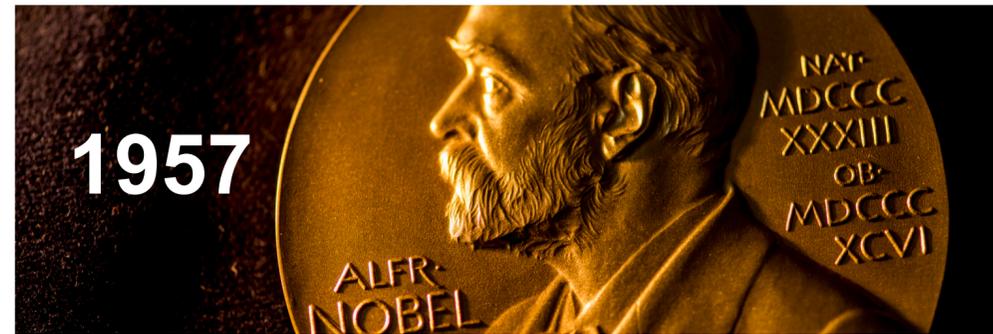
Q: wikipedia

Arbeiten von Lee und Yang: Paritätsverletzung?!

- 1956: Lee & Yang schlagen experimentelle Tests vor*, um zu untersuchen, ob die **Parität P durch die schwache Wechselwirkung verletzt wird**
 - setzen experimentelle Teams auf die Spur der Paritätsverletzung

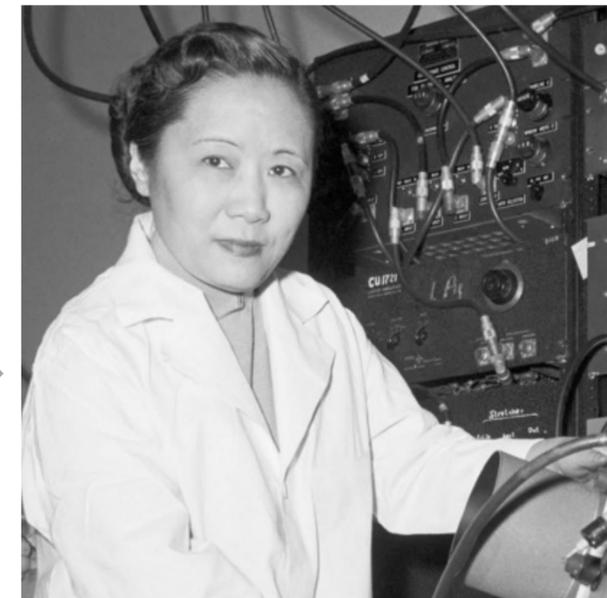


Tsung-Dao Lee Chen Ning Yang



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

C.S. Wu
L. Lederman



[Question of Parity Conservation in Weak Interactions \(aps.org\)](https://www.aps.org)

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

Paritätsverletzung: Vorzugsrichtung beim β -Zerfall

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

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

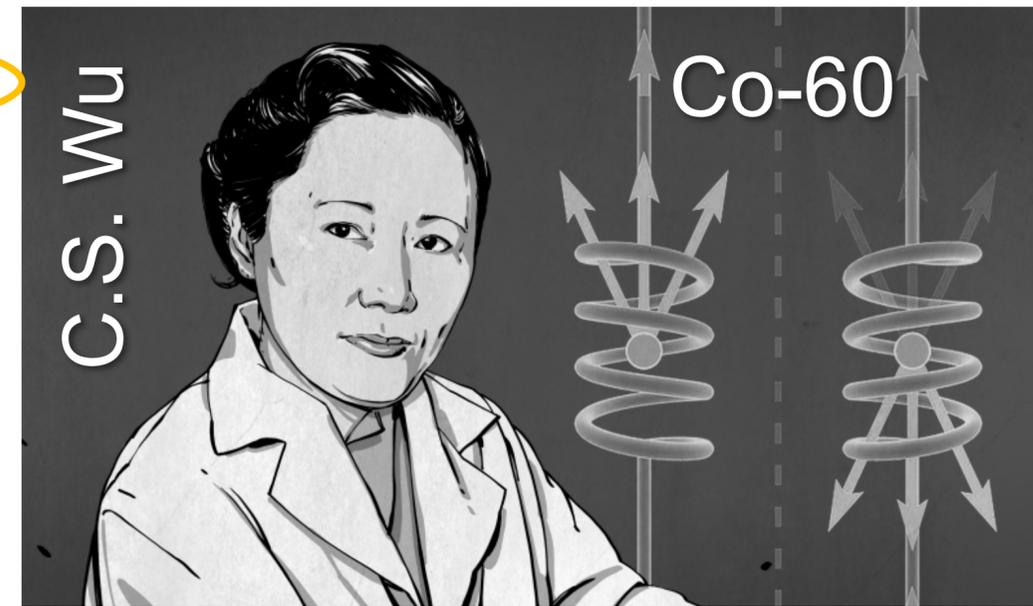
OCTOBER 1, 1956



李政道

杨振宁

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



C.S. Wu

Co-60

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

Q: American IOP, nobelprize, pinterest

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



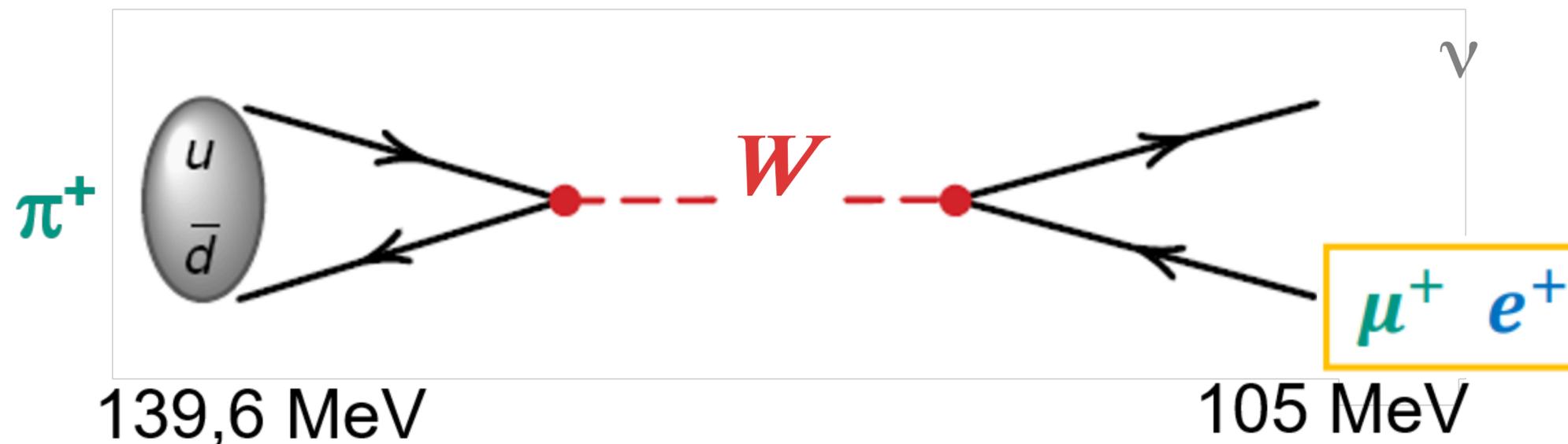
OCTOBER 1, 1956



Leon Lederman & Team

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

4.1.1957 – 8.1.1957

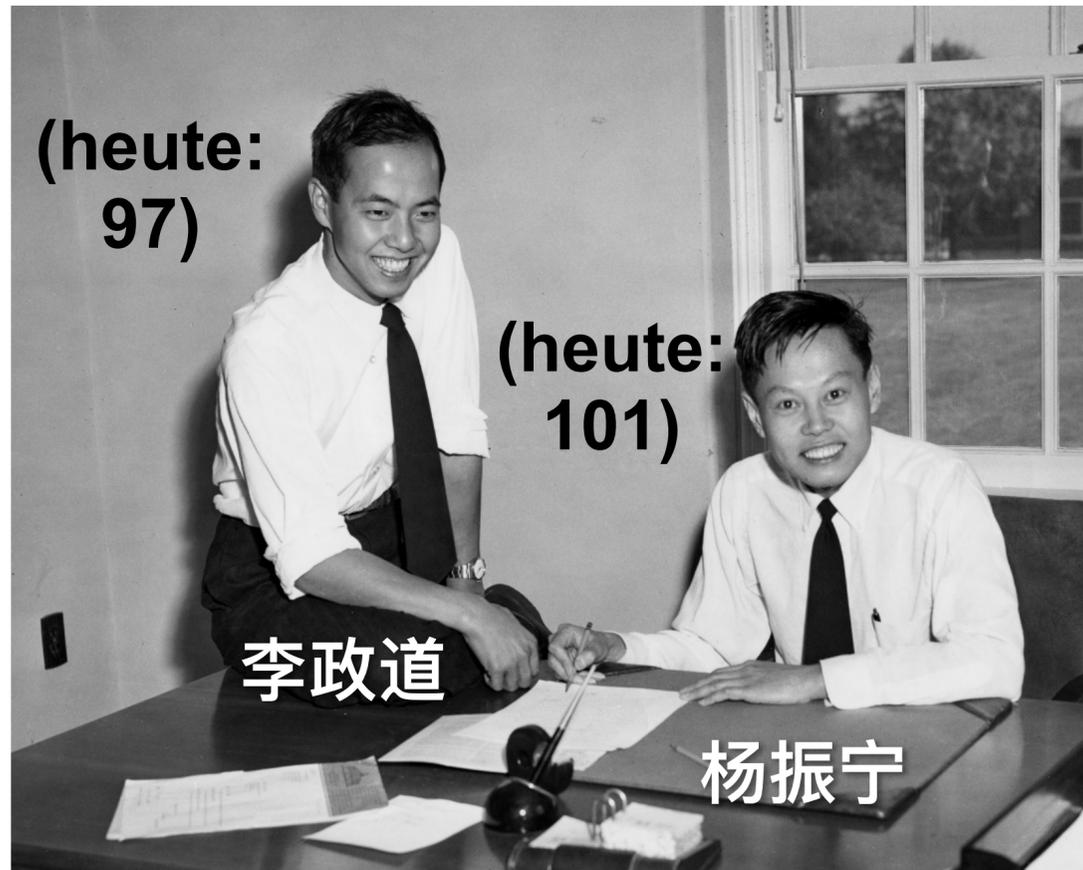


θ^+ - τ^+ Puzzle

Q: American IOP, nobelprize, pinterest

Parität & Ladungskonjugation, nachgefragt

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



Tsung-Dao Lee Chen Ning Yang

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

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

(π, K) : “pseudo-skalare“ Mesonen $\Leftrightarrow J^P = 0^-$

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

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

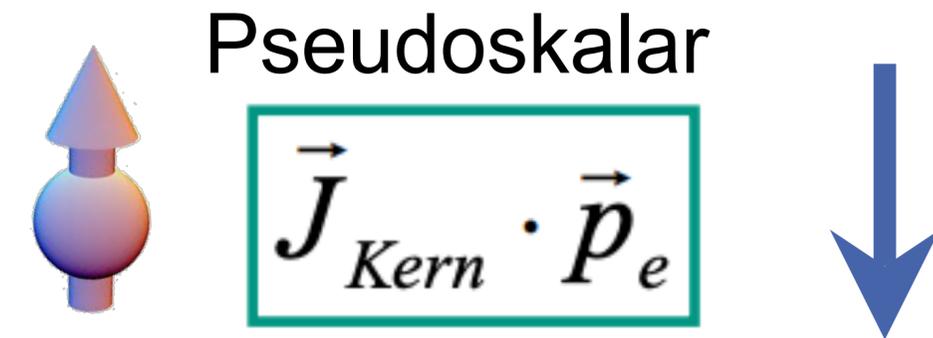
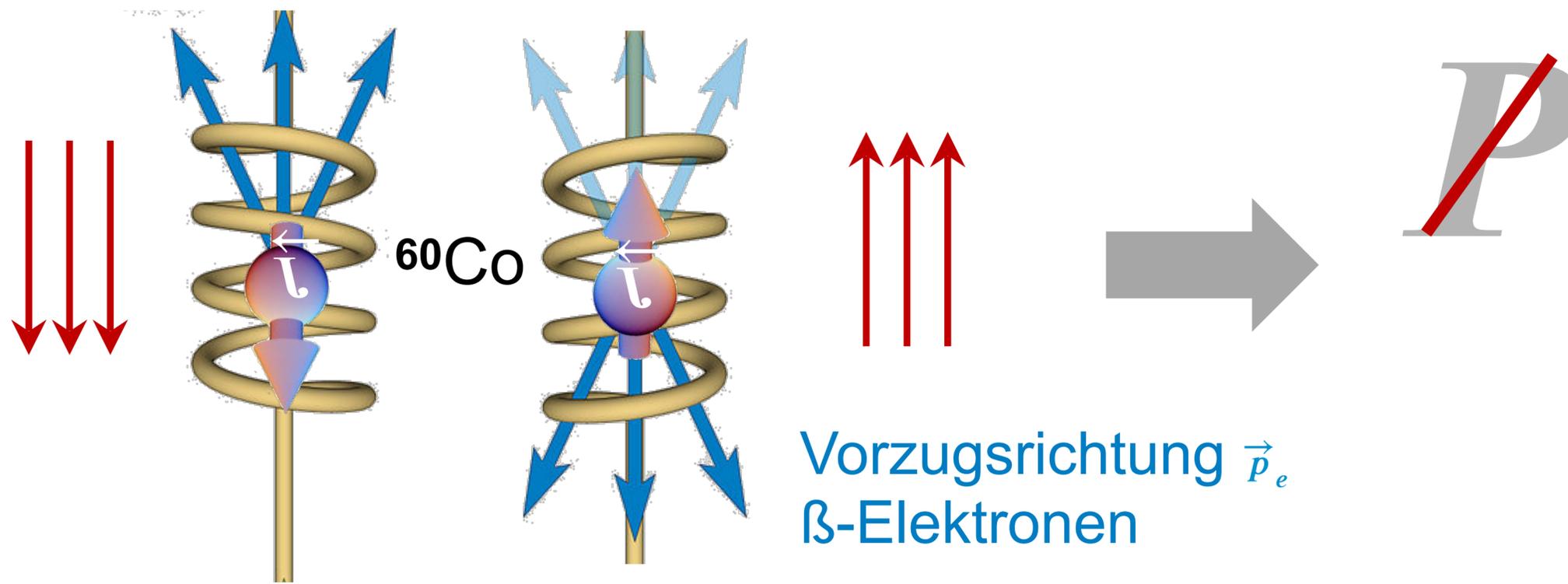
$$s = 0, \ell = 0 \Leftrightarrow C = (-1)^0 = +1$$

Paritätsverletzung im β -Zerfall eines Kerns

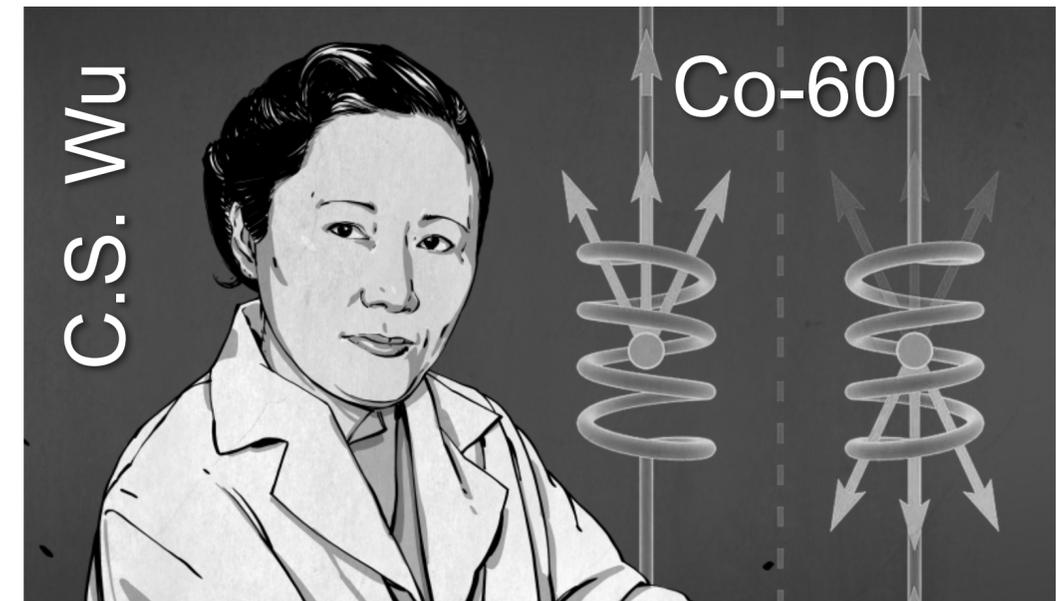
- Wu's Weihnachts-Experiment: auf der Spur der **Verletzung von P**

- 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

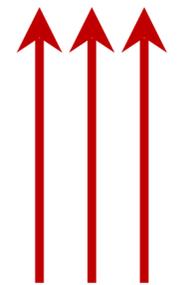


Q: LANL, pinterest

Paritätsverletzung im β -Zerfall eines Kerns

- **Wu-Experiment: sehr hohe Anforderungen an Polarisationsgrad**

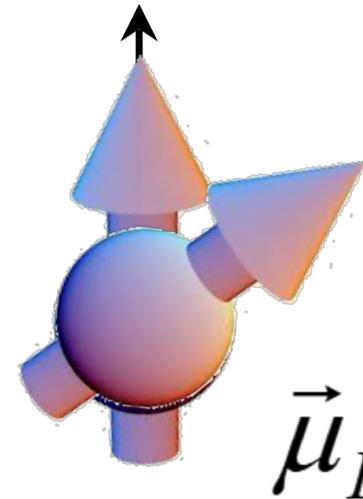
- bei **polarisierten Kernen** benötigt man ein sehr starkes Magnetfeld



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

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

$$\mu_N = 3,152\ 451\ 2250\ (15) \cdot 10^{-8} \text{ eV/T}$$



Pseudoskalar

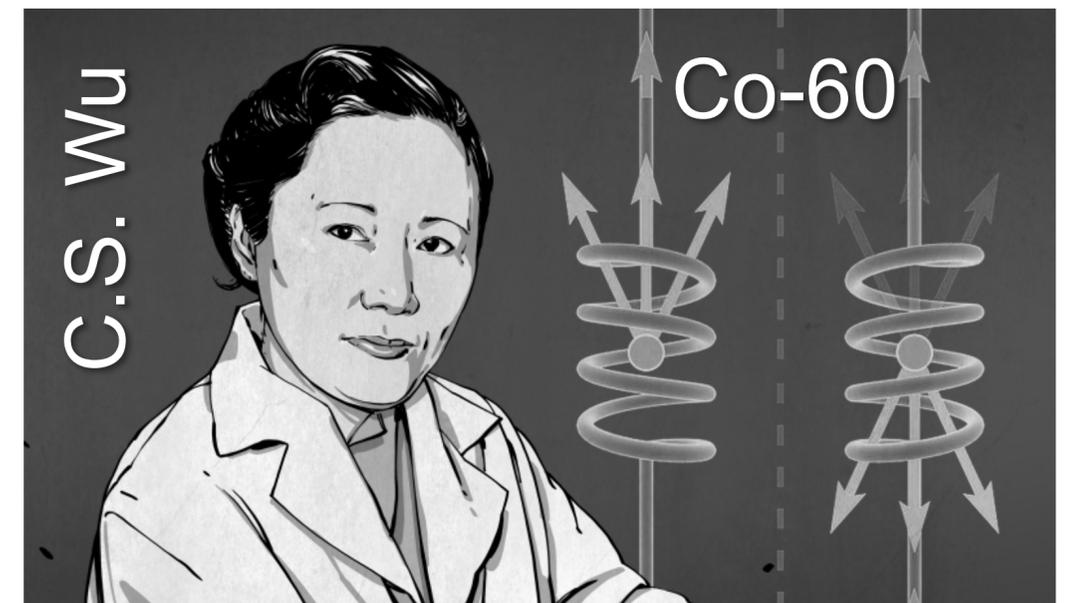
axialer
Vektor

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

polarer
Vektor

- **Kernmoment** μ_I :

$$\vec{\mu}_I \sim \mu_N \cdot \vec{I}$$



Wu: starke B-Felder & mK-Temperaturen

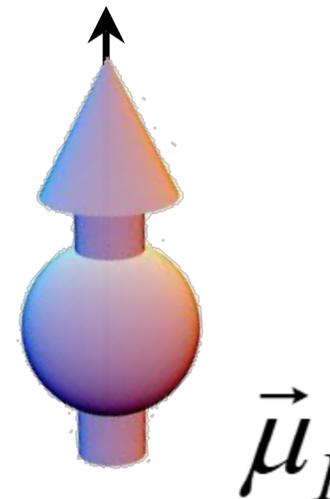
- **Ausrichtung des Spins: starke B-Felder & Kryotechnologie**

- für heutige Technologie (supraleitende Magnete, Kryostate) kein Problem



Supraleiter
starke B-Felder

Mischungskryostat
T im mK Bereich!



axialer
Vektor

Pseudoskalar

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

polarer Vektor



Wu: starke B-Felder & mK-Temperaturen

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

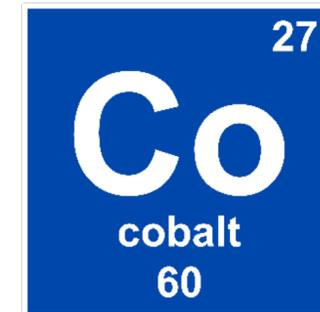
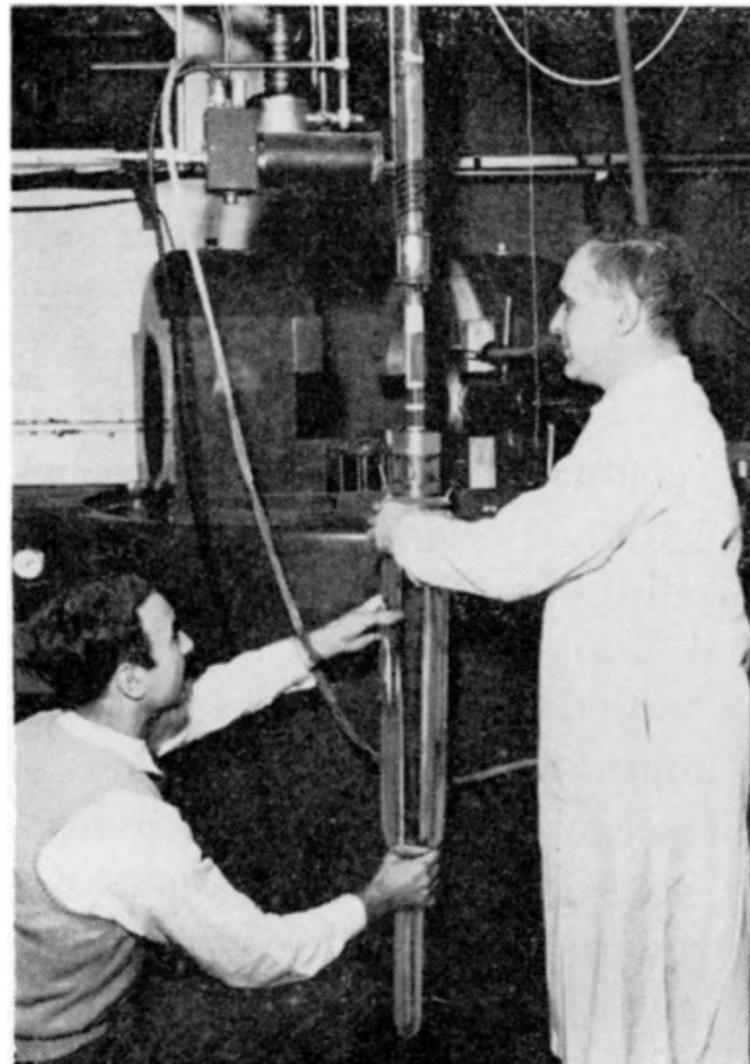
- für damalige Technologie eine echte Herausforderung!

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

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

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

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



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

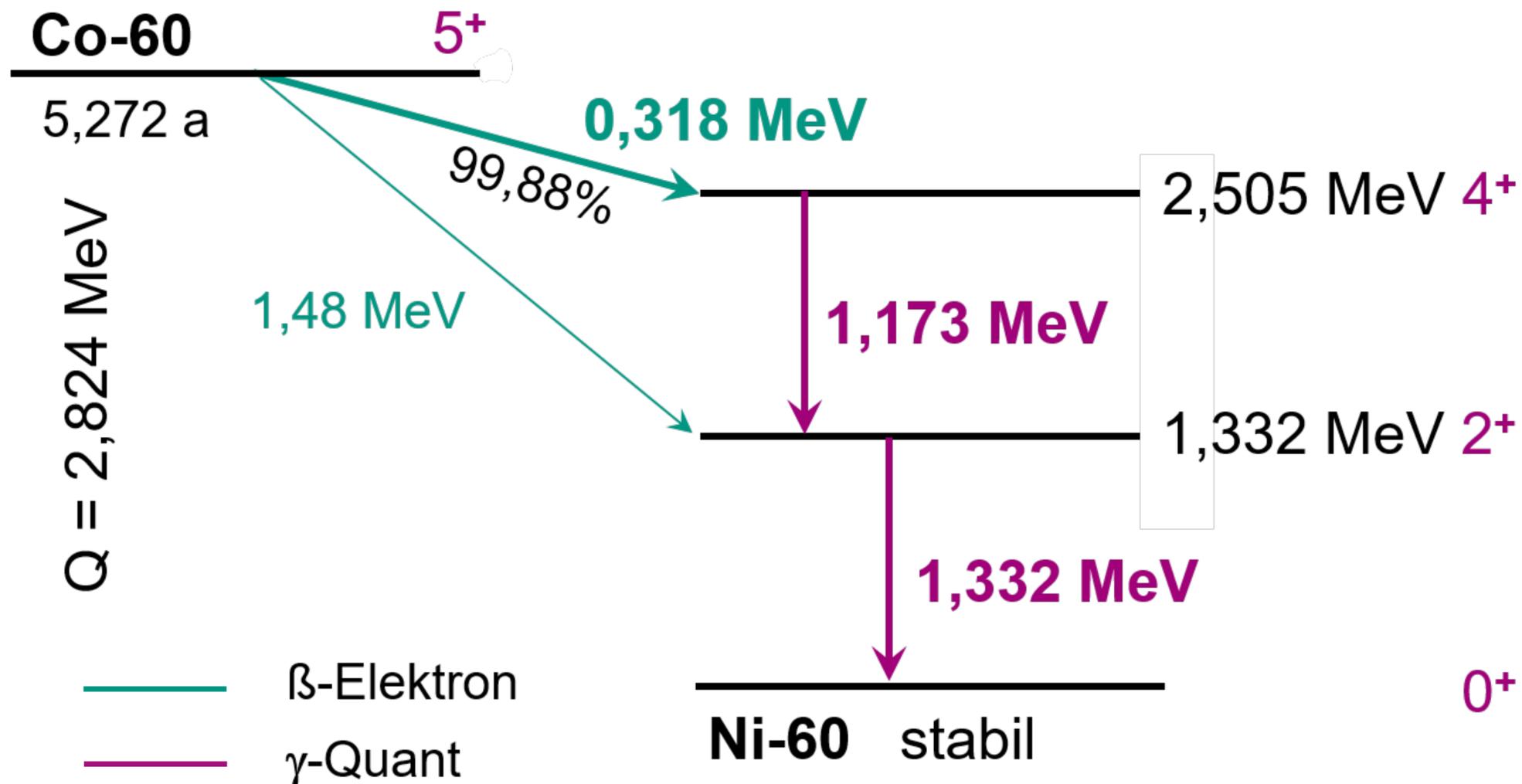


Wu: starke B-Felder & mK-Temperaturen

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



β -Zerfall mit 2 Gammas (E2)*: zeigen  an



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

