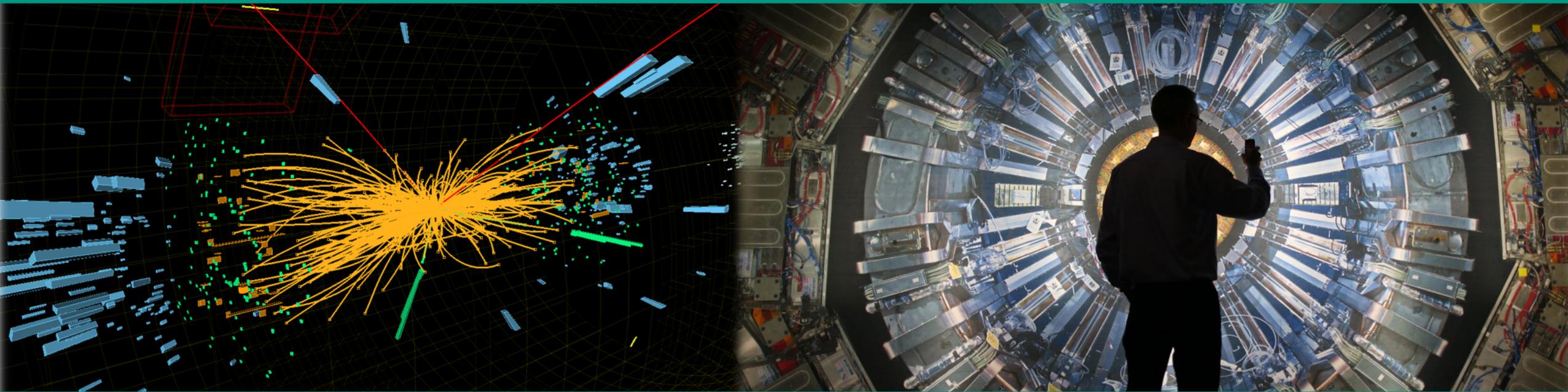


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 11

25.5.2023

Guido Drexlin & Markus Klute



Kolloquium

...



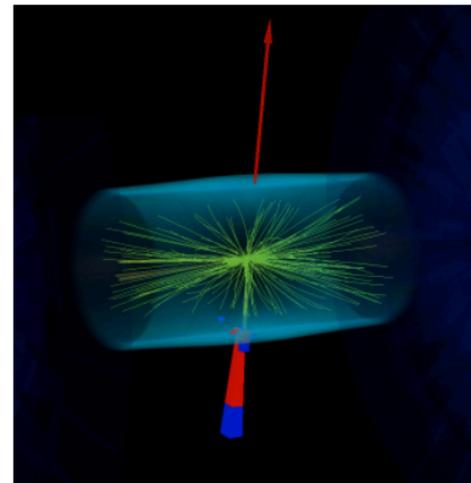
KCETA Colloquium

A shot in the dark: How CMS searches for new particles in the dark sector

Thursday, May 25, 2023
Kleiner Hörsaal A (CS) 15:45 - 17:00

Dr. Benedikt Maier
(Institute of Elementary Particle Physics, Karlsruhe Institute of Technology)

The origin of Dark Matter is one of the most pressing open questions in physics. The CMS experiment at CERN has developed a rich search program to tackle this problem, using the largest datasets at record intensities and energies as well as innovative analysis methods to obtain a long-awaited breakthrough in particle physics. This talk will highlight methods and results and give an outlook to what can be expected in the coming years.



Please note:
The colloquium will also be live-streamed to B401 SR 410 (CN).

14.07. 15:45

Prof. Dr. Hartmut Zohm

Leiter des Bereichs Tokamak-Szenario-Entwicklung



Hartmut Zohm, geboren am 2. November 1962 in Freiburg, ist seit 1999 wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik und Leiter des Bereichs Tokamak-Szenario-Entwicklung (früher Experimentelle Plasmaphysik 2). Für seine Doktorarbeit "Investigation of Magnetic Modes in the ASDEX Tokamak" wurde er 1991 mit der Otto-Hahn-Medaille der Max-Planck-Gesellschaft ausgezeichnet. Nach einem Auslandsaufenthalt in San Diego bei General Atomics habilitierte Hartmut Zohm 1996 an der Universität Augsburg im Fach Experimentalphysik. Von 1996 bis 1999 lehrte er als Professor für Elektrotechnik und Plasmaforschung an der Universität Stuttgart.

1999 kehrte er als Wissenschaftliches Mitglied an das IPP zurück. Seit 2003 ist er Honorarprofessor (Physik) an der Ludwig-Maximilians-Universität München. 2014 wurde er mit dem John Dawson Award der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft

ausgezeichnet, 2016 mit dem Hannes-Alfvén-Preis der Europäischen Physikalischen Gesellschaft. Seit 2016 ist Hartmut Zohm Fellow der American Physical Society.

Programm heute

Kapitel 5 - Symmetrien und Erhaltungssätze

5.1. Einführung

5.2. Diskrete Symmetrien P, C, T

5.3. Schlüsselexperiment zu C, P and CP - Verletzung

Recap: Kernfusion & Erhaltungszahlen

■ Kernfusion & Nukleare Astrophysik

- Fusion: **Tunnelprozess** durch Coulombwall, in Sternen: **Gamow-Peak**
- **Big Bang Nukleosynthese**: Elementsynthese in 3 min. zu D , ${}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}$, ...
- schwere Elemente $A > 56$: n-Anlagerung im **r-Prozess** / **s-Prozess** (SNe)

■ Symmetrien & Erhaltungszahlen

- **globale** Symmetrie $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x) \cdot e^{i\alpha}$ & **lokale** Symmetrie $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x) \cdot e^{i\alpha(x)}$
- **kontinuierlich**: additive Quantenzahlen Q , ... **diskret**: multiplikativ P , C , ...
- Suche nach **Baryonenzahlverletzung**, Verletzung von L ($0\nu\beta\beta$)

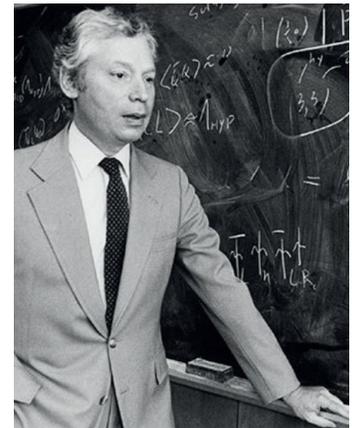
Verletzung von B und L , nachgefragt von Steven

■ Erhaltung der Baryonenzahl und Leptonenzahl im SM & bei GUTs

A) Erhaltung von B und L im SM wohlbegründet durch eine intrinsische Symmetrie der Raumzeit (Noether-Theorem)

B) Erhaltung von B und L ist eine empirische Beobachtung, bisher keine Verletzungen dieser Quantenzahlen experimentell nachgewiesen

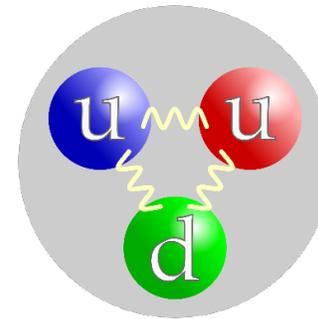
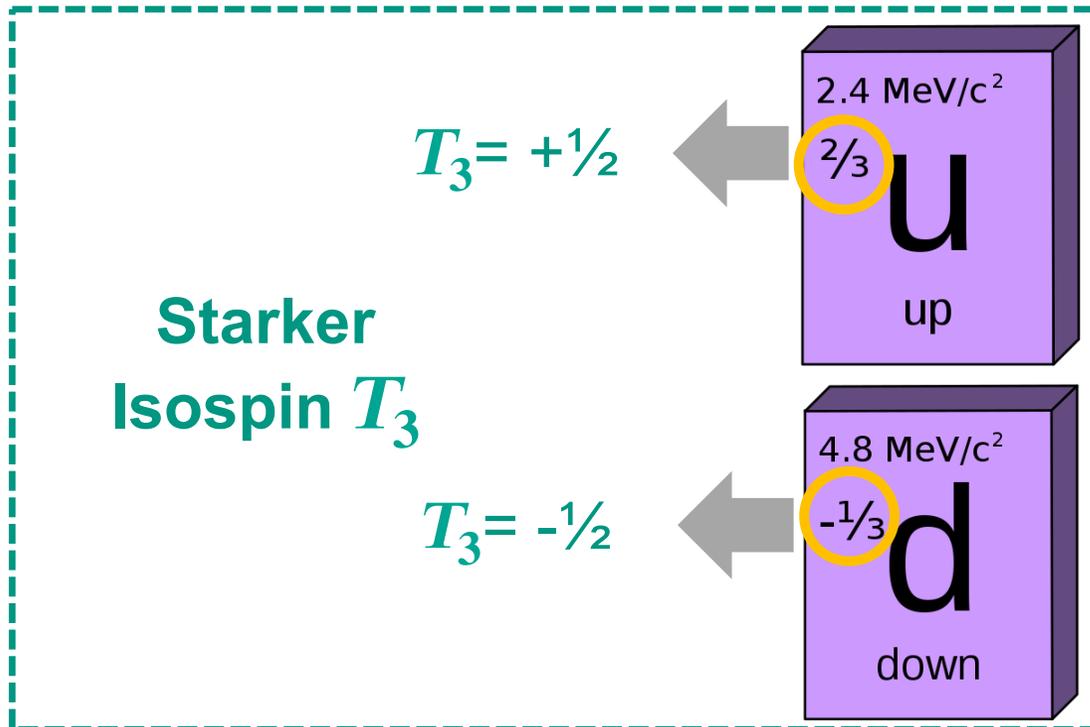
Verletzung von B und L möglich bei **Grand Unified Theories (GUTs)**, dabei aber Erhaltung von $B - L$ via globaler Symmetrie $U(1)_{B-L}$



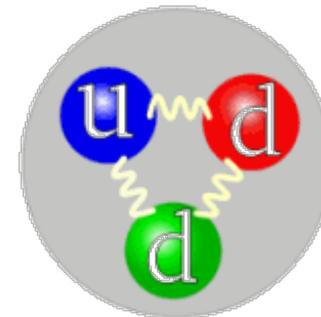
Steven Weinberg

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

- Flavourquantenzahlen** der Quarks: gleiches Vorzeichen wie Ladung Q
 - historischer 'Spezialfall' up- & down Quark: Quantenzahl via Isospin p, n



Proton uud : $T_3 = +\frac{1}{2}$



Neutron udd : $T_3 = -\frac{1}{2}$

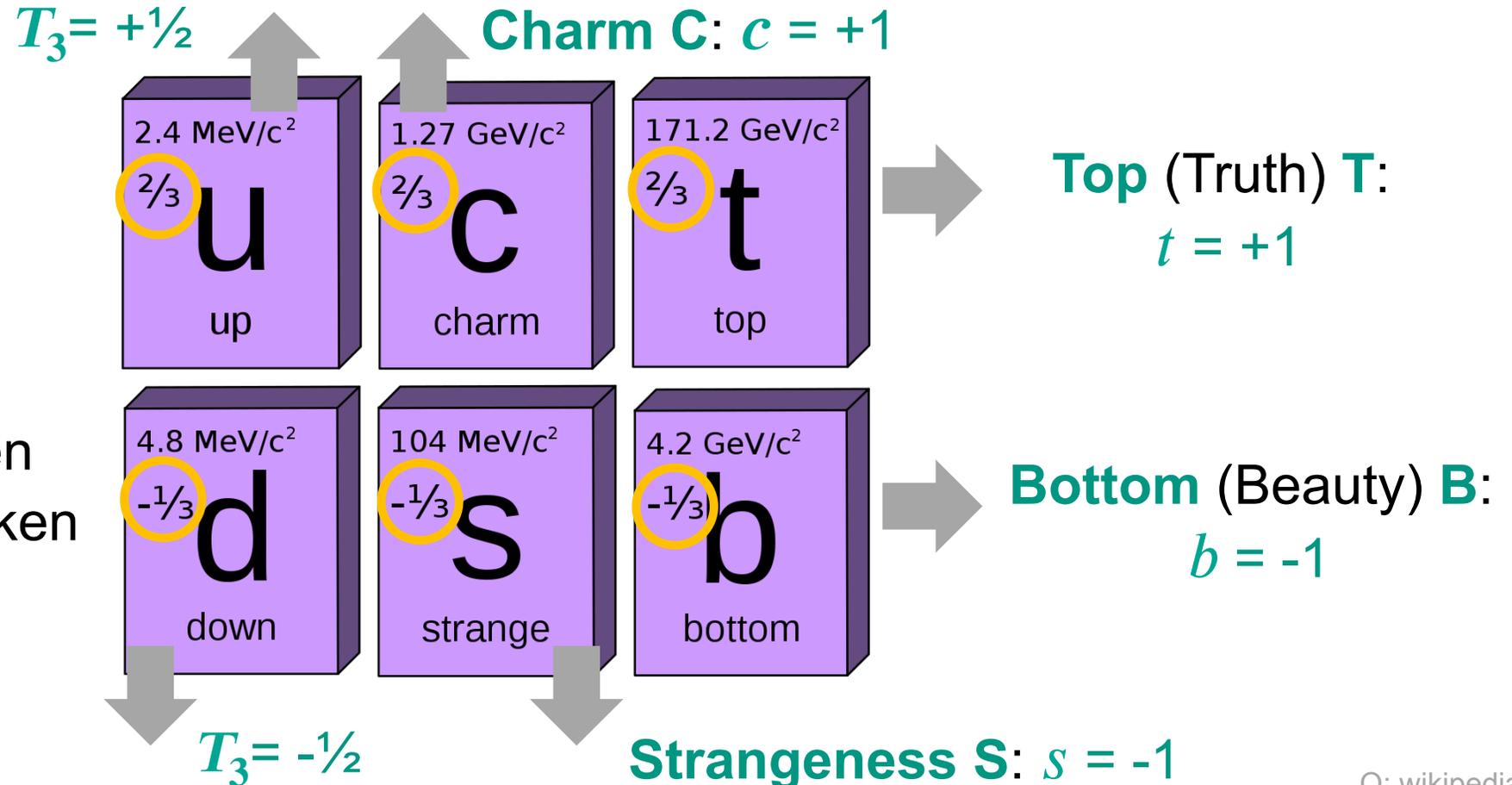
- starker Isospin* auch für weitere Baryonen, z.B. Δ^{++} (uuu) $\Leftrightarrow T_3 = +\frac{3}{2}$ Q: wikipedia

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

- **Flavourquantenzahlen** der Quarks: gleiches Vorzeichen wie Ladung Q

- QCD:
eine globale
Flavour-Symmetrie

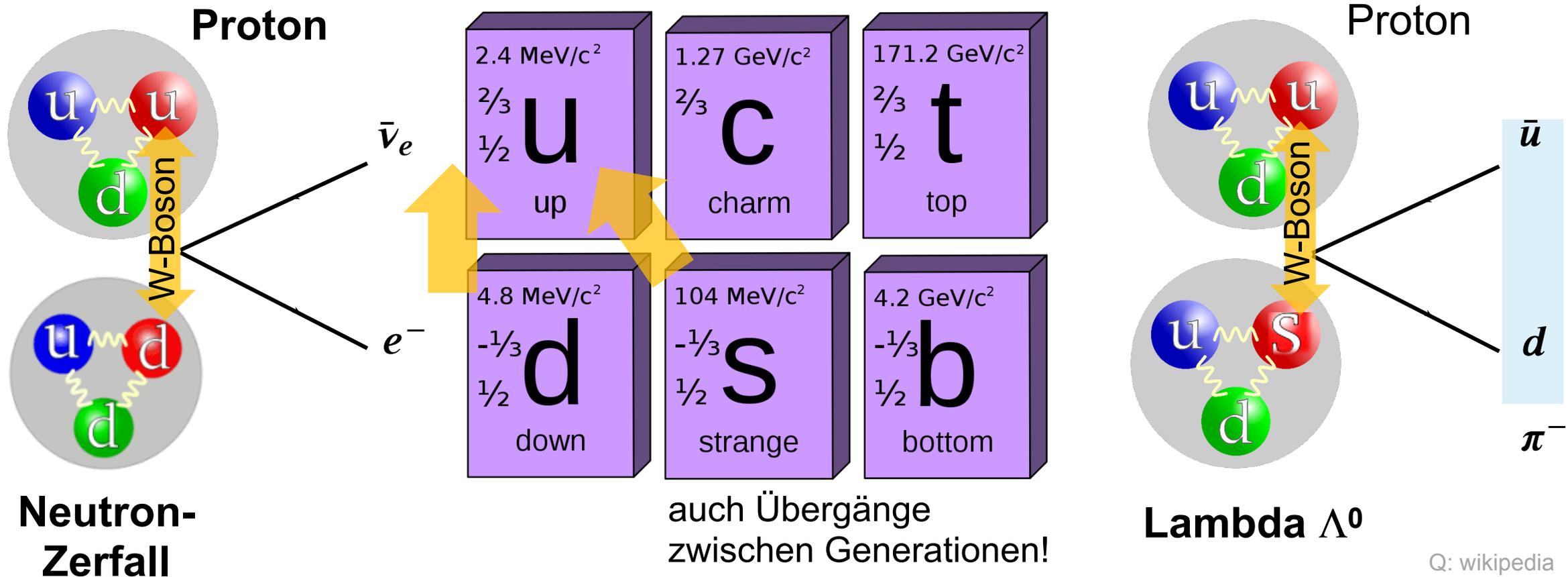
Implikation \Rightarrow
die Quarkflavours
sind erhalten in allen
Prozessen der starken
Wechselwirkung



Q: wikipedia

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

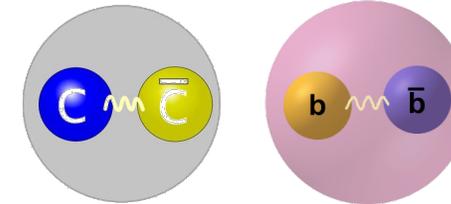
- **Flavourquantenzahlen** der Quarks: schwache Wechselwirkung ändert die Quark-Flavours (\Rightarrow gebrochene Flavour-Symmetrie)!



Q: wikipedia

Nachweis der Quarkflavours: Ausblick

Erzeugung der Quarkflavours an Collidern



- **niedrige Energien:** $2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ **u** up, $4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ **d** down, $104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ **s** strange

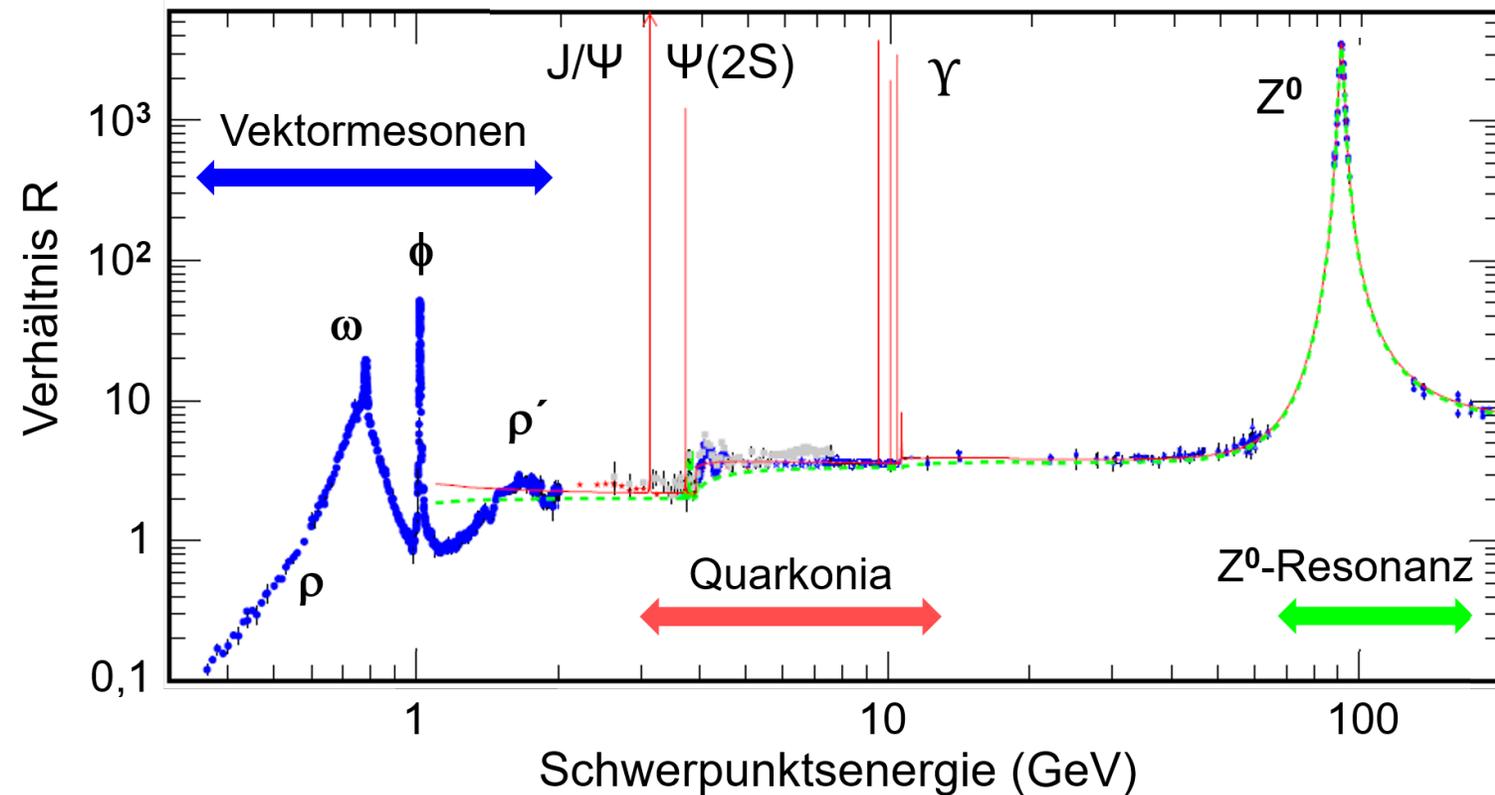
leichte Quarks manifestieren sich in **Mesonen**, Baryonen

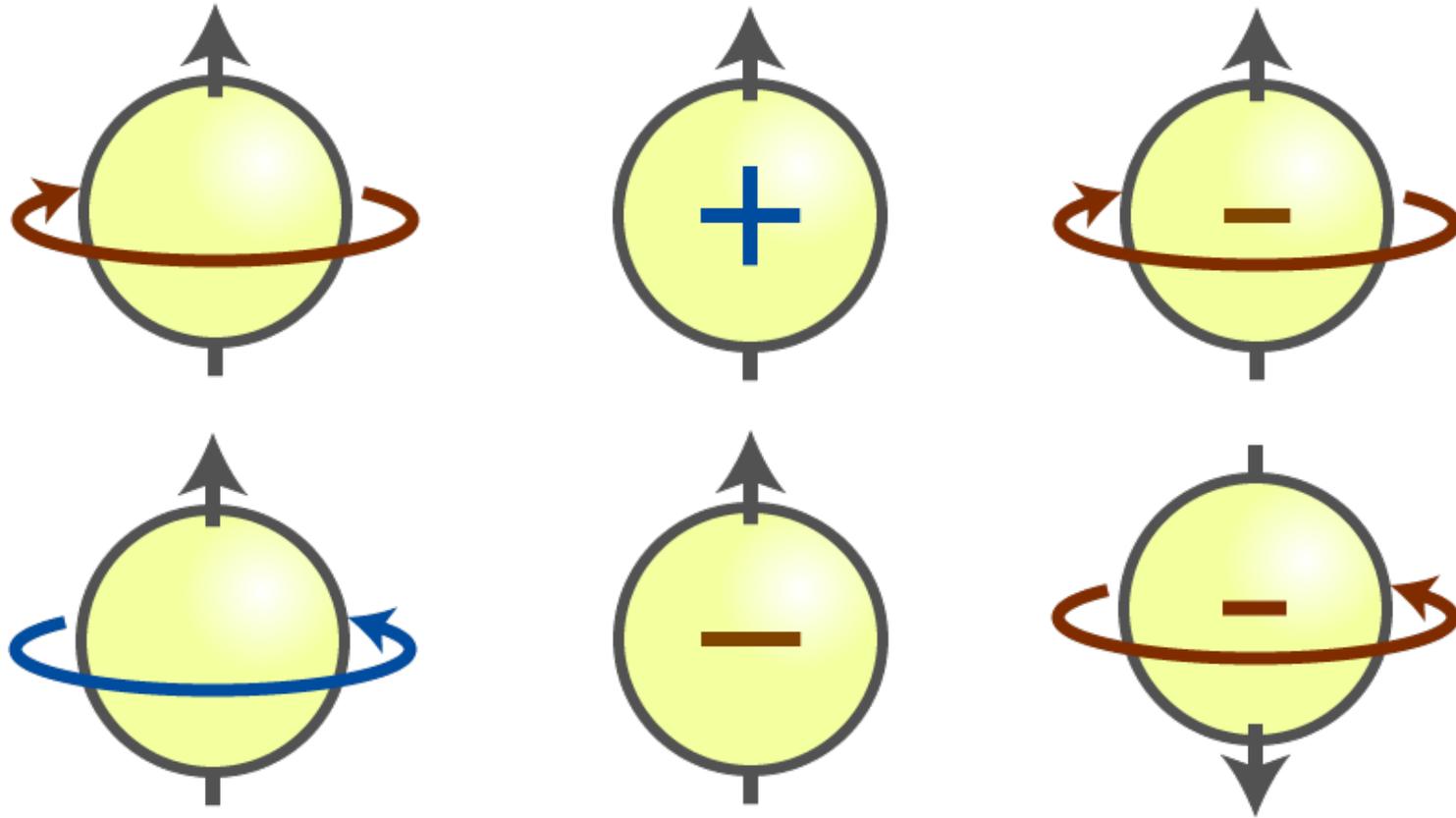
- **mittlere Energien:** $1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ **c** charm, $4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ **b** bottom

Quarkonia **J/ψ**, **Υ** und Anregungen – gebundene Zustände

- **hohe Energien:** $171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ **t** top

top/anti-top Produktion, keine gebundenen Zustände





KAPITEL 5.2 DISKRETE SYMMETRIEN

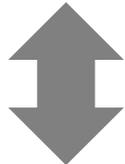
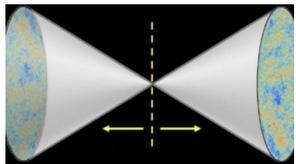
P, C, T

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!



W. Pauli

Spin-Statistik-

Theorem:

Fermionen & Bosonen



Diskrete Symmetrien im Standardmodell

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

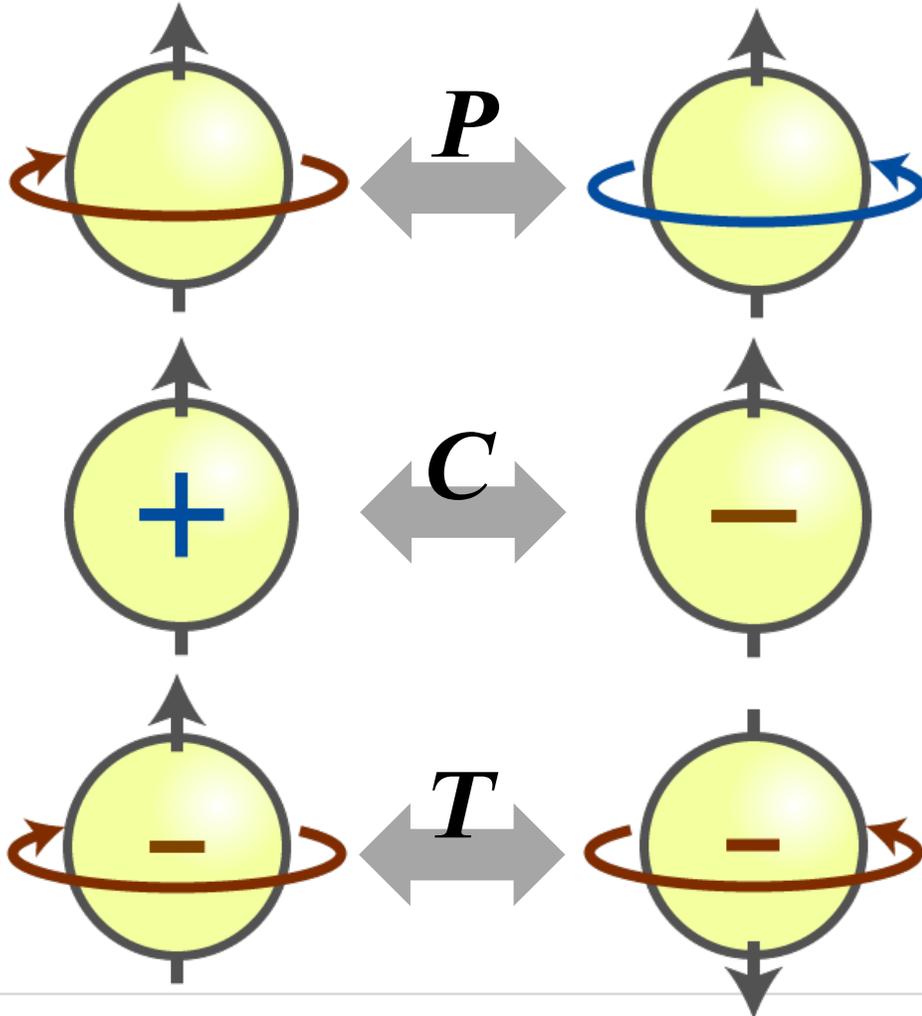
⇒ multiplikative Quantenzahlen

- 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



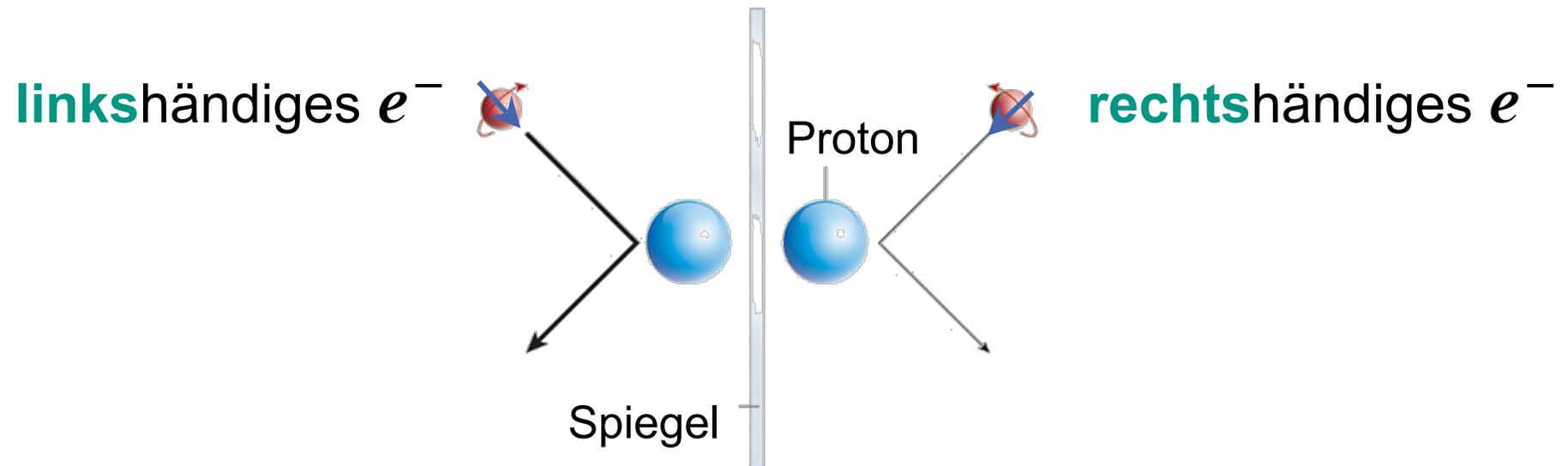
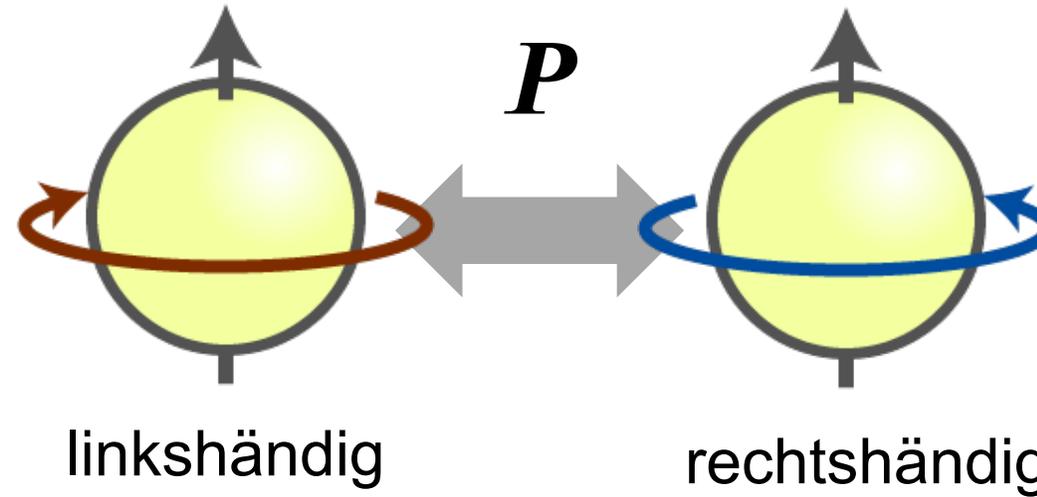
Parität P : physikal. Prozesse unverändert bei **Punktspiegelung** am Ursprung ($\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$)
→ Unterscheidung der **Händigkeit**

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



©nature

Parität P & Spiegelbild

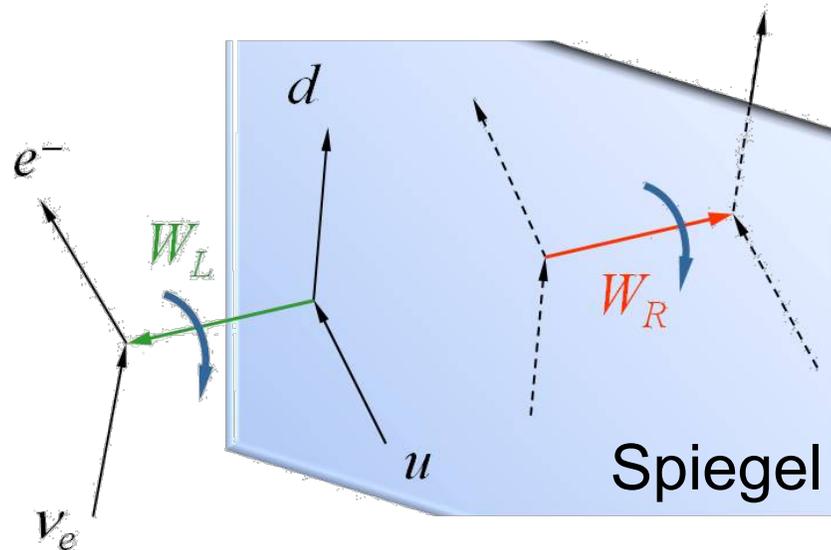
- Paritätsoperation P : räumliche Spiegelung am Ursprung

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

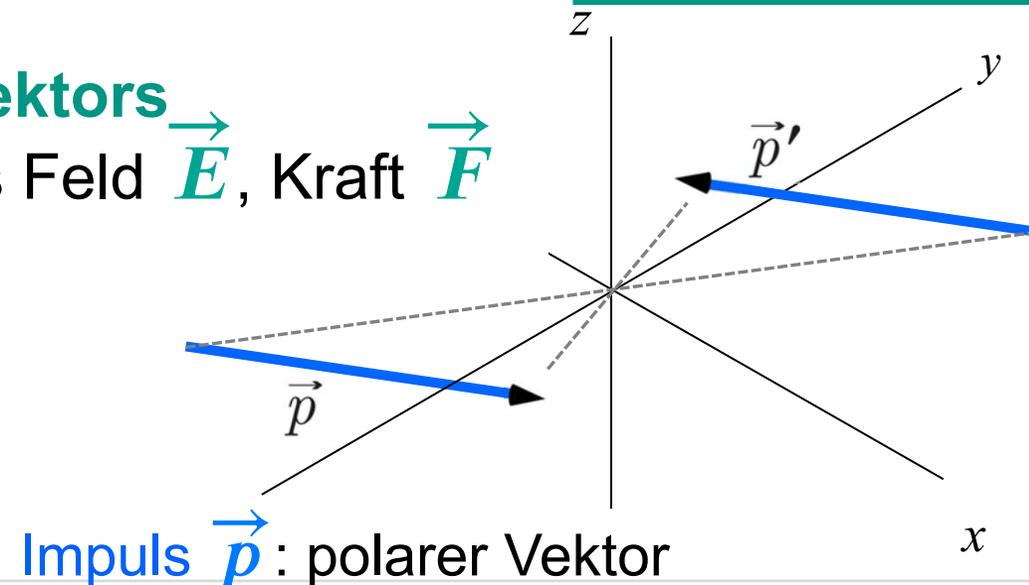
- Paritätsoperation P : räumliche Spiegelung am Ursprung

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}

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



Recap: Parität bei axialen Vektoren

■ Paritätsoperation P – Auswirkung auf Spin, Drehimpuls

- axialer Vektor:

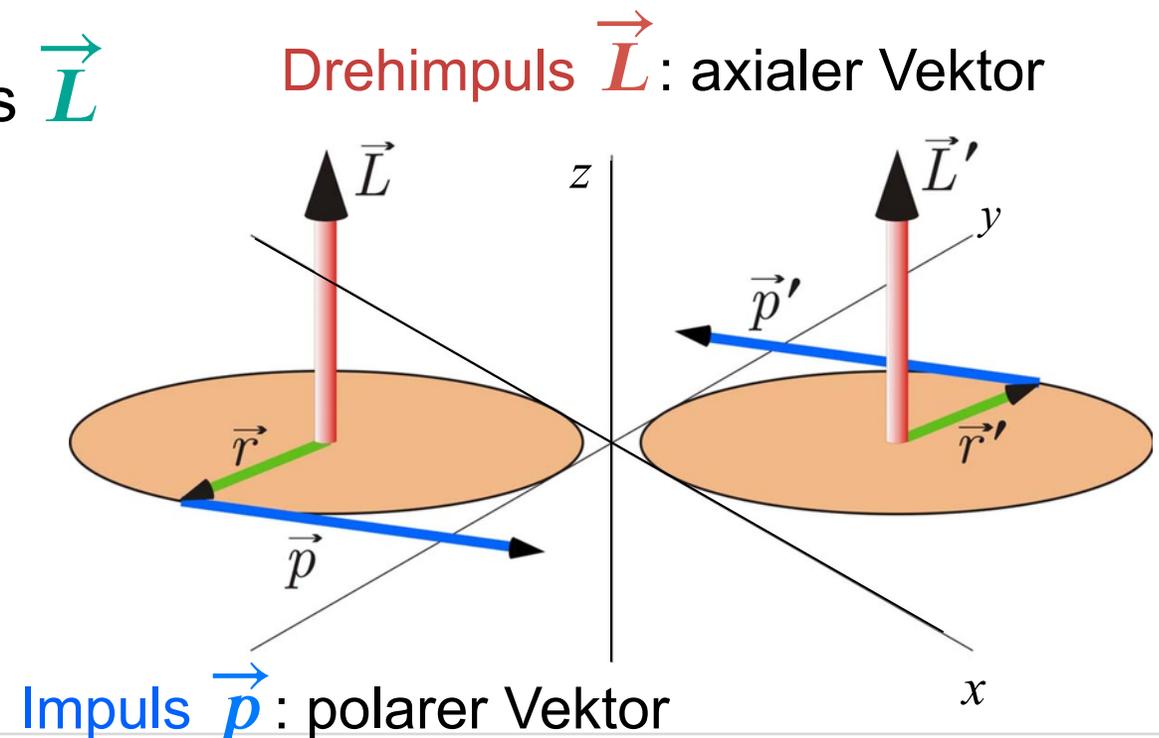
nicht geändertes Vorzeichen des (Pseudo-) Vektors nach Paritätsoperation

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

- Magnetfeld \vec{B}

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

Q: F. Grossmann, TU Dresden



Eigenparität von Teilchen – Fermionen

■ 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:** $P(\pi^+, \pi^-) = -1$

Eigenparität von Mesonen

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

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

⇒ relativer Drehimpuls des $q\bar{q}$ Paars

- '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): $J^P = 1^-$

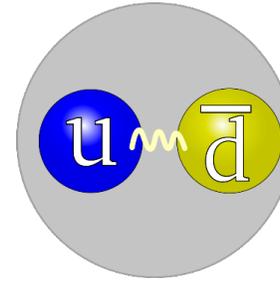
Spin = 1 ($\uparrow\uparrow$), rel. $q\bar{q}$ Bahndrehimpuls $\ell = 0$

Mesonstruktur
später

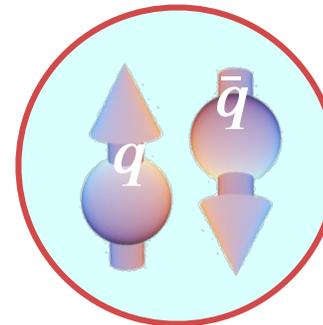
Eigenparität von Mesonen, nachgefragt

- 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 $\ell = 0$

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

Parität – multiplikative Erhaltungsgröße

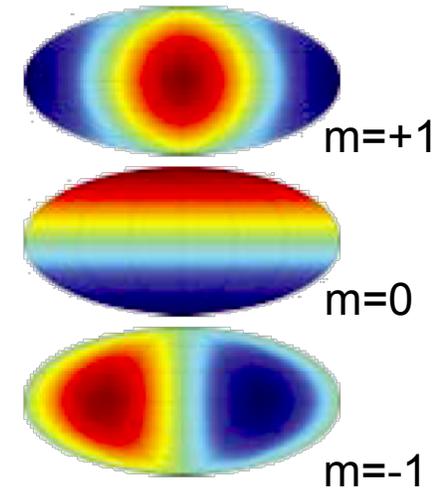
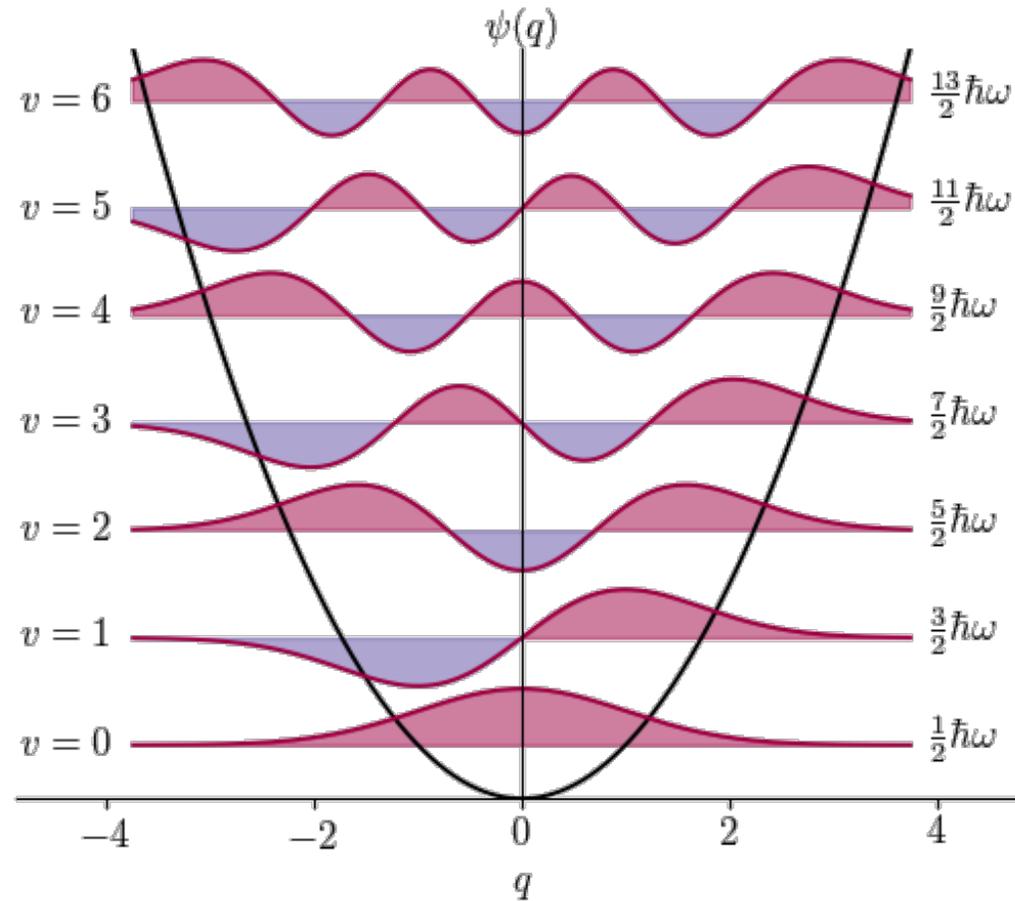
- **Gesamtparität P eines Systems von Teilchen: multiplikativer Charakter**

- 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 in der QM: der harmonische Oszillator

- Parität P einer Wellenfunktion

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

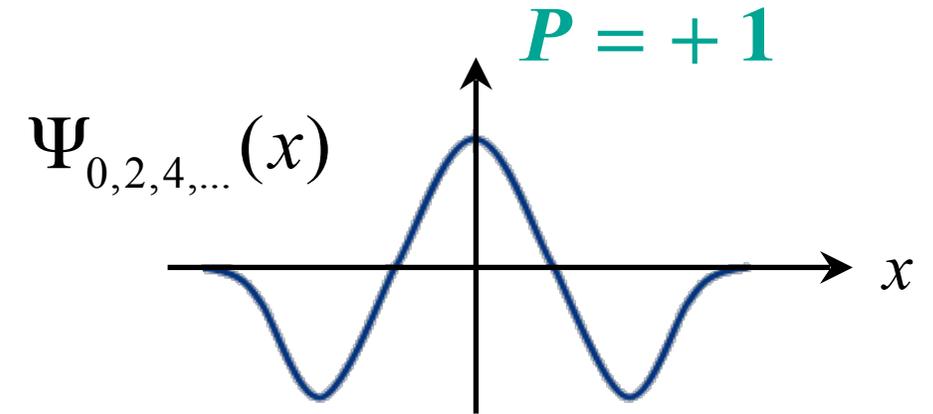
↑
unitärer Operator

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

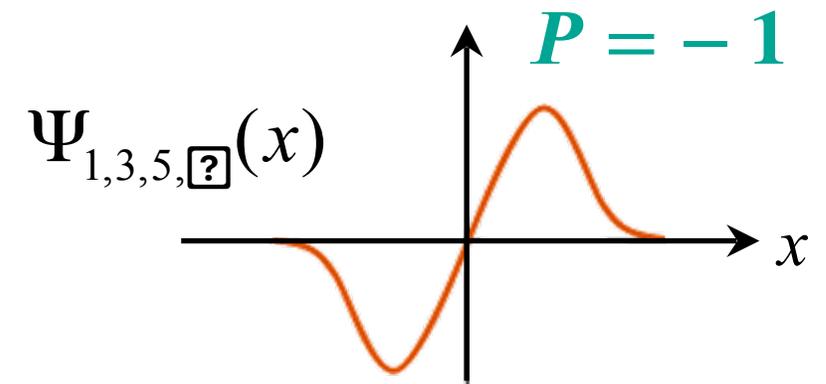
- symmetrisch: $P = +1$

- antisymmetrisch: $P = -1$

symmetrisch (gerade, **even**)



antisymmetrisch (ungerade, **odd**)



Parität in der QM: der harmonische Oszillator

- Parität P = multiplikative Symmetrie

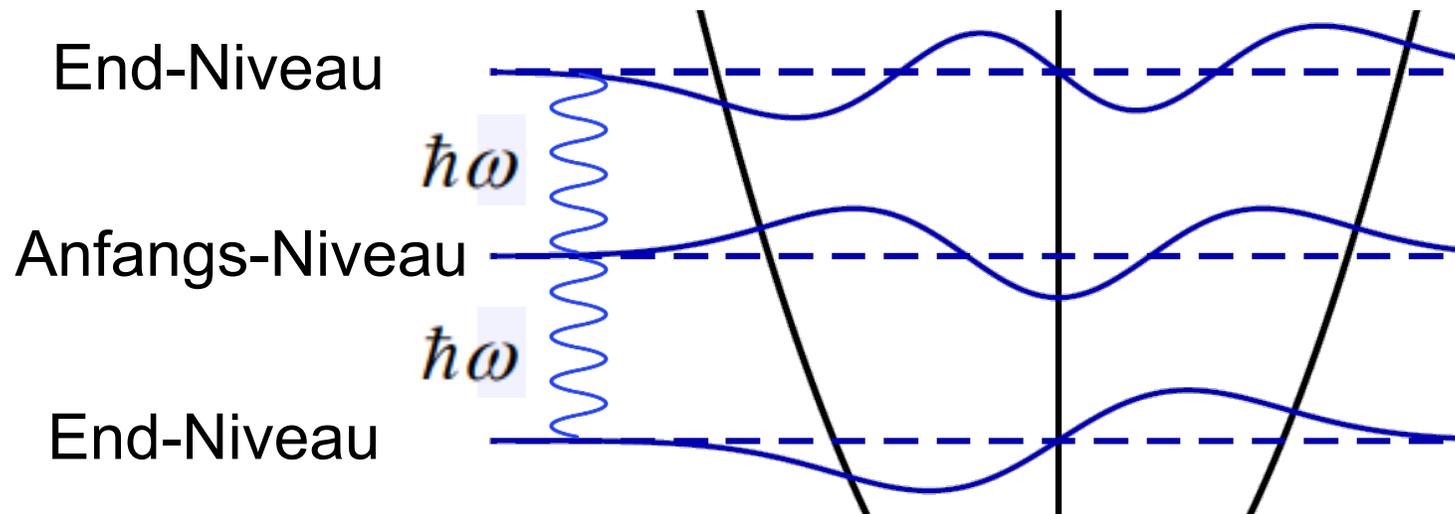
$$P(\Psi_n) = P(\Psi_{n+1,n-1}) \cdot (-1)^1$$

P (Photon/Photonen)

Eigenparität eines Photons:
 $P = -1$

Parität des
Anfangs-Niveaus

Parität des
Endzustands



Photon	
Masse	$m = 0$
Spin	$S = 1$
Parität	$P = -1$



negative
Eigenparität

Q: semibyte.de

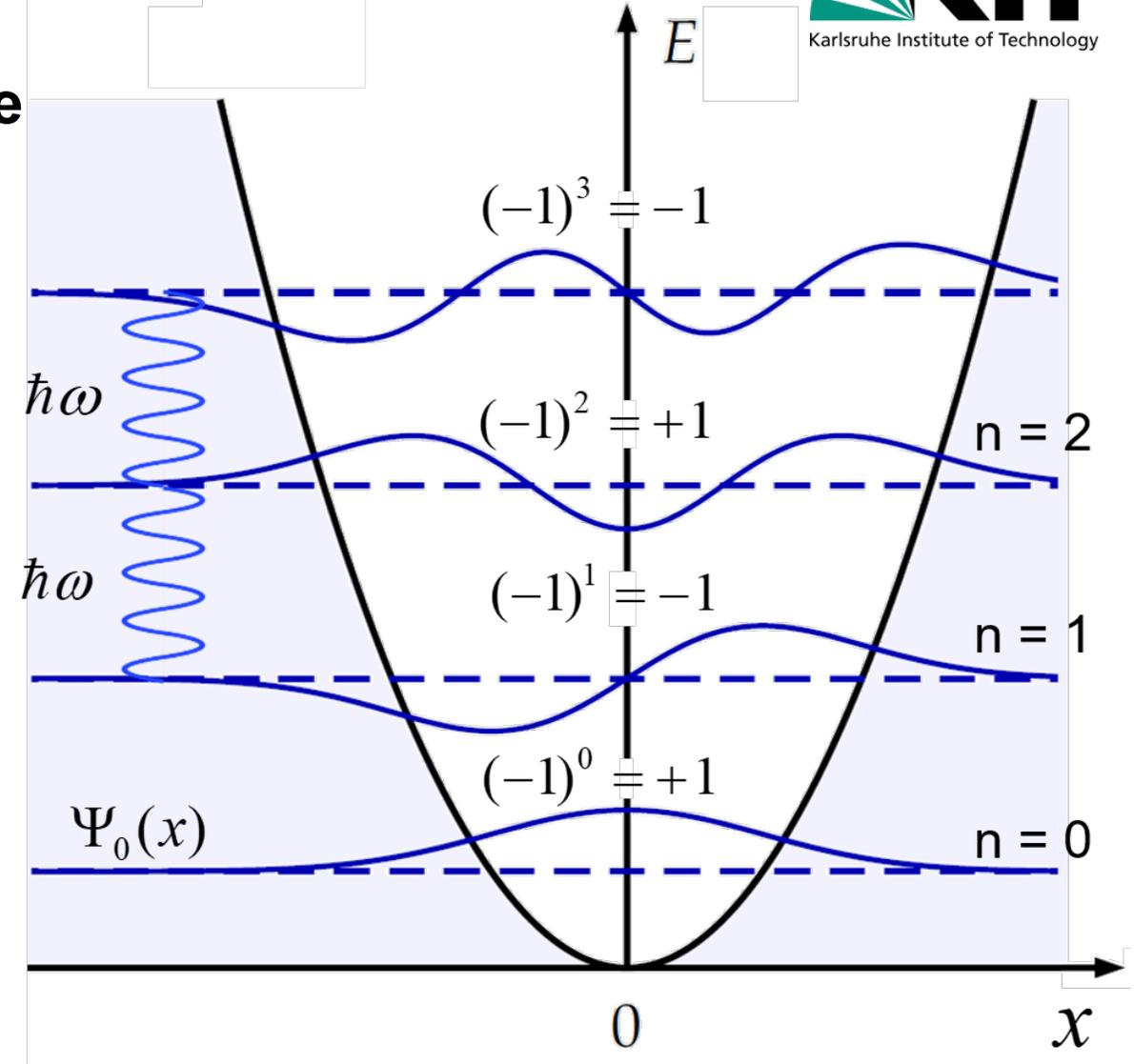
Parität in der QM: der harmonische Oszillator

- Parität $P =$ multiplikative Symmetrie

Parität bleibt erhalten bei der elektromagnetischen Wechselwirkung

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

symmetrische & antisymmetrische Zustände wechseln sich ab



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

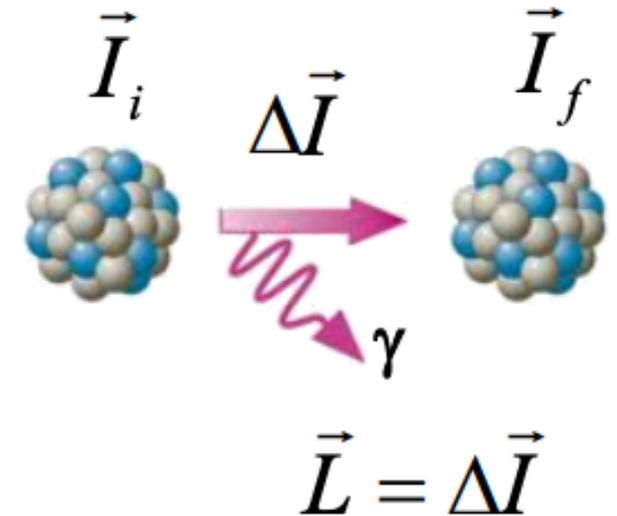
- Gamma trägt Drehimpuls \vec{L} weg
- Bestimmungsgleichung für $|\vec{L}|$

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

- niedrigste **Multipol-Ordnungen**:

$L = 1$	Dipolstrahlung	}
$L = 2$	Quadrupolstrahlung	
$L = 3$	Oktupolstrahlung	

Multipolarität 2^L
Eigenwert



Multipol-Übergänge bei Gammas

■ 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:

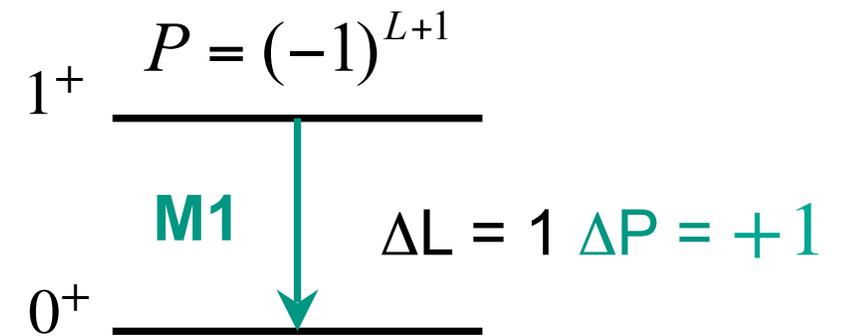
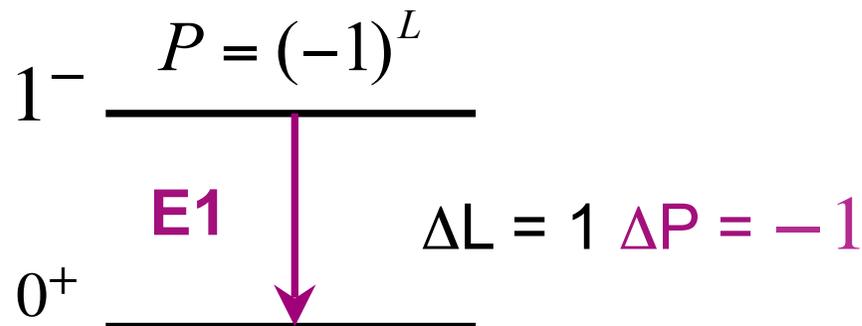
$$EL : P_i = (-1)^L \cdot P_f$$

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

Multipol-Übergänge bei Gammas

■ Auswahlregeln für Gammaübergänge

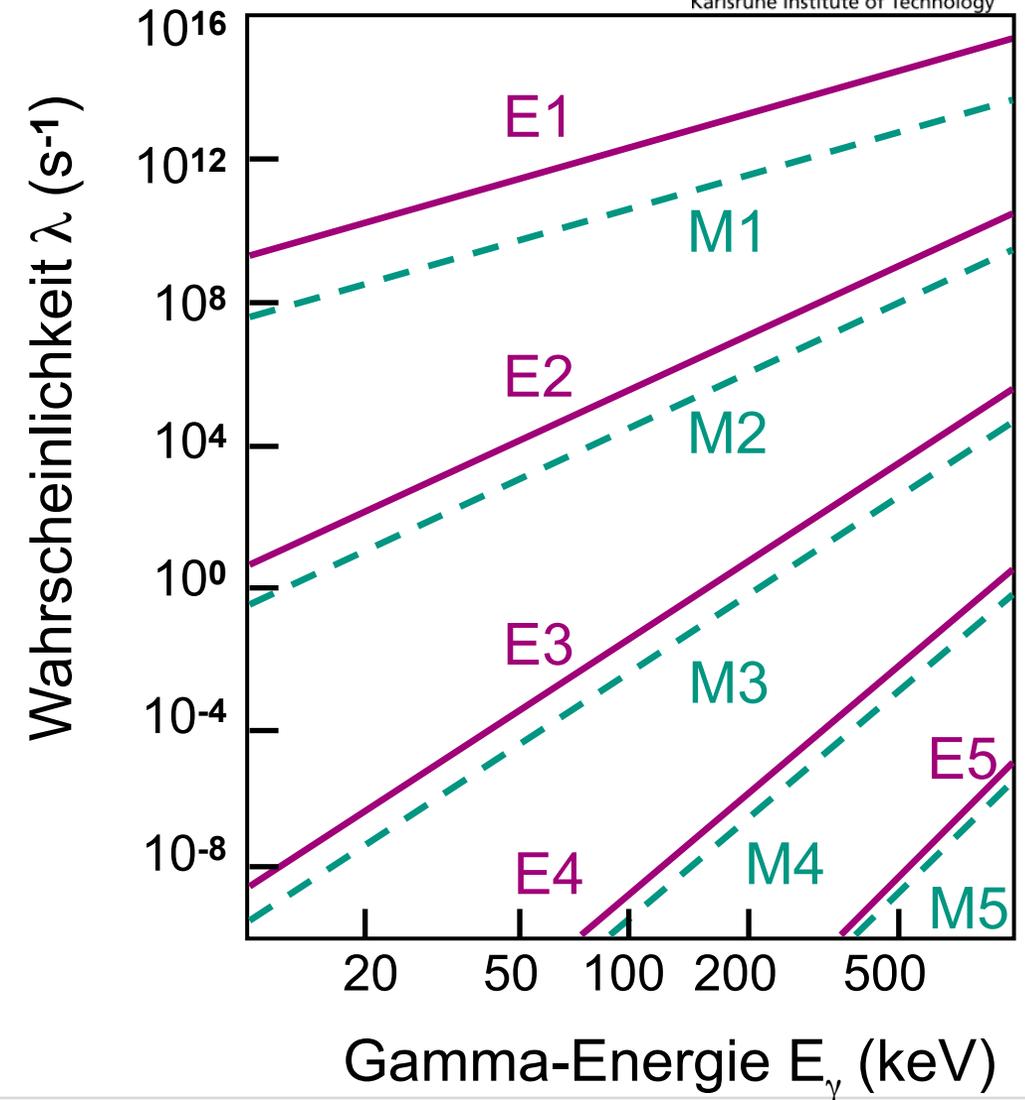
Multipol ℓ	elektrisch		magnetisch			
	$E\ell$	$ \Delta J $	ΔP	$M\ell$	$ \Delta J $	ΔP
Dipol	E1	1		M1	1	
Quadrupol	E2	2		M2	2	
Oktupol	E3	3		M3	3	



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**

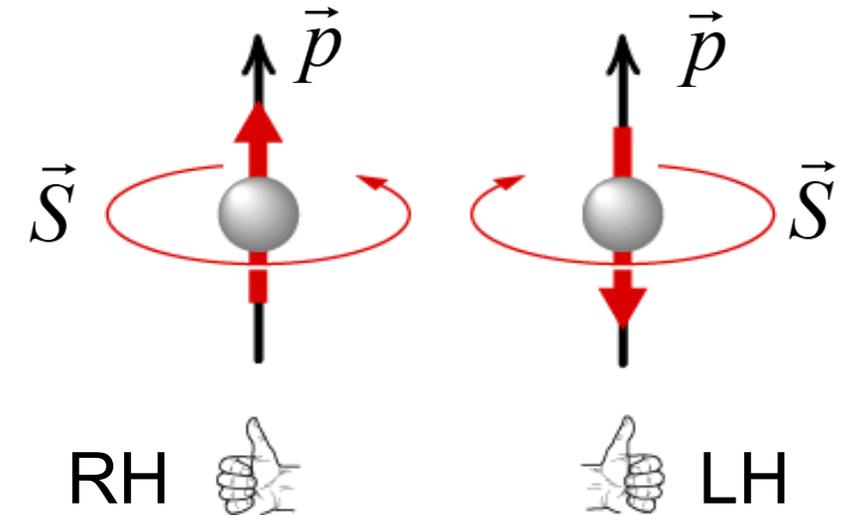


Parität und Händigkeit von Teilchen

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

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

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



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

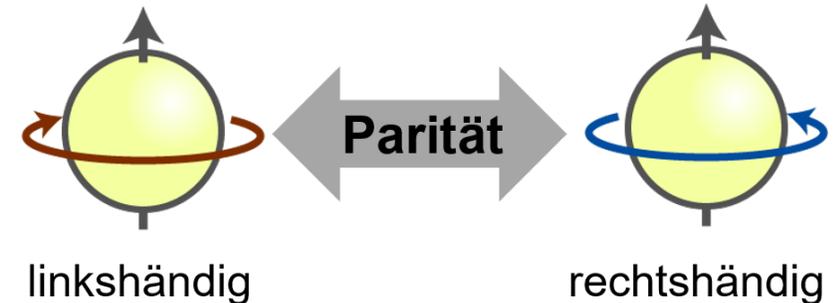
Parität und Händigkeit von Teilchen

- 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

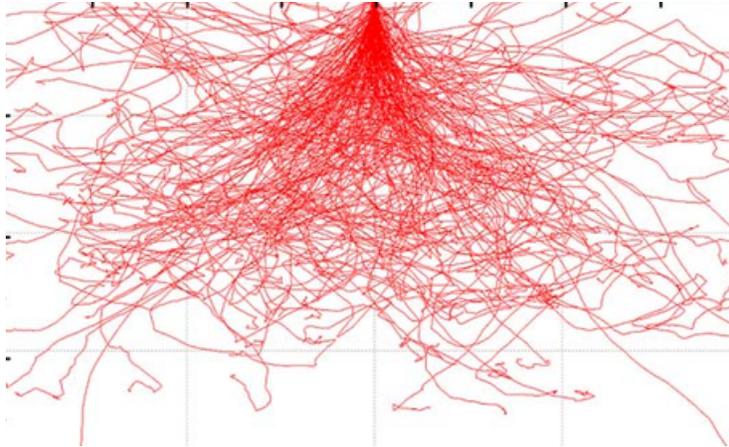


- pseudoskalare Größe:
geändertes Vorzeichen des Pseudoskalars nach Paritätsoperation
- Helizität (Händigkeit) eines Teilchens: Beispiel eines Pseudoskalars

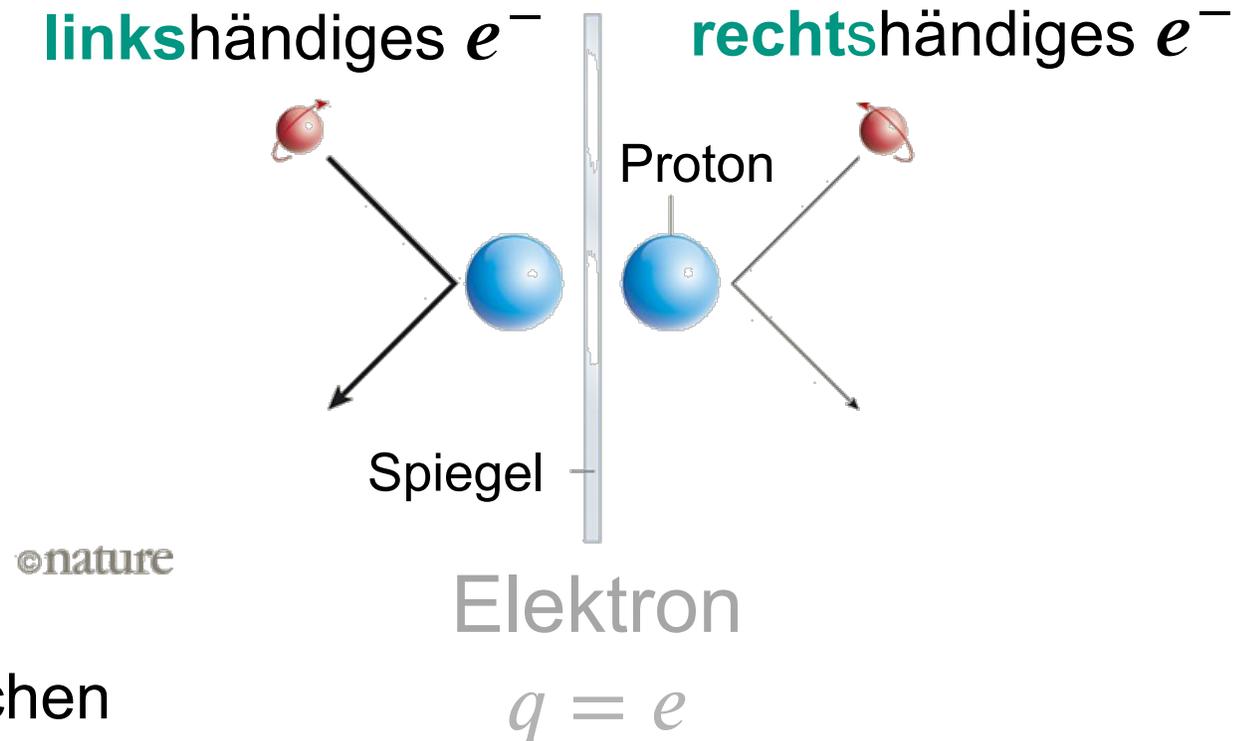
Parität und Händigkeit von Teilchen

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

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

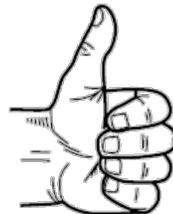
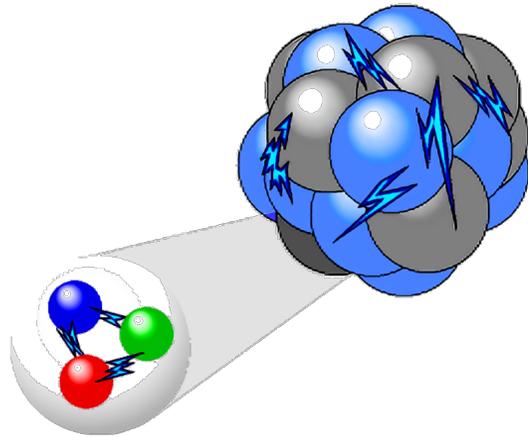


- **linkshändiges Elektron & rechtshändiges Elektron**: gleiche Ladung e , gleiche elektromagnetische Ww. von 2 Teilchen

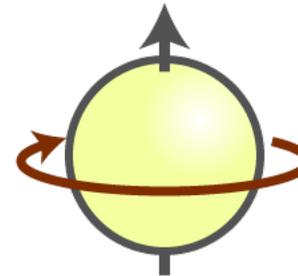


Parität und Händigkeit von Teilchen

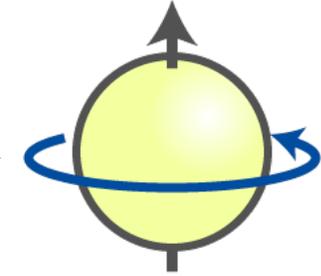
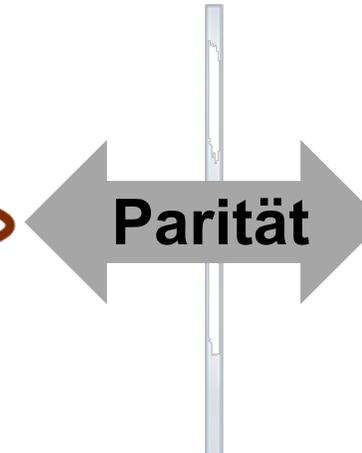
- Paritätsoperation P – ändert die Händigkeit eines **Neutrons**
 - **Helizität h** : keine relevante Größe bei Prozessen der starken Wechselwirkung



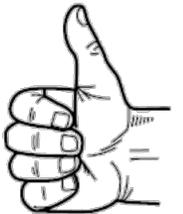
LH



linkshändig



rechtshändig



RH

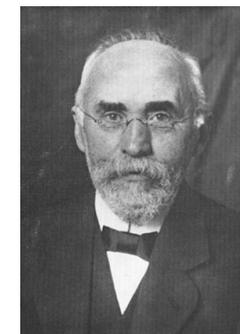
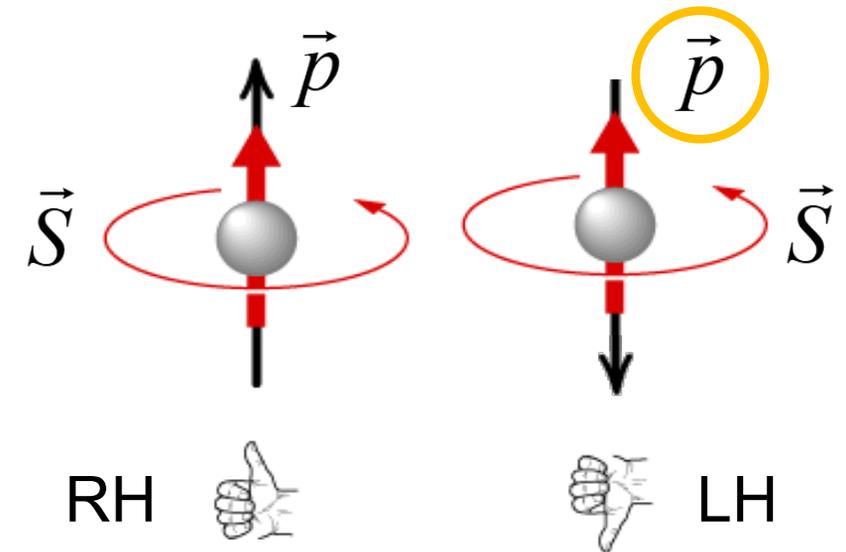
Neutron

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

Helizität von Teilchen & Lorentzinvarianz

■ 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 $S = 1/2$

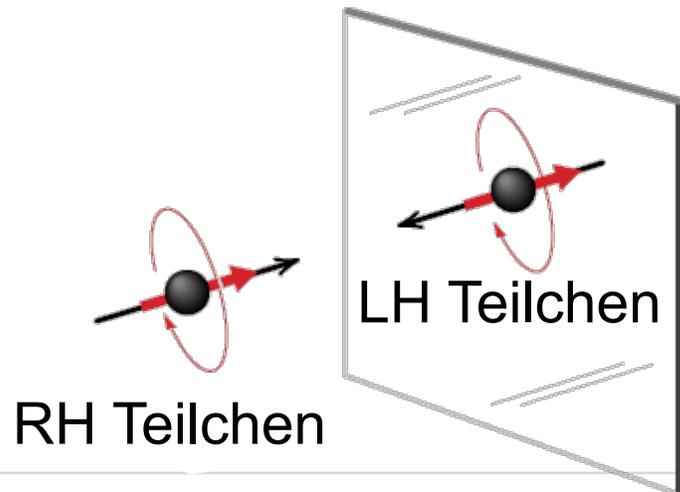
- Massebehaftete **Spin-1/2** Teilchen

- **4 Zustände** mit
 \vec{p} = Impuls \vec{S} = Axialvektor

RH, LH Teilchen

RH, LH Antiteilchen

- Helizität = Pseudoskalar

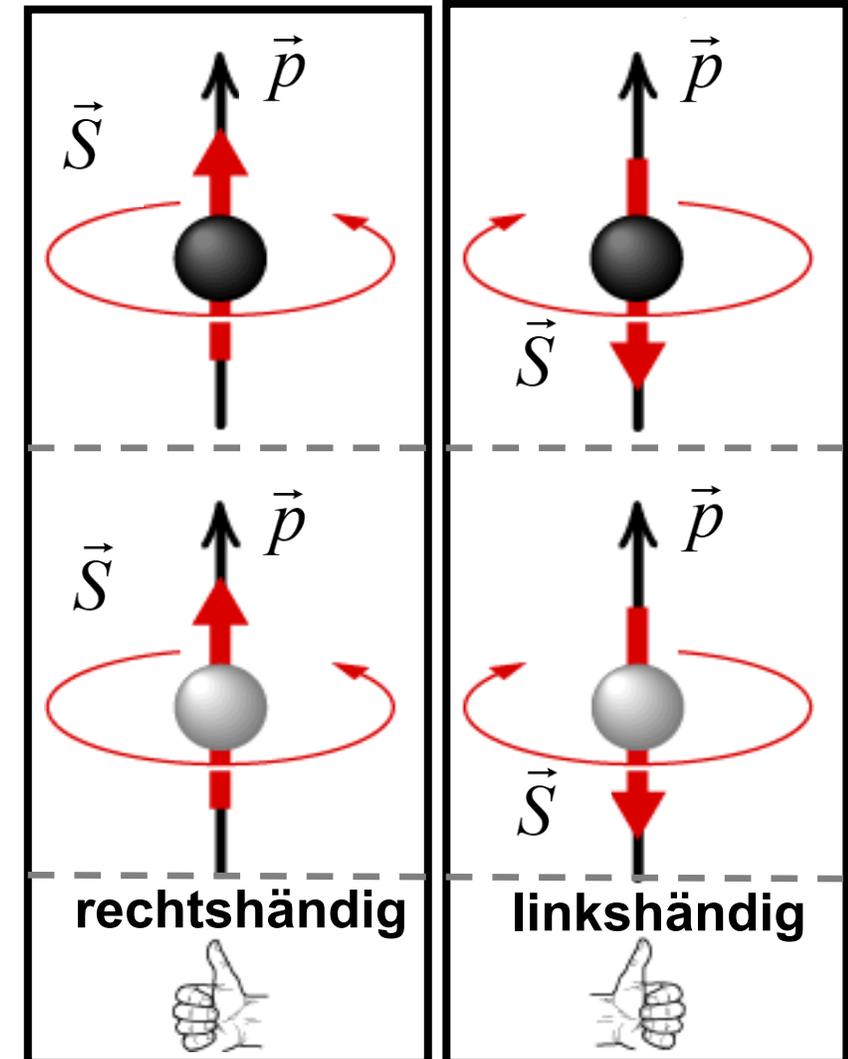


Teilchen

e^- , μ^-
 u , d , p , n

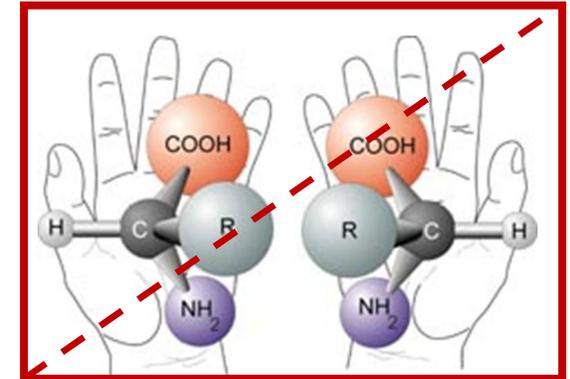
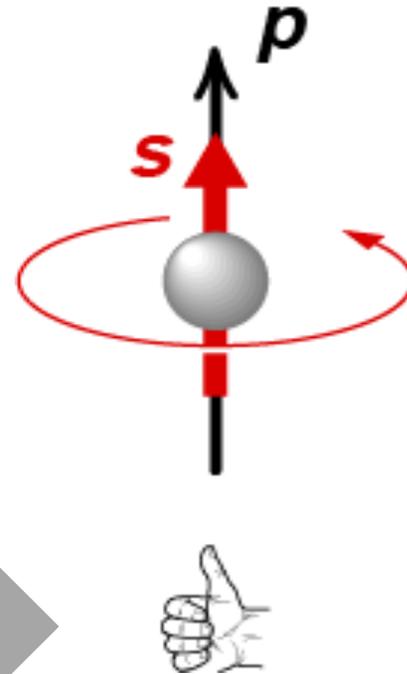
Anti-Teilchen

e^+ , μ^+
 \bar{u} , \bar{d} , \bar{p} , \bar{n}



Q: LANL

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



EINSCHUB: CHIRALITÄT UND HELIZITÄT

Chiralität in der Teilchenphysik

- **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: **Dirac-Gleichung** mit γ -Matrizen



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

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

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

4×4 Matrizen mit speziellen Antikommutator-Eigenschaften

Chiralität & Helizität

- **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

- Chiralität & Helizität zusammengefasst

	Chiralität	Helizität
relevante phys. Größe	schwache Ladung	Projektion Spin \vec{S} auf Impuls \vec{p}
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 (γ^5 ist pseudoskalar)	nein (p klappt um, Spin nicht)
wirkt auf	Spinor-Raum	Spin, Impuls (physikal. Raum)
Paritätstransformation	LH \leftrightarrow RH	LH \leftrightarrow RH

Parität, nachgefragt von Steven

■ Händigkeit von Teilchen & Wechselwirkungen

A) Beim Zerfall angeregter **Ni*** Zustände (s. VL 9 S. 42) beobachtet man Niveau-Übergänge von $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$. Welche Multipolarität wird bei den beiden Übergängen bevorzugt emittiert?

1 – E2

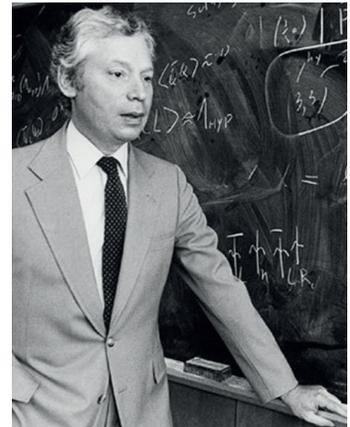
2 – M3

3 – M4 & E3

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

1 – Baryonenzahl B : $B = 0$ 3 – Spin: \vec{S} $S = 0$

2 – Quark-Flavourinhalt $q\bar{q}$: $d\bar{u}$ 4 – Parität P : $P = -1$



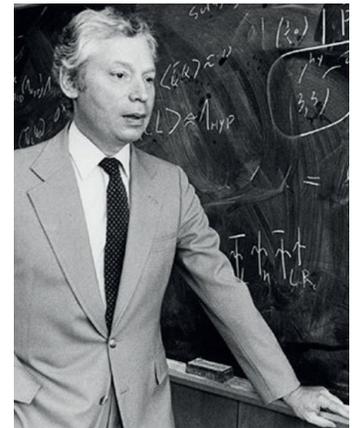
Steven Weinberg

Chiralität, nachgefragt von Steven

■ 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?

nur dass die beiden **Größen nicht übereinstimmen**, da **Myonen μ^\pm massebehaftet** sind und beide **nicht ultra-relativistisch** sind. Für genauere Aussagen müsste man z.B. die kinetischen Energien und die Art der Erzeugung kennen...



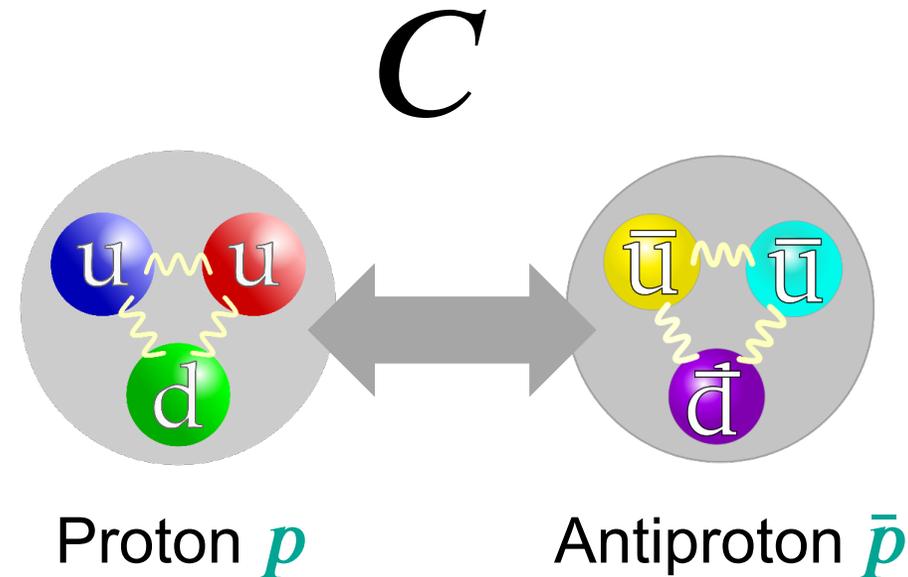
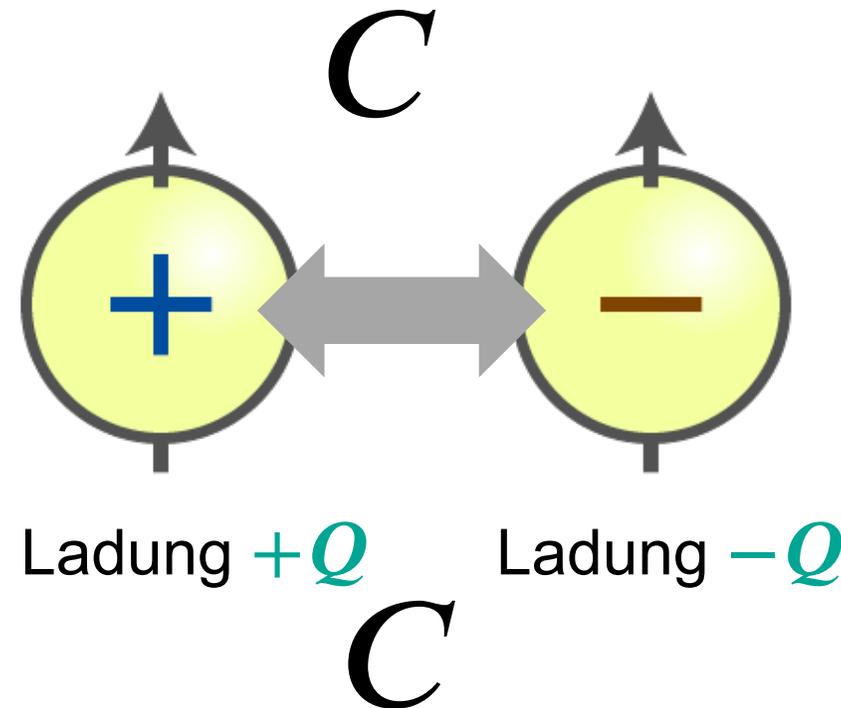
Steven Weinberg

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 $e^- \Leftrightarrow e^+$)
 $\vec{B} \rightarrow -\vec{B}, \vec{E} \rightarrow -\vec{E}$

- **C-Operator** angewendet auf **Teilchen**:

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

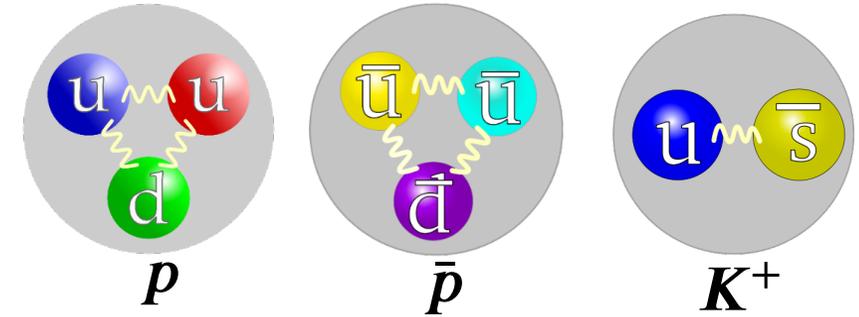
Ladung	$+Q \leftrightarrow -Q$	Strangeness	$+S \leftrightarrow -S$
Baryonenzahl	$+B \leftrightarrow -B$	Leptonzahl	$+L \leftrightarrow -L$

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

Ladungskonjugation C : Eigenzustände

■ welche Teilchen sind Eigenzustände des Operators C ?

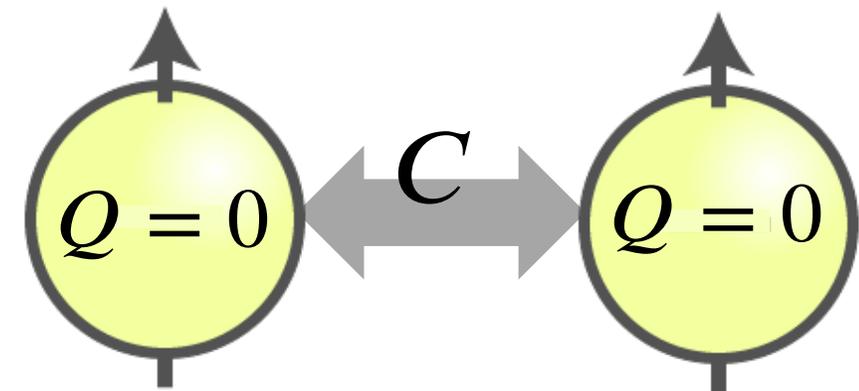
- alle Teilchen (p , \bar{p} , e^- , μ^+ , K^+ , u , d , t ...) mit ladungsartigen Quantenzahlen B , L , Q ... $\neq 0$ sind **keine** Eigenzustände von C



- 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

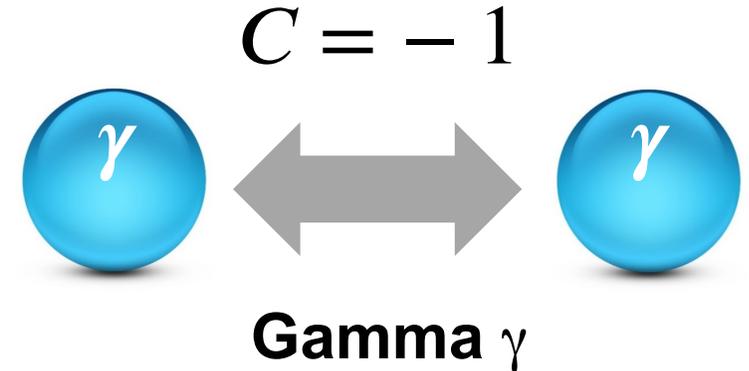
Ladungskonjugation C : neutrale Teilchen

- Photon γ : $C = -1$

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

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

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

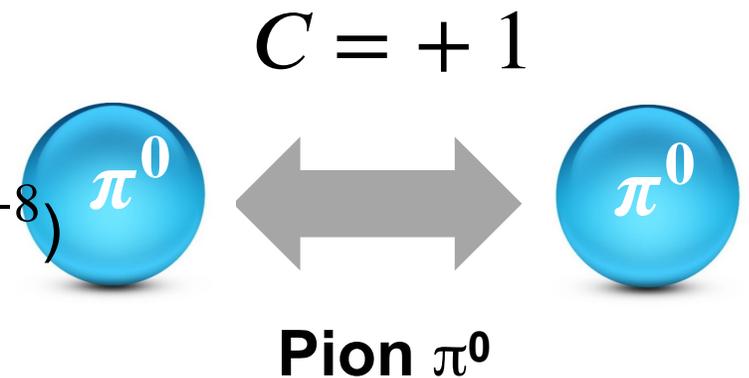


- Neutrales Pion π^0 : $C = +1$

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

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

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

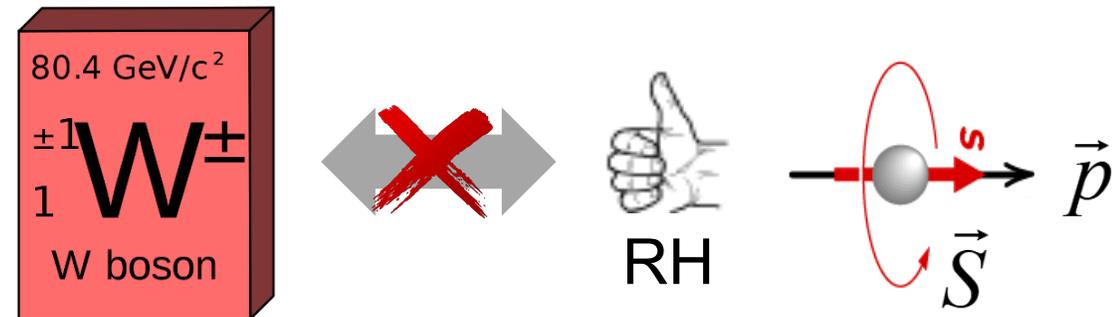
ω -Vektormeson mit
 $s = 1, \ell = 0 \quad C = (-1)^1 = -1$

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

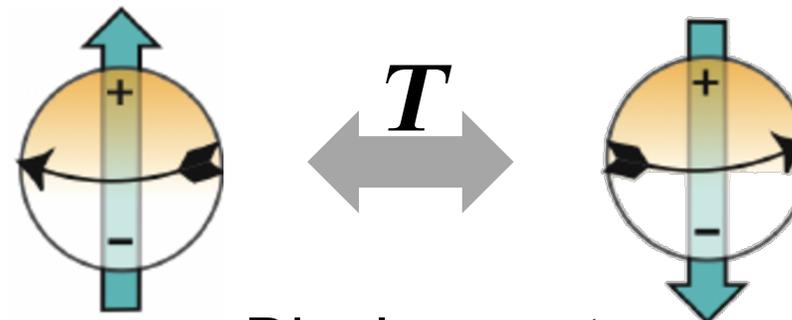
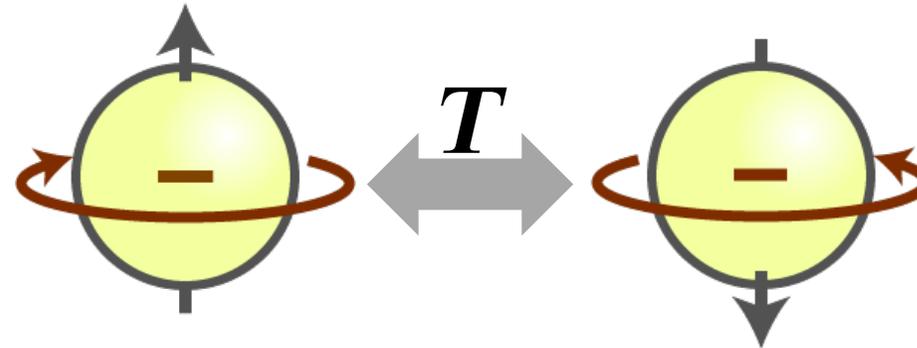
- **starke & elektromagnetische** Wechselwirkung: **Erhaltung der C -Symmetrie**
- **schwache** Wechselwirkung: **maximale Verletzung der C -Parität** (*Wu et al.*)

Zeitumkehr T

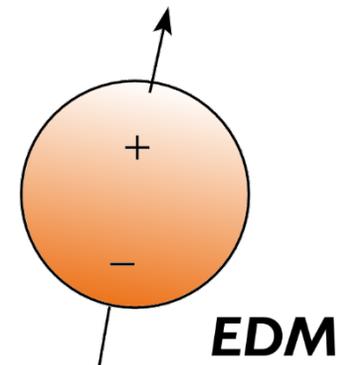
- Zeitumkehroperator T : $+t \rightarrow -t$

- 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:

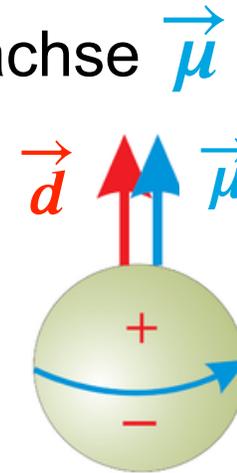
ein Indikator für **Verletzung der T-Invarianz** (bzw. CP- Verletzung)

Symmetrien P, T und das nEDM

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

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

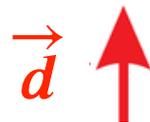
- magnetisches Dipolmoment $\vec{\mu}$:
einzige ausgezeichnete **Achse*** im System



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

$$\vec{\mu}_n \updownarrow \vec{S}_n$$

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



Orientierung des elektr. Dipolmoments (EDM)



Achse des magnetischen Moments (bzw. des Spins)

Parität P und nEDM

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

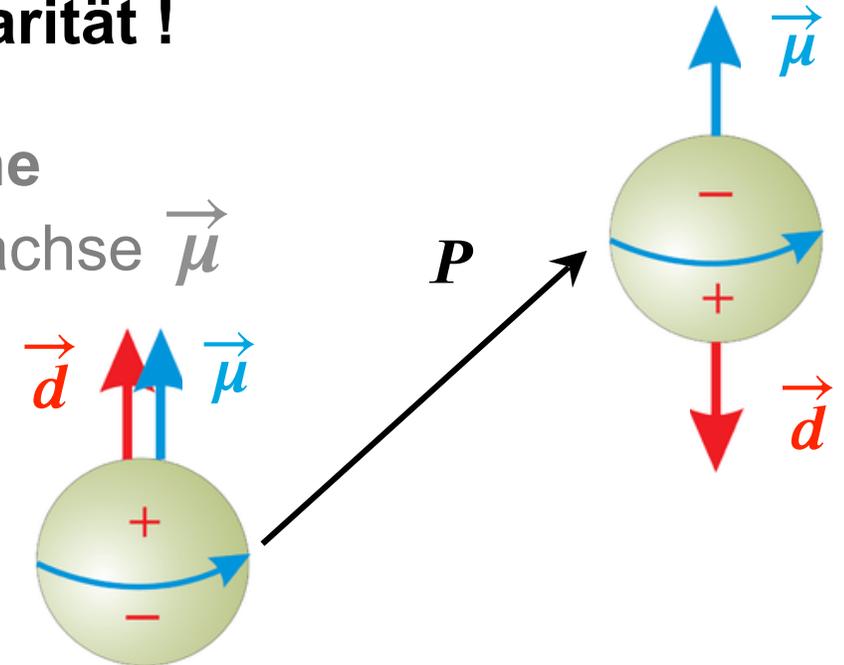
- elektrisches Dipolmoment \vec{d} : asymmetrische intrinsische Ladungsverteilung entlang Spinachse $\vec{\mu}$

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

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

\vec{d} ↑
polarer Vektor

↑ $\vec{\mu}$
axialer Vektor



Zeitumkehrinvarianz T und nEDM

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

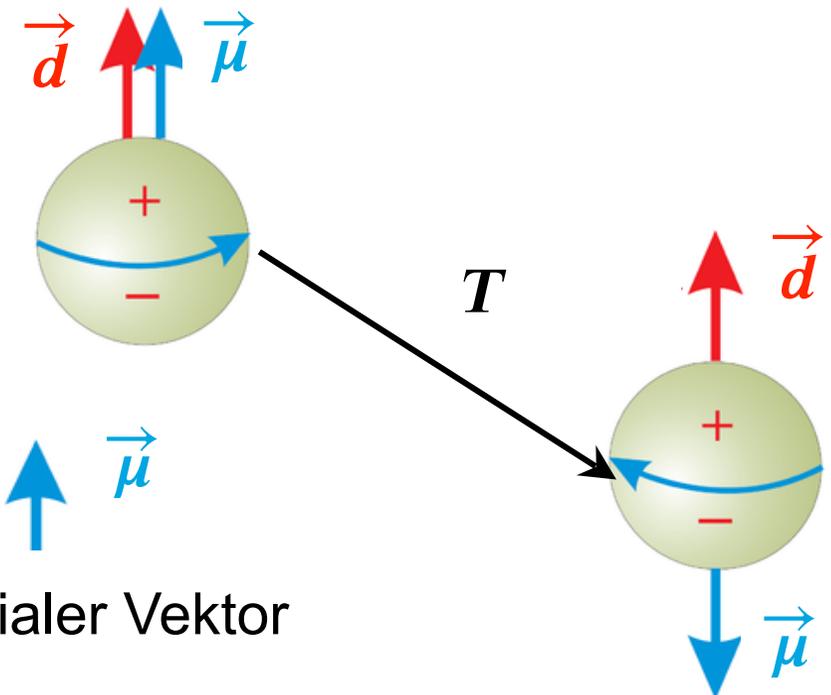
- elektrisches Dipolmoment \vec{d} : asymmetrische intrinsische Ladungsverteilung entlang Spinachse $\vec{\mu}$

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

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

\vec{d} ↑
polarer Vektor

↑ $\vec{\mu}$
axialer Vektor



Zeitumkehrinvarianz T und nEDM

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

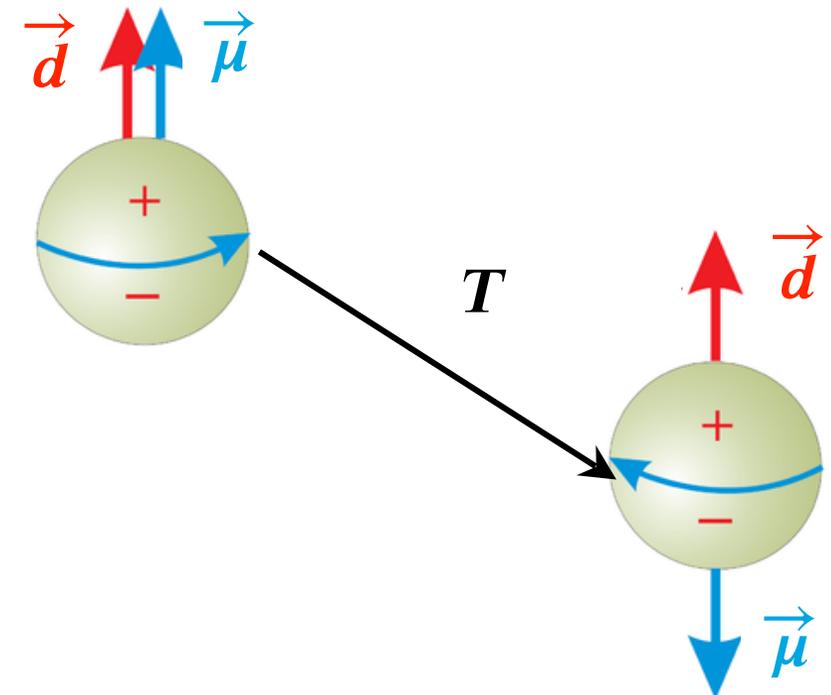
- elektrisches Dipolmoment \vec{d} : muss bei T-Invarianz verschwinden

- 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

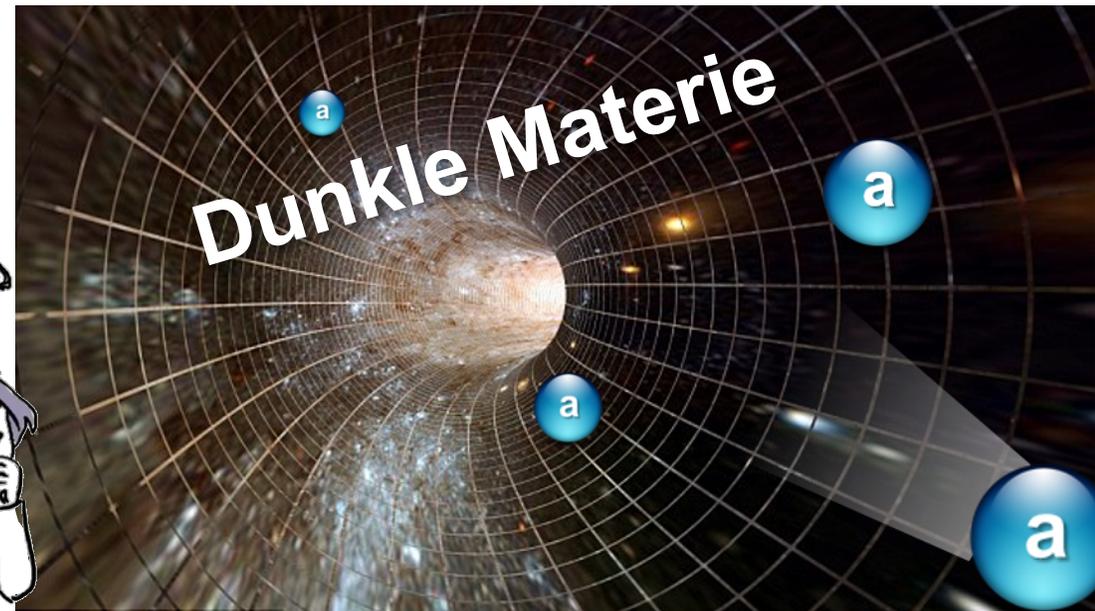


nEDM: Hinweis auf neue Symmetrie & Axionen?

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

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

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





KAPITEL 5.3 SCHLÜSSELEXPERIMENTE ZUR C-, P- UND CP-VERLETZUNG

Theta-Tau Puzzle

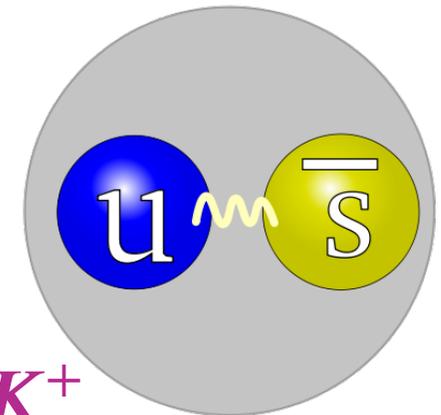
- Beobachtung von zwei Mesonen (Θ^+ , τ^+) mit gleicher Masse (493,7 MeV) & Lebensdauer, die in **unterschiedliche Paritätszustände** zerfallen:

„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

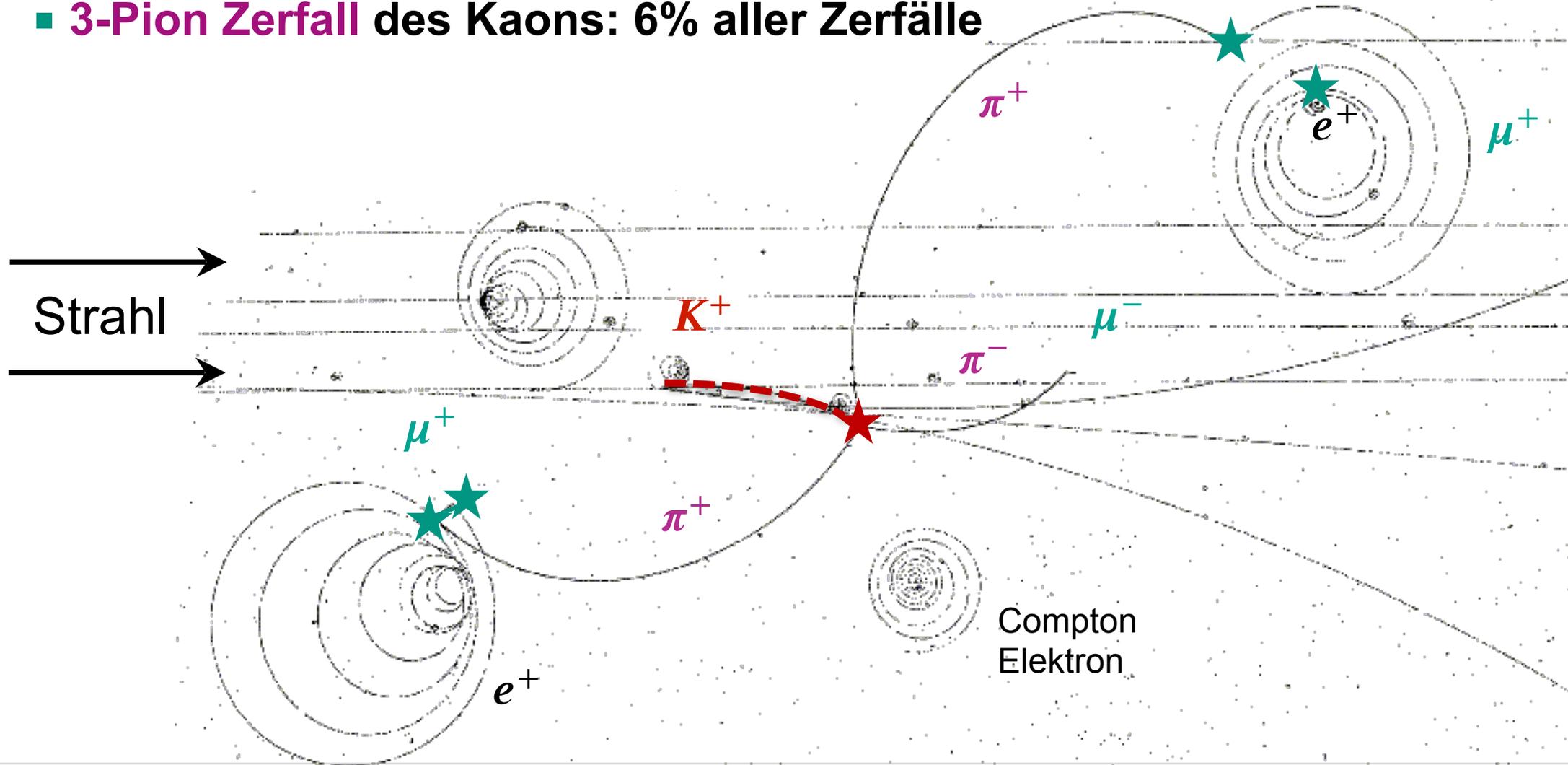
- Θ^+ und τ^+ sind identische Teilchen ($\equiv K^+$) !
- **Parität P wird in der schwachen Wechselwirkung verletzt!**



Kaon K^+

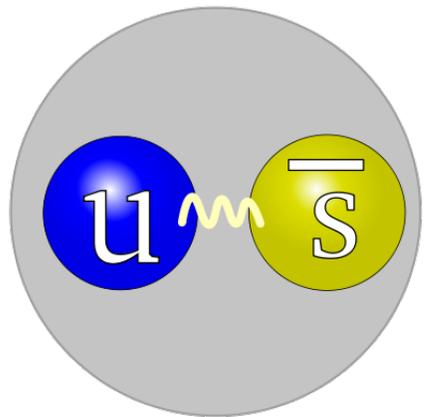
Zerfall eines Kaons: Experimentelle Signatur

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

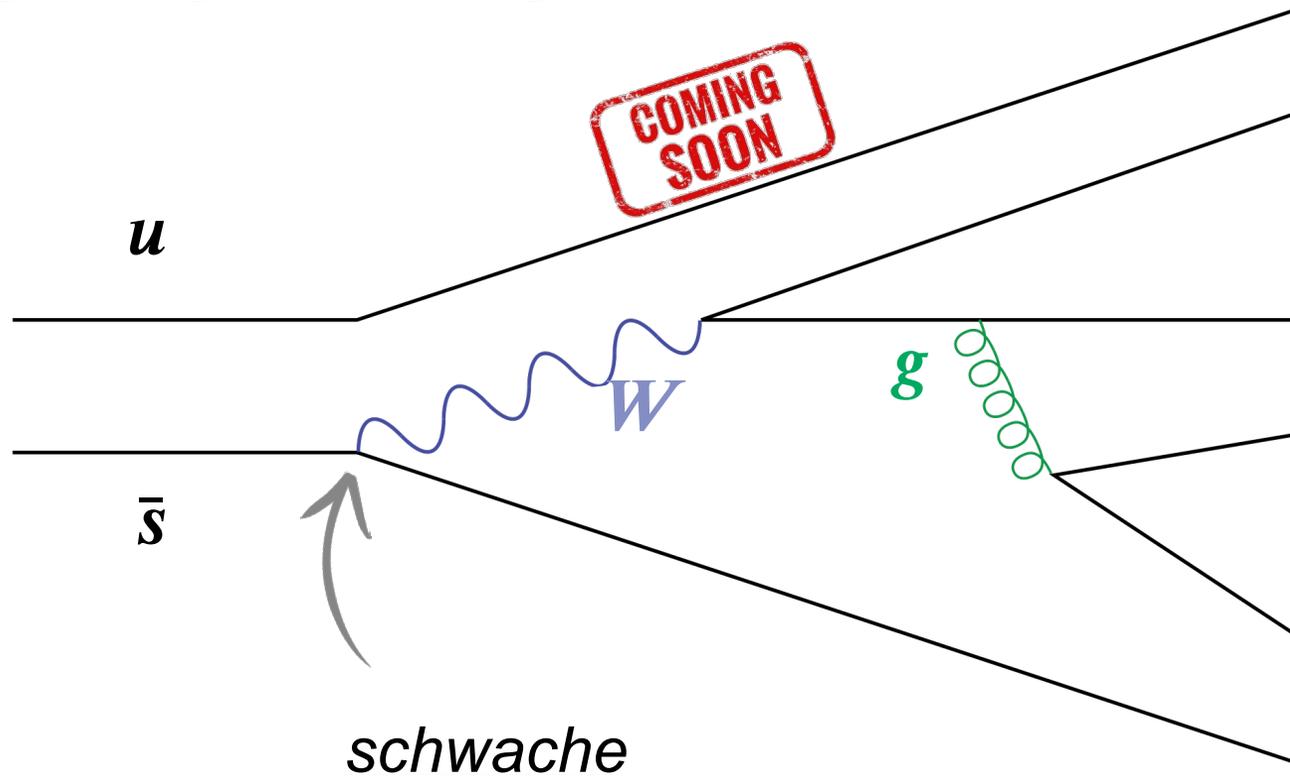


Zerfall eines Kaons: Feynman Diagramm

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

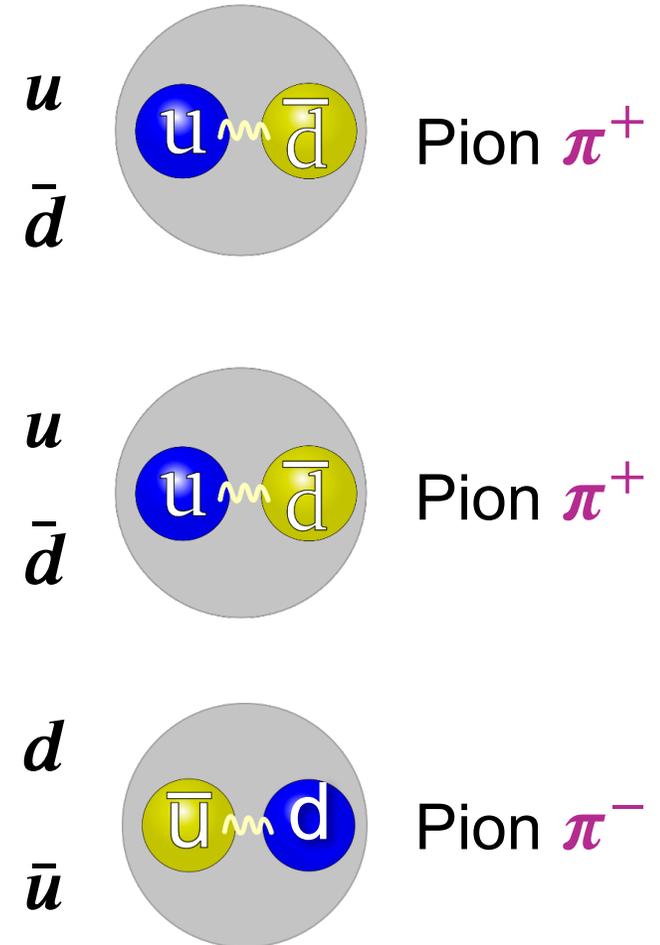


Kaon K^+



schwache

Wechselwirkung ist involviert!



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

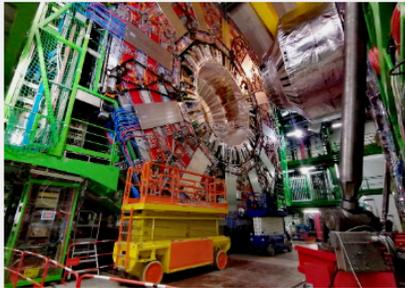


*"for their penetrating investigation of the so-called **parity laws** which has led to **important discoveries** regarding the elementary particles"*

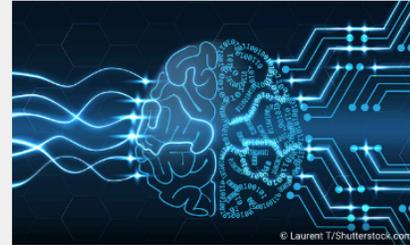
C.S. Wu
L. Lederman



Bachelor Themen



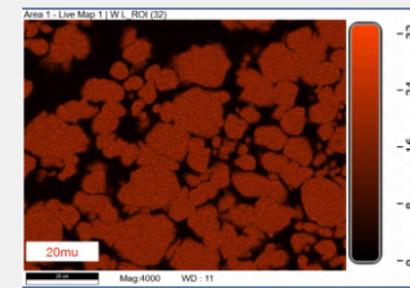
Compact Muon Solenoid



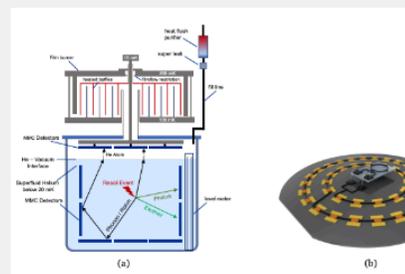
Machine Learning



Computing in HEP



Detector Physics



DeLight



Future Circular Collider



LUXE



SHADOWS