<u>Goldhaber, Sunyar, Grodzins (1958)</u>

$$^{152m}Eu + e^- \rightarrow {}^{152}Sm + \nu_e$$

$t_{1/2} = 9{,}3\,h$

Helizität $P = \langle \sigma \cdot p_0 \rangle$ des Neutrinos beim EC

=> gleichzeitig <u>Impulsrichtung</u> und <u>Spinrichtung</u> des Neutrinos messen!

Elektron Einfang: kein Impulsübertrag des Hüllelektrons

$$\Rightarrow \vec{p}_R = -\vec{p}_\nu$$

Richtung des Rückstoßes des ^{152}Sm Kerns wird über Resonanzfluoreszenz gemessen (961 keV) Gammas.

Resonanzfluoresenz findet normalerweise nicht statt! Wg. Rückstoßenergie

Wenn Strahlungsquelle nicht in Ruhe ist, sondern in Richtung auf den Streuer (152-Sm) zu bewegt (Doppler Effekt) kann Resonanz-Fluoreszenz stattfinden.

Rückstoßimpuls bei γ-Quant mit Energie $h\nu$

$$p_R(\gamma) = \frac{h\nu}{c}$$

kinetische Energie des Rückstoßkerns beträgt

$$E_R = \frac{p_R^2}{2m_R} = \frac{(h\nu)^2}{2m_R c^2}$$

$h\nu = 961\,\text{keV}$

$m_R = 152$

$$E_R = \frac{0{,}961^2}{2 \cdot \underline{152}\;938}\,\text{MeV} \simeq \underline{3{,}2\ \text{eV}}$$

Aufgrund Lebensdauer des angeregten Zustandes $\tau(1^-) \simeq 3 \cdot 10^{-14}\,\text{sec}$

$$\Rightarrow \quad \Delta E = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{0{,}658 \cdot 10^{-15}}{3 \cdot 10^{-14}}\,\text{eV} = 0{,}0\underline{23}\,\text{eV}$$

$\Rightarrow$ Überlapp des Emissionsspektrums und des Absorptionsspektrums ist minimal

Aus exakten Kernmassen $\Rightarrow$ $E_{\nu_e} = 950\,\text{keV}$

$$p_R(\nu) = \frac{E_\nu}{c}$$

$$E_R(\nu) = \frac{p_R^2(\nu)}{2m_R} = \frac{E_\nu^2}{2m_R c^2} = \underline{3{,}12\ \text{eV}}$$

Falls Rückstoß genau in Richtung der nachfolgenden Gamma emission

$$p_R = p_R(\nu) - p_R(\gamma) = \frac{E_\nu - h\nu}{c} = 4 \cdot 10^{-4}\, eV$$

d. h. beide Rückstöße kompensieren sich

$$E_\gamma = E_{exc} + E_R(\nu) - E_R = E_{exc} + 3{,}12\, eV$$

(klass. Dopplereffekt)

$\Rightarrow$ Überlagerung des Emissionsspektrums $W(E)\,dE$ mit WQ $\sigma(E)$ falls Emission des Neutrinos entgegen der Emissionsrichtung des Photons stattfindet

$\Rightarrow$ „Richtungsmessung über Resonanzfluoreszenz"

Beobachtung des Spins des Neutrinos über Drehimpulserhaltung

^{152m}Eu hat Kernspin $J_i = 0$, neg. Parität

$^{152}Sm^*$ " " $J_i = 1$, "

$\Rightarrow$ „erlaubter" Gamov-Teller Übergang

Drehimpulserhaltung : $\vec{J}_i + \vec{j}_e = \vec{J}_f + \vec{j}_\nu$

mit $J_i = 0$, $j_e = \frac{1}{2}$, $J_f = 1$ und $j_\nu = \frac{1}{2}$

Flugrichtung des Neutrinos als Quantisierungsachse

=> m-Komponente

$$m_e = m_{J_f} + m_\nu$$

für $m_\nu = +\frac{1}{2}$ gibt es zwei Möglichkeiten $m_{J_f} = -1$, $m_e = -\frac{1}{2}$

und $m_{J_f} = 0$, $m_e = +\frac{1}{2}$

d.h. $m_{J_f} = +1$ ist verboten

equivalent für $m_\nu = -\frac{1}{2}$ => $m_{J_f} = -1$ verboten

=> Longitudinal Polarisation der Neutrinostrahlung hat Polarisation der 152Sm Kerne ~~zur~~ in Richtung der Neutrino Emission zur Folge!

Drehimpulserhaltung für 961 keV γ mit Emissions diametral zur ν-Flugricht

$$\vec{L}(\gamma) = \vec{J}\,(961\,\text{keV}) - \vec{J}(0)$$

Photonen nur $m_\gamma = \pm 1$ annehmen

Aus $m_\nu = +\frac{1}{2} \Rightarrow (m_{J_f} = -1, 0) \Rightarrow m_\gamma = -1$

$m_\nu = -\frac{1}{2} \Rightarrow \quad +1, 0 \Rightarrow m_\gamma = +1$

Helizität d. Neutrinostrahlung $P(\nu) = \langle \vec{\sigma}_\nu \; \vec{p}_0(\nu) \rangle$ wird über die Zirkularpolarisation der diametral zur ν_e - Flugrichtung emittierten Gammastrahlung bestimmt.

$$P(\gamma) = \langle \vec{L}_\gamma \cdot \vec{p}_0(\gamma) \rangle$$

Messung d. Zirkularpolarisation der γ's über WQ der Compton-Streuung an magnetisiertem Eisen

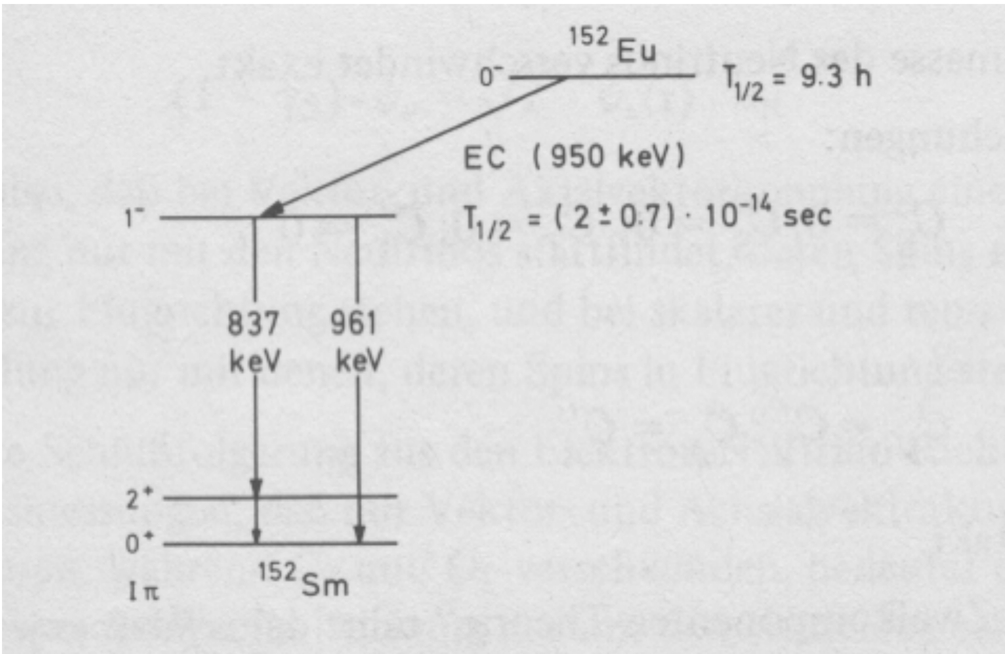
[Experimenteller Aufbau $\Rightarrow$ Folien]

Experiment $P(\gamma) = -0{,}66 \pm 0{,}15$

Da auch Resonanzstreuung noch möglich ist, wenn der Winkel nicht genau $180°$ ist $\Rightarrow$ Korrektur

$\Rightarrow$ Helizität der Neutrinos $P(\nu) = -1$

Goldhaber Experiment



Figur 133: Ausschnitt aus dem Zerfallsschema von ^{152}Eu.

Bodenstedt

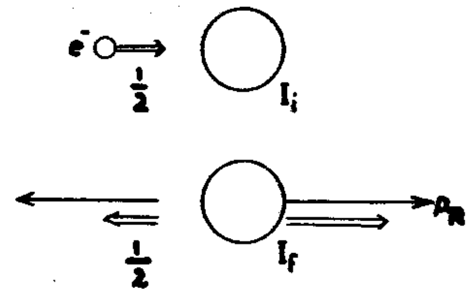
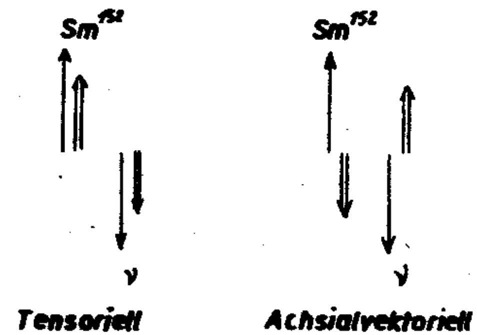
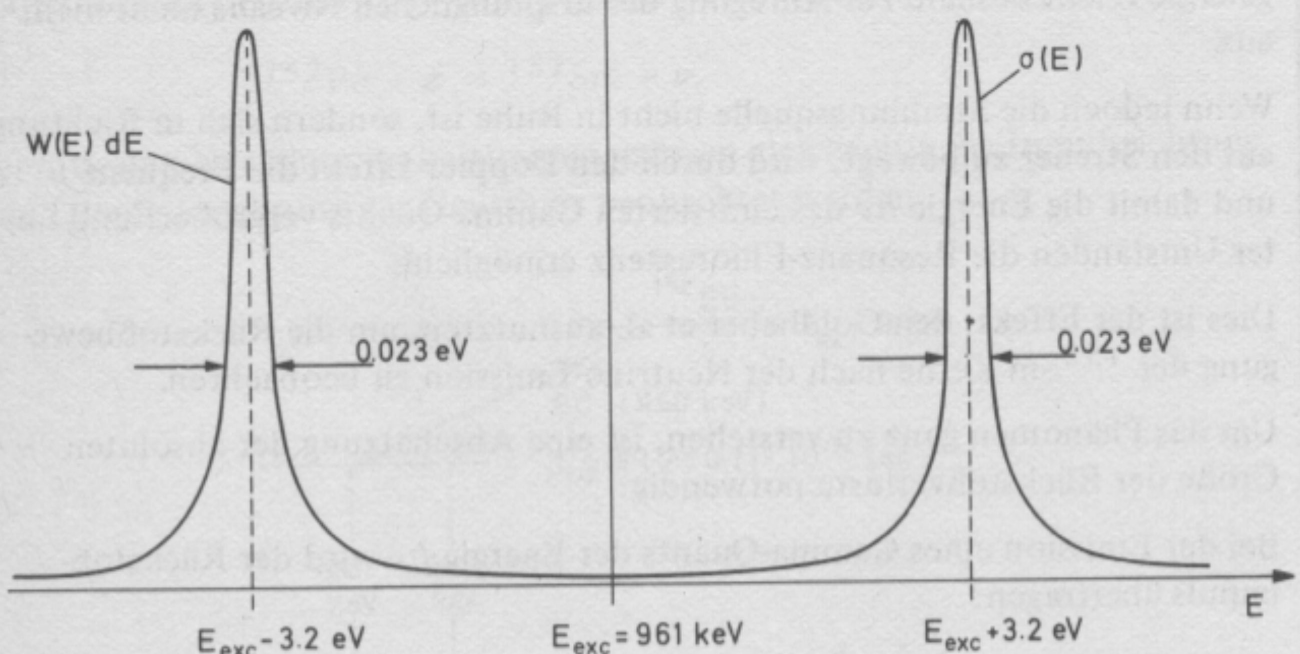


Fig. 10.63



Marmier

Goldhaber Experiment



Figur 134:

Schematische Darstellung des Emissionsspektrums und der Absorptionslinie des 961 keV Übergangs im ^{152}Sm.

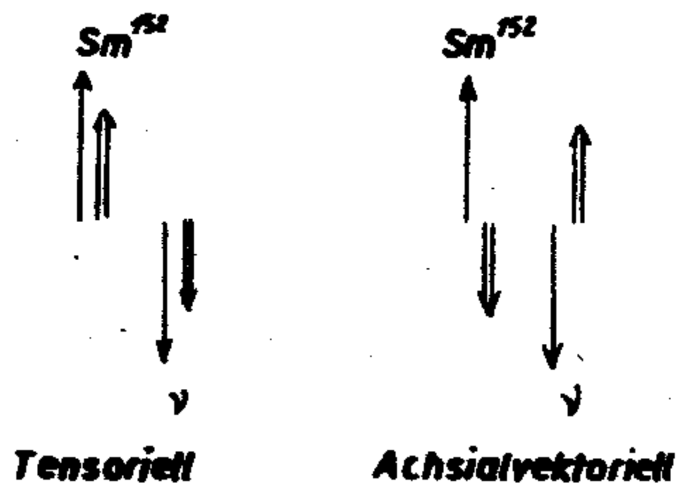
$$* \ \tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}.$$

Mögliche Spin-Kombinationen im Goldhaber-Experiment

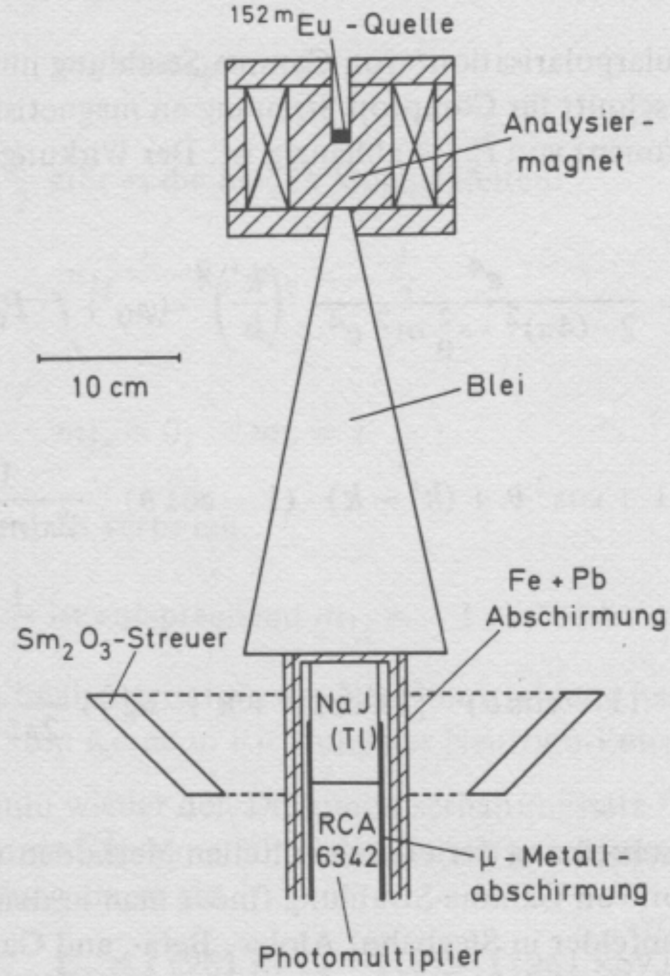
$$\overset{\Leftarrow}{{}^{152}\mathrm{Eu}} \longrightarrow \underset{\longleftarrow}{\overset{\Rightarrow}{\nu_e}} + \underset{\longrightarrow}{\overset{\Leftarrow\Leftarrow}{{}^{152}\mathrm{Sm}^*}} \quad \text{oder} \quad \overset{\Rightarrow}{{}^{152}\mathrm{Eu}} \longrightarrow \underset{\longleftarrow}{\overset{\Leftarrow}{\nu_e}} + \underset{\longrightarrow}{\overset{\Rightarrow\Rightarrow}{{}^{152}\mathrm{Sm}^*}}$$

$$\underset{\longrightarrow}{\overset{\Leftarrow\Leftarrow}{{}^{152}\mathrm{Sm}^*}} \longrightarrow {}^{152}\mathrm{Sm} + \underset{\longrightarrow}{\overset{\Leftarrow\Leftarrow}{\gamma}} \quad \text{oder} \quad \underset{\longrightarrow}{\overset{\Rightarrow\Rightarrow}{{}^{152}\mathrm{Sm}^*}} \longrightarrow {}^{152}\mathrm{Sm} + \underset{\longrightarrow}{\overset{\Rightarrow\Rightarrow}{\gamma}}$$

Helizität (γ) = Helizität(Sm) = Helizität(ν)



Goldhaber Experiment



Figur 135:

Experimentelle Anordnung zur Beobachtung der longitudinalen Polarisation der bei einem EC-Zerfall emittierten Neutrinos. Die Figur ist der Arbeit von Goldhaber, Grodzins und Sunyar, Phys.Rev. 109, 1015 (1958), entnommen.

Erwartung : Axialvektorkopplung $\rightarrow$ $P(\nu) = -1$

wäre Tensor-Kopplung $\rightarrow$ $P(\nu) = +1$

$\Rightarrow$ „V–A" Struktur d. Schw. WW

Ladungskonjugation

Teilchen beschreiben Ket-Vektoren $|q_{Ge}\rangle$ $\underline{}$:= generic

q_{Ge} für additive QZ q, B, S, L, ...

Operator der Ladungskonjugation ist definiert

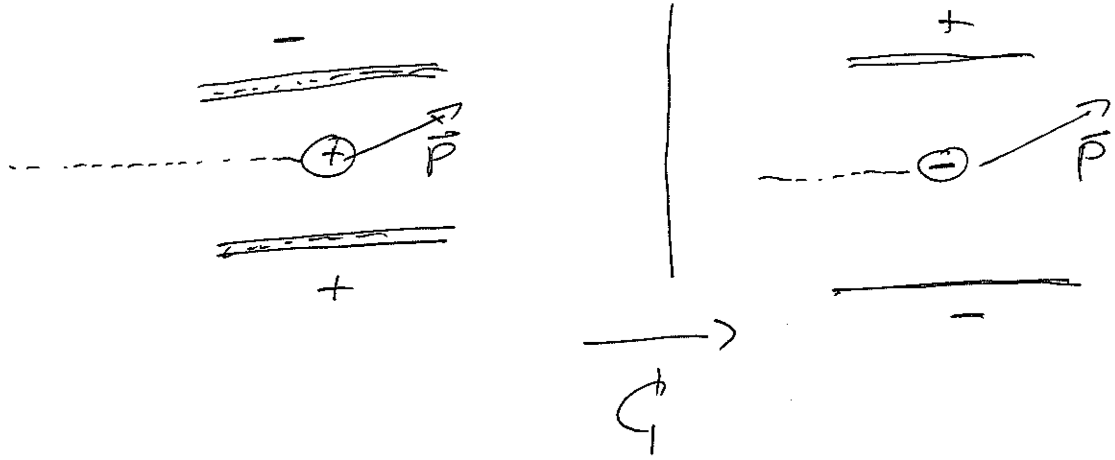
$$C\,|q_{Ge}\rangle = |-q_{Ge}\rangle$$

Ladungskonjugation kehrt Vorzeichen der additiven QZ um.

Aber Impuls, Spin .. bleiben unverändert!

wird auch „Teilchen-Antiteilchen Konjugation" genannt

Alle inneren QZ (B, L, S, ..) ändern ihr Vorzeichen!



C muß auf gesamte System angewand werd

$$C\,C\,|q_{ge}\rangle = C\,|-q_{ge}\rangle = |q_{ge}\rangle \Rightarrow C^2 = 1$$

Eigenwert ist +1 oder −1,

$\Rightarrow$ Quantenzahl der Ladungskonjugation η_c
$\parallel$
(Ladungsparität)

$$C\,|\pi^0\rangle = +1\,|\pi^0\rangle$$

für Photon $\eta_c = -1$

$\pi^0 \to 2\gamma$ ✓

$\pi^0 \to 3\gamma$ verboten

$+1$ $\quad$ $(-1)^3$

Experimentell: $\dfrac{\pi^0 \to 3\gamma}{\pi^0 \to 2\gamma} < 3\cdot 10^{-8}$

Erhaltung für C bei hadronischen WW

z. Bsp $\quad p\bar{p} \to \pi^+ \pi^- \pi^0$

$\xrightarrow{C} \quad \bar{p} p \to \pi^- \pi^+ \pi^0$ $\quad$ Winkelverteilung muß für positive und neg. Pionen

| C bleibt bei elektromagnet. u. starker Wechselwirkung erhalten |

Zeitumkehr

$$T: \quad t \xrightarrow{T} -t \quad , \quad \vec{x} \xrightarrow{T} \vec{x}$$

da klassisch $p = \frac{dx}{dt}$

$$\Rightarrow \vec{p} \xrightarrow{T} -\vec{p} \quad \text{(Impuls)}$$

$$\vec{J} \to -\vec{J} \quad \text{(Drehimpuls)}$$

klassisch: Newton'sche Bewgl., Maxwell GL.

Differentialgleichung zweiter Ordnung $\Rightarrow$ invariant unter T

QM : $i\hbar \frac{\partial \psi(t)}{d t} = H \psi(t)$

nicht invariant für $t \xrightarrow{T} -t$

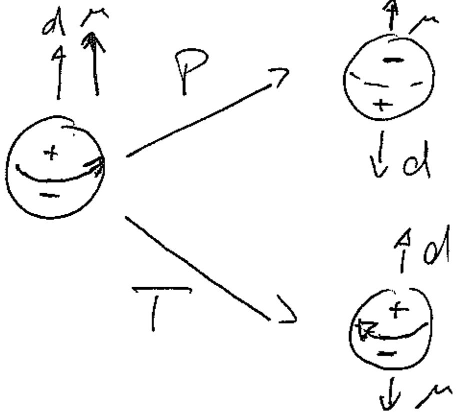
$[H,T] = 0$ wenn $T\psi(t)$ und $\psi(t)$ die gleiche Schrödinger Gl. lösen

mit $T\psi(t) = \psi^*(-t)$

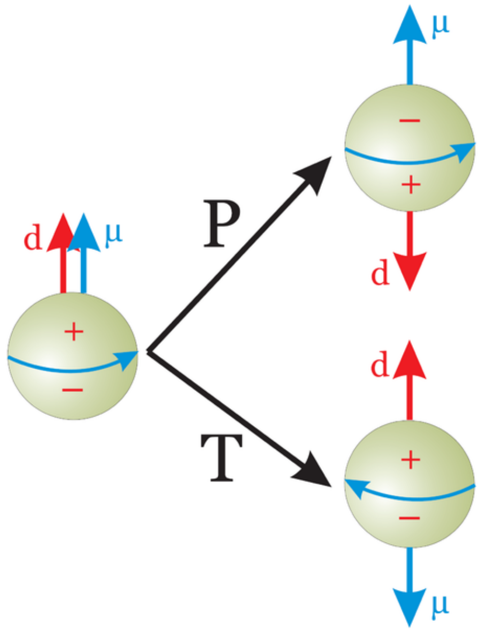
$$\psi(x,t) = e^{+i(px - Et)/\hbar}$$

$$T\psi(x,t) = \psi^*(x,-t) = e^{-i(px+Et)/\hbar} = e^{i(-px - Et)/\hbar}$$

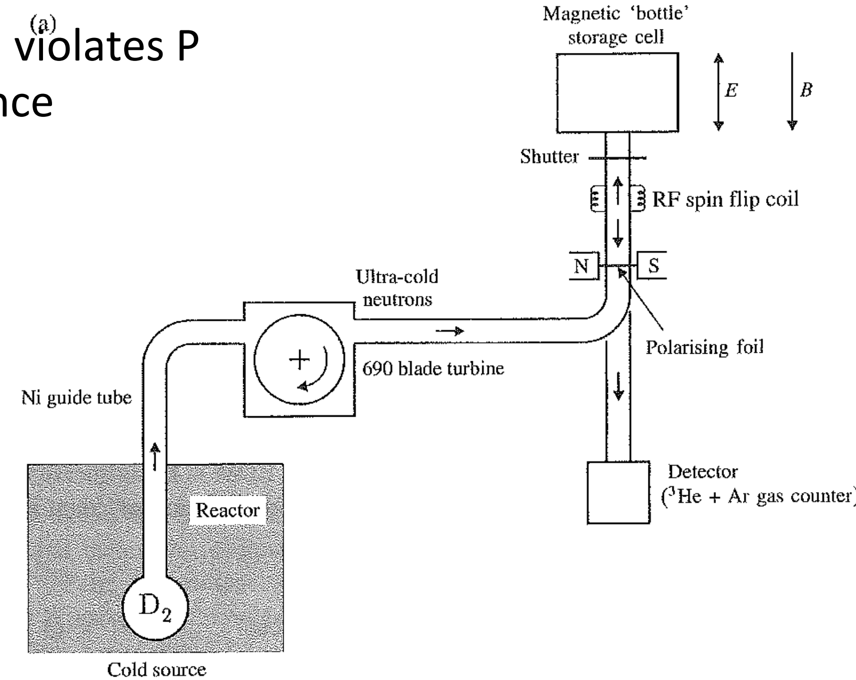
Elektrisches Dipolmoment der Teilchen verletzt sowohl P als auch T (Bsp. Neutron)



Neutron EDM violates P and T invariance



(a)



Principle of the EDM experiment at ILL Grenoble

Best limit <10^{26} e cm

New experiment under preparation at TUM (FRMII)

Targeted sensitivity: <10^{28} e cm

Measurement of spin precession frequency ($\nu=\mu B/h$) of ultra cold neutrons (ca. 5 m/s) in a weak B field with a strong parallel E-field which reverses with time (electric dipole interaction)

(b)

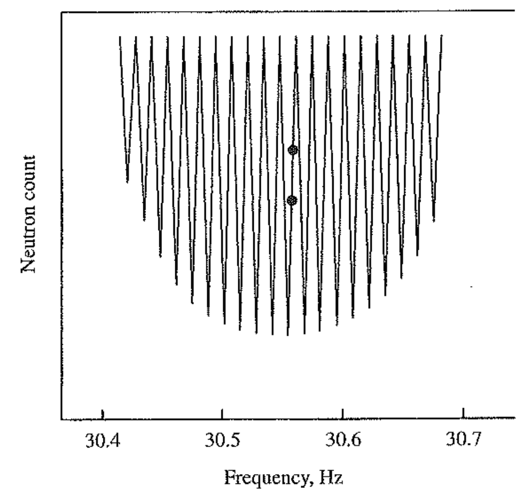
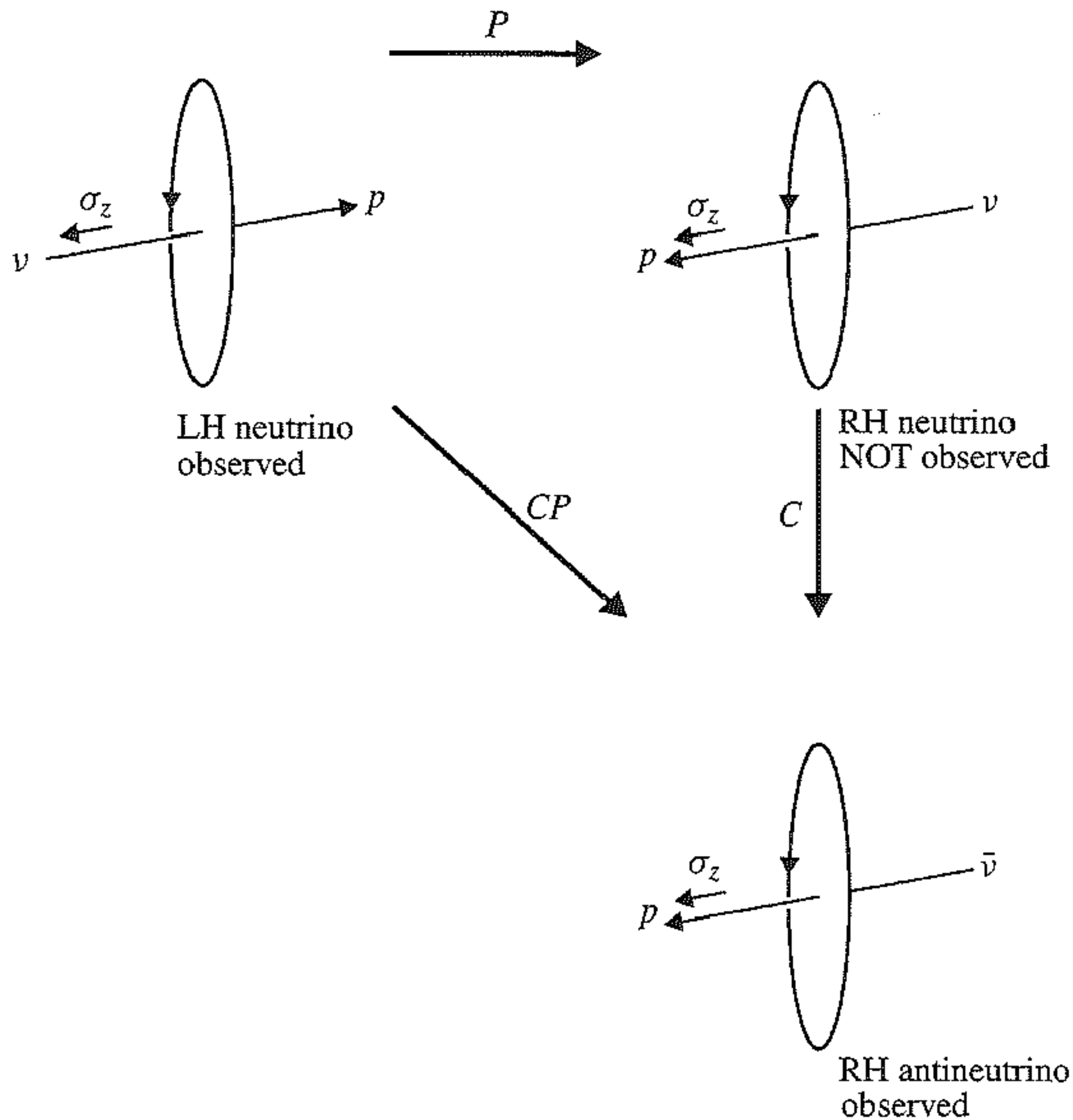


Fig. 3.7. (a) The apparatus at Grenoble for measuring the EDM of the neutron. (b) Neutron count rate as a function of precession frequency. To measure the EDM, the operations are confined to the two working points shown by the dots (after Pendlebury 1993).

Aus Perkins

C, P und CP Transformationen angewandt auf Neutrino bzw. Anti-Neutrino Zustände



Aus Perkins

Table 3.2. *Effect of T and P operations*

Quantity		Effect of T	Effect of P
position	$\mathbf{r}$	$\mathbf{r}$	$-\mathbf{r}$
momentum	$\mathbf{p}$	$-\mathbf{p}$	$-\mathbf{p}$
spin	$\boldsymbol{\sigma}$, axial vector $(\mathbf{r} \times \mathbf{p})$	$-\boldsymbol{\sigma}$	$\boldsymbol{\sigma}$
electric field	$\mathbf{E}\ (= -\nabla V)$	$\mathbf{E}$	$-\mathbf{E}$
magnetic field	$\mathbf{B}$, axial vector	$-\mathbf{B}$	$\mathbf{B}$
magnetic dipole moment	$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}$	$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}$	$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B}$
electric dipole moment	$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}$	$-\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}$	$-\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}$
longitudinal polarisation	$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}$	$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}$	$-\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p}$
transverse polarisation	$\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2)$	$-\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2)$	$\boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2$

Aus Perkins

CPT Theorem

All interactions are invariant under the successive operation of C, P and T taken in any order

Table 3.1. *Tests of the CPT theorem*

Measured quantity	Limit or value
$(M_{K^0} - M_{\bar{K}^0})/(M_{K^0} + M_{\bar{K}^0})$	$< 10^{-19}$
$(M_{e^+} - M_{e^-})/(M_{e^+} + M_{e^-})$	$< 4 \times 10^{-8}$
$(M_\Lambda - M_{\bar{\Lambda}})/(M_{\bar{\Lambda}} + M_\Lambda)$	$(-5 \pm 5) \times 10^{-6}$
$(Q_p - Q_{\bar{p}})/e$	$< 2 \times 10^{-5}$
$\left(\frac{Q_p}{M_p} - \frac{Q_{\bar{p}}}{M_{\bar{p}}}\right) \Big/ \left(\frac{Q_p}{M_p} + \frac{Q_{\bar{p}}}{M_{\bar{p}}}\right)$	$(8 \pm 6) \times 10^{-10}$
$(\mu_{e^+} - \mu_{e^-})/(\mu_{e^+} + \mu_{e^-})$	$-(3 \pm 5) \times 10^{-13}$
$(\tau_{\mu^+} - \tau_{\mu^-})/(\tau_{\mu^+} + \tau_{\mu^-})$	$< 10^{-4}$

Aus Perkins