Institut für Theoretische Physik der Universität Karlsruhe
Prof. Dr. F. R. Klinkhamer, PD Dr. R. Hofmann

Theoretische Physik E im Wintersemester 2007/2008

Klausur

Name: Michael Katus

Matrikel-Nr.: 129 8797

5 Blätter

Tutorium:

☐ A	☐ B	☐ C	☒ D	☐ E
☐ F	☐ G	☐ H	☐ I	☐ J
☐ K	☐ L	☐ M	☐ N	☐ O

Donnerstag, 14.02.2008, 15:00 Uhr, Gerthsen-Hörsaal

Bearbeitungszeit: 2,5 Stunden

Erlaubte Hilfsmittel: 2 handbeschriebene A4-Seiten (1 Blatt); Wörterbuch

	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4	Aufgabe 5
Korrektor	HS	SW	RT	KS.	RH
Punkte	3	2,5	0	1,5	0

Gesamtpunktzahl	7

Aufgabe K1: *Formalismus*

a) Zeigen Sie, dass alle Eigenwerte eines unitären Operators auf dem Einheitskreis in der komplexen Ebene liegen. (1 Punkt)

b) Zeigen Sie, dass alle Eigenwerte eines hermiteschen Operators reell sind. (1 Punkt)

c) Gegeben seien zwei Observablen A und B mit nicht entartetem Spektrum, die miteinander vertauschen. Zeigen Sie, dass es ein System aus gemeinsamen Eigenvektoren gibt. (2 Punkte)

Aufgabe K2: *Gekoppelte harmonische Oszillatoren*

Wir betrachten ein System aus zwei gekoppelten harmonischen Oszillatoren. Die Kopplung sei durch den Wechselwirkungshamiltonoperator

$$H_{\mathrm{W}} = \alpha\hbar\omega\left(a_1^\dagger a_2 + a_2^\dagger a_1\right) \tag{1}$$

beschrieben, wobei die $a_i^\dagger$ und a_i ($i = 1, 2$) den Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren der ungekoppelten Oszillatoren entsprechen. Wir beschreiben einen Zustand mit $|n_1, n_2\rangle$, mit n_1 und n_2 den zu den Zähloperatoren $N_i = a_i^\dagger a_i$ ($i = 1, 2$) zugehörigen Eigenwerten.

a) Geben Sie die Energien und die Entartung der Zustände des ungekoppelten Systems ($\alpha = 0$) an. (2 Punkte)

b) Der erste angeregte Zustand ist zweifach entartet. Finden Sie eine Basis dieses Zweizustandssytems, so dass der Gesamthamiltonoperator in diesem Unterraum diagonal ist. (2 Punkte)

c) Das System sei zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ im Zustand $|\psi(t = 0)\rangle = |1, 0\rangle$. Berechnen Sie die Wahrscheinlichkeit, zu einem gegebenen Zeitpunkt t das System im Zustand $|1, 0\rangle$ und $|0, 1\rangle$ anzutreffen. Skizzieren Sie den zeitlichen Verlauf dieser Wahrscheinlichkeiten. (2 Punkte)

Aufgabe K3: *Dublettaufspaltung* $s = \frac{1}{2}$

Wir betrachten die Bewegung eines Elektrons in einem drehsymmetrischen Potential $V(r)$ unter Berücksichtigung der Spin-Bahn-Kopplung. Der zugehörige Hamiltonoperator lautet

$$H = \frac{p^2}{2m_e} + V(r) + V_{\mathrm{LS}}(r) L \cdot S. \tag{2}$$

Ein Zustand lässt sich durch $|E; l, j, m\rangle$ beschreiben. Dabei sind l, j, m die zu den Operatoren L^2, J^2 bzw. J_3 gehörenden Quantenzahlen.

a) Berechnen Sie in der Gleichung $L \cdot S|E; l, j, m\rangle = \Lambda(j, l)|E; l, j, m\rangle$ die Funktion $\Lambda(j, l)$ für alle möglichen Werte von j und l. (2 Punkte)

b) Für das Coulombpotential seien $E_{n,l} = -\frac{1}{2n^2}(Z\alpha)^2 m_e c^2$ die Energieeigenwerte ohne Spin-Bahn-Kopplung und (3 Punkte)

$$\langle V_{\mathrm{LS}}\rangle = \frac{1}{2n^3}(Z\alpha)^4 m_e c^2 \frac{1}{l(l + 1/2)(l + 1)}.$$

Berechnen Sie für $n = 3$ die Aufspaltung aller möglicher Drehimpulszustände durch die Spin-Bahn-Kopplung und skizzieren Sie die erhaltenen Niveaus. Was müssen Sie für $l = 0$ beachten?

Aufgabe K4: *Cliffordalgebra und Lorentzgruppe*

Die γ-Matrizen erfüllen die Vertauschungrelation einer Cliffordalgebra

$$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2\eta^{\mu\nu} \qquad \text{mit} \quad (\eta^{\mu\nu}) = \mathrm{diag}(1,-1,-1,-1) \qquad (\mu,\nu = 0,1,2,3). \tag{3}$$

Wir definieren analog dazu die Matrizen $\Sigma^{\mu\nu}$ über den Kommutator zweier γ-Matrizen wie folgt:.

$$[\gamma^\mu, \gamma^\nu] = -2\mathrm{i}\Sigma^{\mu\nu} \tag{4}$$

a) Zeigen Sie: (2 Punkte)

$$[\Sigma^{\mu\nu}, \gamma^\rho] = 2\mathrm{i}(\eta^{\nu\rho}\gamma^\mu - \eta^{\mu\rho}\gamma^\nu) \tag{5}$$

b) Zeigen Sie, ggf. unter Nutzung von a), dass die Σ-Matrizen die Vertauschungsrelationen der Lorentzgruppe erfüllen, d.h. rechnen Sie die folgende Beziehung nach: (2 Punkte)

$$[\Sigma^{\mu\nu}, \Sigma^{\rho\sigma}] = 2\mathrm{i}\left(\eta^{\mu\sigma}\Sigma^{\nu\rho} - \eta^{\nu\sigma}\Sigma^{\mu\rho} - \eta^{\mu\rho}\Sigma^{\nu\sigma} + \eta^{\nu\rho}\Sigma^{\mu\sigma}\right) \tag{6}$$

Aufgabe K5: *Diracgleichung*

a) Berechnen Sie unter Verwendung der Diracgleichung und der adjungierten Diracgleichung die Viererdivergenz der Ströme (2 Punkte)

$$j^\mu = \overline{\psi}\gamma^\mu\psi \qquad \text{und} \qquad j_5^\mu = \overline{\psi}\gamma^\mu\gamma_5\psi. \tag{7}$$

Dabei sei $\gamma_5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$ und erfülle die Relation $\{\gamma_5, \gamma^\mu\} = 0$. Unter welcher Bedingung sind beide Ströme erhalten?

b) Zeigen Sie, dass unter den Symmetrien (2 Punkte)

(i)	$\psi' = U\psi$	$U = e^{-\mathrm{i}\alpha}$	mit $\alpha \in \mathbb{R}$
(ii)	$\psi' = H\psi$	$H = e^{-\mathrm{i}\alpha\gamma_5}$	mit $\alpha \in \mathbb{R}$

der masselosen Lagrangedichte $\mathcal{L} = \overline{\psi}\mathrm{i}\gamma^\mu\partial_\mu\psi$ die zugehörigen Noetherströme durch j^μ und j_5^μ aus a) gegeben sind.

Hinweis:
Für eine Symmetrietransformation mit nur einem Erzeuger und zugehörigem infinitesimalen Parameter ϵ ist der Noetherstrom zur Lagrangedichte $\mathcal{L}$ durch

$$j^\mu = \frac{\delta\mathcal{L}}{\delta(\partial_\mu\psi)}\,(\delta\psi)/\epsilon$$

gegeben. Dabei ist $\delta\psi = \psi' - \psi$ für eine infinitesimale Transformation, welche man als lineare Näherung der Symmetrietransformationen in b) erhält.

c) Es seinen die links- und rechthändigen Spinoren $\psi_\mathrm{L} = \frac{1}{2}(1-\gamma_5)\psi$ und $\psi_\mathrm{R} = \frac{1}{2}(1+\gamma_5)\psi$ gegeben. Was bewirkt die Anwendung von $e^{-\mathrm{i}\alpha\gamma_5}$ auf ψ_L und ψ_R? (1 Punkt)

Hinweis: Berechnen Sie zunächst γ_5^2.

Michael Korus TUT D (1)
1298797

Aufgabe K1

a) z.z. EW unitären Op. $\in$ Einheitskreis in komplexer Ebene

0P

b) z.z. EW herm. Op. reell

hermitesch: $A = A^+ = \cancel{(A^T)^*}$

$|\psi\rangle$ sei EV von A zum EW a

$A|\psi\rangle = a|\psi\rangle$

~~$\langle\psi|A^+ = \langle\psi|(A^T)^* = \langle\psi|$~~

$(A^*|\psi\rangle)^+ = (a|\psi\rangle)^+$

$A^+|\psi\rangle = (a^T)^*|\psi\rangle$

$\downarrow$ hermitesch

$A|\psi\rangle = a^*|\psi\rangle$ 1P

$\Rightarrow a^* = a$ dies gilt nur für reelle Werte

c) z.z. $[A,B]=0 \rightarrow$ VS k.O. existiert. $|\psi\rangle$ sei gem. EV:

$A\underbrace{B|\psi\rangle}_{=|\varphi\rangle} = B\underbrace{A|\psi\rangle}_{=|\bar\varphi\rangle}$ $\Rightarrow A|\varphi\rangle = B|\bar\varphi\rangle$

dann sind $|\varphi\rangle$ und $|\bar\varphi\rangle$ auch EV:

$\rightarrow B|\bar\varphi\rangle$ liefert EW a für $A|\varphi\rangle$

$A|\varphi\rangle$ liefert EW b für $B|\bar\varphi\rangle$

$\rightarrow$ $B|\bar\varphi\rangle = a|\varphi\rangle = A|\varphi\rangle$

$A|\varphi\rangle = b|\bar\varphi\rangle = B|\bar\varphi\rangle$

2P

q.e.d

Aufgabe K2

$$H_w = \alpha \hbar \omega \left(a_1^+ a_2 + a_2^+ a_1 \right) \qquad [\text{Kopplung}]$$

Erz: a_i^+ ;
$(i=1,2)$
Vern: a_i ;

Zustand: $N_i \, |n_1, n_2\rangle = n_i \, |n_1, n_2\rangle$

$N_i = a_i^+ a_i$

a) Energien und Entartung der Zustände des ungekoppelten Systems $(\alpha = 0)$

$\rightarrow \quad H = H_1 + H_2$

$H_1 = -\frac{\hbar^2}{2m_1} \nabla_1^2 + V_1(\vec{r}_1)$ $\qquad H_2$ entsprechend

$H|\psi\rangle = E_n |\psi\rangle$ $\qquad$ (mit $|\psi\rangle$ Eigenzustand von H zum EW: E_n)

$$(H_1 + H_2)|\psi\rangle = H_1|\psi\rangle + H_2|\psi\rangle = E^*_{n_1}|\psi\rangle + E^*_{n_2}|\psi\rangle$$

$$= (n_1 + \tfrac{1}{2})\hbar\omega|\psi\rangle + (n_2 + \tfrac{1}{2})\hbar\omega|\psi\rangle = (n_1 + n_2 + 1)\hbar\omega|\psi\rangle$$

$$= (N+1)\hbar\omega|\psi\rangle \quad \checkmark$$

$$\Rightarrow \quad E_n = E^*_{n_1} + E^*_{n_2} = (n_1 + n_2 + 1)\hbar\omega = (N+1)\hbar\omega$$

2

Zustände sind $(N+1)$ fach entartet! ✓

b) E_1: 2fach entartet

$\hookrightarrow \quad |n_1, n_2\rangle = \begin{cases} |1,0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ |0,1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases}$

$H_1 |n_1, n_2\rangle = E_{n_1} |n_1, n_2\rangle = \hbar\omega(n_1 + \frac{1}{2})$

$H_2 |n_1, n_2\rangle = E_{n_2} |n_1, n_2\rangle = \hbar\omega(n_2 + \frac{1}{2})$

$H_1 = \begin{pmatrix} E_{n_1} & 0 \\ 0 & E_{n_1} \end{pmatrix} \qquad H_2 = \begin{pmatrix} E_{n_2} & 0 \\ 0 & E_{n_2} \end{pmatrix}$

$a_1^+ |n_1 n_2\rangle = |n_1 + 1, n_2\rangle \qquad a_1 |n_1 n_2\rangle = |n_1 - 1, n_2\rangle$

$a_2^+ |n_1 n_2\rangle = |n_1, n_2 + 1\rangle \qquad a_2 |n_1 n_2\rangle = |n_1, n_2 - 1\rangle$

Michael Korus
1298797

zu K2 b)

$$H_w |n_1 n_2\rangle = \alpha\hbar\omega\left(a_1^+ a_2 + a_2^+ a_1\right)|n_1 n_2\rangle =$$
$$= \alpha\hbar\omega\left(a_1^+ a_2 |n_1 n_2\rangle + a_2^+ a_1 |n_1 n_2\rangle\right) =$$
$$= \alpha\hbar\omega\left(a_1^+ |n_1, n_2-1\rangle + a_2^+ |n_1-1, n_2\rangle\right) =$$
$$= \alpha\hbar\omega\left(|n_1+1, n_2-1\rangle + |n_1-1, n_2+1\rangle\right)$$

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}\begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ae+bf \\ ce+df \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow H_w \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} = \alpha\hbar\omega\left[\begin{pmatrix} n_1+1 \\ n_2-1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1-1 \\ n_2+1 \end{pmatrix}\right] = \alpha\hbar\omega\begin{pmatrix} 2n_1 \\ 2n_2 \end{pmatrix} = \alpha\hbar\omega 2\begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \cancel{H_w = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}}$$

$$\Rightarrow H_w = \begin{pmatrix} \alpha\hbar\omega 2 & 0 \\ 0 & \alpha\hbar\omega 2 \end{pmatrix} \quad f$$

$H_w = \hbar\omega\alpha\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
qed

mit $|n_1, n_2\rangle = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}$

$\boxed{\text{Basis } \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ für } E_1}$

(H_1, H_2 und H_w diagonal)

0

c) $t_0 = 0$ im Zustand $|\psi(t=0)\rangle = |1,0\rangle$

ges: WS das System zum Zeitpunkt t in $|1,0\rangle$ und $|0,1\rangle$ anzutreffen

$|\psi(0)\rangle = |1,0\rangle$ ist EV von H
$\rightarrow$ H mit seinen EW ersetzen!

$$|\psi(0)\rangle = |1,0\rangle$$
$$|\psi(t)\rangle = U|\psi(0)\rangle = e^{-i\frac{H}{\hbar}(t-t_0)}|\psi(0)\rangle \checkmark$$
$$= e^{-i\frac{\hbar\omega(n_1+n_2+1)+\alpha\hbar\omega 2}{\hbar}(t-t_0)}|1,0\rangle$$
$$\overset{t_0=0}{=} e^{-i(\omega(N+1)+\alpha\omega 2)t}|1,0\rangle = e^{-i\omega((N+1)+2\alpha)t}|1,0\rangle$$

WS System im Zustand $|1,0\rangle$ zu finden:

$$P_{|1,0\rangle}(t) = |\langle 1,0|\psi(t)\rangle|^2 = \left| e^{-i\omega(N+1+2\alpha)t} \cdot \underbrace{\langle 1,0|1,0\rangle}_{=1}\right|^2 =$$

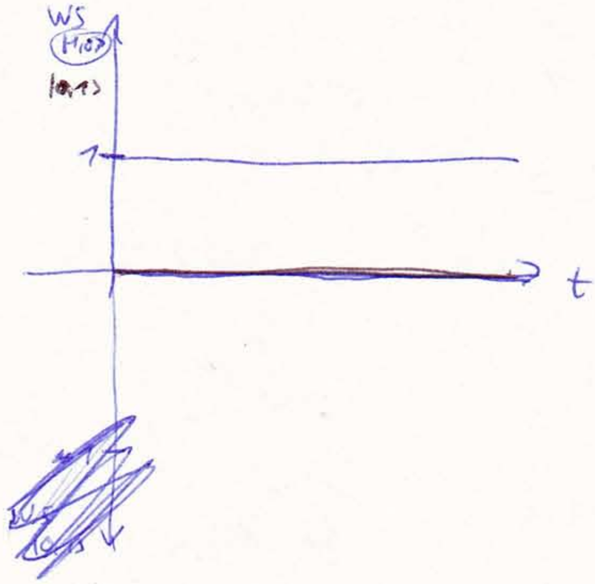
$$= \left| e^{-i\omega(N+1+2\varkappa)t} \right|^2 = e^{i\omega(N+1+2\varkappa)t} \cdot e^{-i\omega(N+1+2\varkappa)t} = 1$$

$$P_{|0,1\rangle}(t) = \left| \langle 0,1 | \psi(t) \rangle \right|^2 = \left| e^{-i\omega(N+1+2\varkappa)t} \cdot \underbrace{\langle 0,1 | 1,0 \rangle}_{=0} \right|^2 = 0$$ f

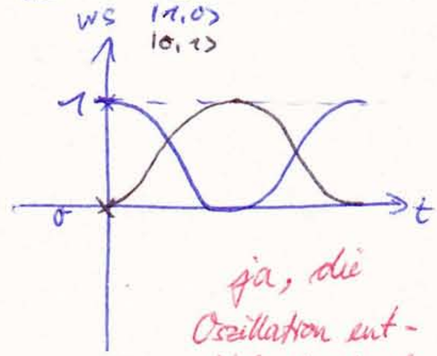
stimmt mit $P_{|0,1\rangle}(t) = 1 - P_{|1,0\rangle}(t)$ überein!

~~...~~ es sind wohl Basisvektoren falsch. => $|\psi(t)\rangle$ falsch => WS falsch. [habe eigentlich $\sin^2(\ldots)$ oder $\cos^2(\ldots)$ erwartet für WS.]

Trotzdem gezeichnet:



erwartet:



ja, die Oszillation entsteht durch den Kopplungsterm.

0,5

$\boxed{2,5}$

Michael Karus
1298797

TUT D

3

K3

a) $L \cdot S \,|E; l, j, m\rangle = \Lambda(j,l)\,|E; l, j, m\rangle$

$L^2 \,|E; l, j, m\rangle = l(l+1)\hbar^2 \,|E; l, j, m\rangle$

$J^2 \,|E; l, j, m\rangle = j(j+1)\hbar^2 \,|E, l, j, m\rangle$

$J_3 \,|E; l, j, m\rangle = m\hbar \,|E, l, j, m\rangle$

$J = S + L$

$\Rightarrow S = J - L$

~~ges~~: $\Lambda(j,l)$

$L \cdot S \,|E, l, j, m\rangle = L \cdot (J - L) \,|\ldots\rangle = \cancel{L^2(J^2 - 2J(L+L^2))|\ldots\rangle} =$

$= \cancel{L J^2} = (LJ - L^2)\,|\ldots\rangle = LJ\,|\ldots\rangle - L^2\,|\ldots\rangle =$

$= LJ\,|\ldots\rangle - l(l+1)\hbar^2\,|E, l, j, m\rangle =$

$= \sqrt{l(l+1)\hbar^2 j(j+1)\hbar^2}\,|E, l, j, m\rangle - l(l+1)\hbar^2\,|\ldots\rangle =$

$= \hbar^2\left[\sqrt{l(l+1)j(j+1)} - l(l+1)\right]\,|E, l, j, m\rangle$

$$\Lambda(j,l) = \hbar^2\left[\sqrt{l(l+1)j(j+1)} - l(l+1)\right]$$

f

Spin?

Michael Karus TUT D
1298797

④

K4

$\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2\eta^{\mu\nu} \rightarrow \{\gamma^0, \gamma^0\} = 2 \rightarrow \gamma^0\gamma^0 = 1$

$\{\gamma^{1}, \gamma^{1}\} = -2 \rightarrow \gamma^{1}\gamma^{1} = -1$

$\{\gamma^0, \gamma^1\} = 0$

(usw) $\rightarrow \gamma^0\gamma^1 + \gamma^1\gamma^0 = 0$

$\Rightarrow \underline{\gamma^0\gamma^1 = -\gamma^1\gamma^0}$

Def: $-2i\Sigma^{\mu\nu} = [\gamma^\mu, \gamma^\nu]$

$\frac{1}{2}\{\gamma^\nu, \gamma^\rho\}$ $\frac{1}{2}\{\gamma^\mu, \gamma^\rho\}$

a) z. z. $[\Sigma^{\mu\nu}, \gamma^\rho] = 2i(\eta^{\nu\rho}\gamma^\mu - \eta^{\mu\rho}\gamma^\nu)$

linke Seite:

$\left[-\frac{1}{2i}[\gamma^\mu, \gamma^\nu], \gamma^\rho\right] = -\frac{1}{2i}\left[(\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\nu\gamma^\mu), \gamma^\rho\right] = -\frac{1}{2i}\left([\gamma^\mu\gamma^\nu, \gamma^\rho] - [\gamma^\nu\gamma^\mu, \gamma^\rho]\right) =$

$= -\frac{1}{2i}\left(\gamma^\mu\gamma^\nu\gamma^\rho - \gamma^\rho\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\nu\gamma^\mu\gamma^\rho + \gamma^\rho\gamma^\nu\gamma^\mu\right) =$

$= -\frac{1}{2i}\left(\gamma^\mu\gamma^\nu\gamma^\rho - \gamma^\nu\gamma^\mu\gamma^\rho - \gamma^\rho\gamma^\mu\gamma^\nu + \gamma^\rho\gamma^\nu\gamma^\mu\right) =$ f

$\cancel{= -\frac{1}{2i}\left(\underbrace{(\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\nu\gamma^\mu)}_{=[\gamma^\mu, \gamma^\nu]}\gamma^\rho + \gamma^\rho\underbrace{(\gamma^\nu\gamma^\mu - \gamma^\mu\gamma^\nu)}_{=[\gamma^\nu, \gamma^\mu]}\right) =}$

rechte Seite:

$2i(\eta^{\nu\rho}\gamma^\mu - \eta^{\mu\rho}\gamma^\nu) = 2i\left(\frac{1}{2}(\gamma^\nu\gamma^\rho + \gamma^\rho\gamma^\nu)\gamma^\mu - \frac{1}{2}(\gamma^\mu\gamma^\rho + \gamma^\rho\gamma^\mu)\gamma^\nu\right) =$

$= i\left(\gamma^\nu\gamma^\rho\gamma^\mu + \gamma^\rho\gamma^\nu\gamma^\mu - \gamma^\mu\gamma^\rho\gamma^\nu - \gamma^\rho\gamma^\mu\gamma^\nu\right)$

noch 1P

b) $$[\Sigma^{\mu\nu},\Sigma^{\rho\sigma}] \overset{!}{=} 2i\left(\eta^{\mu\sigma}\Sigma^{\nu\rho} - \eta^{\nu\sigma}\Sigma^{\mu\rho} - \eta^{\mu\rho}\Sigma^{\nu\sigma} + \eta^{\nu\rho}\Sigma^{\mu\sigma}\right)$$

$$[\Sigma,\Sigma] = \underbrace{\frac{1}{+4i^2}}_{=-\frac{1}{4}}\left[[\gamma^\mu,\gamma^\nu],[\gamma^\rho,\gamma^\sigma]\right] = -\frac{1}{4}\left[(\gamma^\mu\gamma^\nu-\gamma^\nu\gamma^\mu),(\gamma^\rho\gamma^\sigma-\gamma^\sigma\gamma^\rho)\right] =$$

$$= -\frac{1}{4}\cdot\left([\gamma^\mu\gamma^\nu,\gamma^\rho\gamma^\sigma] - [\gamma^\mu\gamma^\nu,\gamma^\sigma\gamma^\rho] - [\gamma^\nu\gamma^\mu,\gamma^\rho\gamma^\sigma] + [\gamma^\nu\gamma^\mu,\gamma^\sigma\gamma^\rho]\right) =$$

$$= -\frac{1}{4}\left(\gamma^\mu\gamma^\nu\gamma^\rho\gamma^\sigma - \gamma^\rho\gamma^\sigma\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\mu\gamma^\nu\gamma^\sigma\gamma^\rho + \gamma^\sigma\gamma^\rho\gamma^\mu\gamma^\nu - \gamma^\nu\gamma^\mu\gamma^\rho\gamma^\sigma + \gamma^\rho\gamma^\sigma\gamma^\nu\gamma^\mu \right.$$
$$\left. + \gamma^\nu\gamma^\mu\gamma^\sigma\gamma^\rho - \gamma^\sigma\gamma^\rho\gamma^\nu\gamma^\mu\right)$$

... ? noch 0,5 P

~~$= -\frac{1}{4}($~~

Umwandlung von $[\gamma^\mu,\gamma^\nu]$ in $\Sigma^{\mu\nu}$
ergibt Vorfaktor von $-2i$

Umwandlung von $\{\gamma^\mu,\gamma^\nu\}$ in $\eta^{\mu\nu}$
ergibt Vorfaktor von 2

~~$= -\frac{1}{4}(-4i)$~~ ~~q.e.d.~~

Michael Karus
1298797

TUT D ⑤

K 5

c) Anwendung von $e^{-i\alpha\gamma_5}$ auf ψ_L und ψ_R

$\rightarrow \gamma_5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$

$\rightarrow$

?

0/5