Fach: Theoretische Physik		
PrüferIn: Schmalian		
⊗ BP ◯ NP ◯ SF ◯ EF ◯ NF ◯ LA	Datum: 31. März 2021	Fachsemester: 9
Welche Vorlesungen wurden geprüft? Theo D, Theo E, Theo Fa+Fb		
Welche Vorlesung der PrüferIn hast Du gehört? Keine		

Zur Vorbereitung

Absprache mit PrüferIn über folgende Themengebiete: Keine
Absprache mit PrüferIn über Literatur/Skripte: Keine
Verwendete Literatur/Skripte: Schmalian Skript Theo D SoSe 2017 (Leech), Schmalian Skript Theo Fa+Fb 2019/2020 (Ilias), Steinhauser Skript Theo E WS2020/21 (Ilias), Melnikov Skript Theo E WS2018/19 (gut geeignet für zeitabhängige Störungstheorie (Herleitung ohne Wechselwirklungsbild) und Aharonov Bohm Effekt). Schwabl QM 1 (super für Fermis Goldene Regel) und Sakurai (war mir aber oft viel zu ausführlich - die Tiefe braucht man nicht) Viel Wikipedia
Dauer der Vorbereitung: 2 Monate (mit Unterbrechungen wegen der Arbeit und freien Wochenenden) je durchschnittlich 6h, in den letzten 3 Wochen ca 8h am Tag.
Art der Vorbereitung: Mit 2 Lernpartnern ca 2 Mal die Woche via Skype Fragen geklärt und Protokolle abgefragt. Die Gruppenarbeit war extrem hilfreich und kann ich jedem weiterempfehlen
Allgemeine Tips zur Vorbereitung: Zuerst habe ich mir alle Prüfungsprotokolle aus 2020 angeschaut und häufig gestellte Fragen notiert. Schmalian hat Standardthemen, die immer dran kommen. Dann bin ich die ersten 3 Wochen das 2017 Theo D Skript von Schmalian (siehe Leech) und das 2019 Theo Fa und Theo Fb Skript (gibt es im Ilias) durchgegangen. Danach habe ich mir die Standardthemen mit Blick auf die Fragen, die Schmalian dazu üblicherweise stellt beigebracht. Bei einigen Themen will er eine Rechnung sehen. Die finden sich meistens in seinem Skript. Gerade bei Theo D werden aber auch Rechnungen aus seinen Übungsblättern von 2017 abgefragt.

Zur Prüfung

Wie verlief die Prüfung? Entspannt - wirklich nichts vor dem man sich verrückt machen sollte. Wir sind die jeweiligen Aufgaben sehr ausführlich durchgegangen, weshalb nicht viele Themen abgefragt wurden. Die Prüfung fand via Zoom statt und ich habe meine Bildschirm geteilt und per Touchscreen geschrieben.
Wie reagierte die PrüferIn, wenn Fragen nicht sofort beantwortet wurden? P rof Schmalian ist super nett und merkt bei schwierigeren Fragen an, dass er keine perfekte Antwort erwartet. Er will dann nur sehen, wie man mit einem neuen physikalischen Problem umgeht. Er hat bei mir positiv angemerkt, dass ich mich nicht aus dem Konzept hab bringen lassen. Also keine Panik bekommen und einfach mal drauf losreden, was euch dazu einfallen würde (auch wenn es falsch ist). Ich glaube er hört es nicht gerne, wenn jemand einfach sagt ‚weiß ich nicht'.

Kommentar zur Prüfung: Super angenehm und auf jeden Fall empfehlenswert. Es ist nicht schlimm, nicht sofort eine Antwort zu haben, wenn eine Frage gestellt wird, die nicht aus den Altprotokollen bekannt ist.

Kommentar zur Benotung: 1,0

Die Schwierigkeit der Prüfung: Prof Schmalian wollte wissen, wie ich beweisen würde, dass die Dirac Gleichung lorentzinvariant ist. Er wollte keine explizite Rechnung sehen (das wäre wohl auch viel zu kompliziert), sondern einfach, wie ich an das Problem rangehen würde.

Die Fragen

P = Prof. Schmalian
S= Student
P: Bei wem haben Sie die Vorlesungen gehört?
S: Theo D Klinkhamer, Theo E Melnikov, Theo F Mirlin
P: Wieso machen Sie die Prüfung dann bei mir?
S: Habe erklärt, dass meine letzte Theo Vorlesung schon etwas länger her ist und mir bei seinen Protokolle
aufgefallen ist, dass er aus allen Bereichen ein bischen abfrägt, sodass ich alles ein bischen auffrischen
kann.
P: Okay, fangen wir einmal mit der Schrödingergleichung an. Woher kommt die denn?
S: Habe etwas unstrukturiert erklärt, dass man in der Quantenmechanik allen Objekten eine Wellenlänge zuordnen kann (Idee von de Broglie) und man auf der Suche nach einer Bewegungsgleichung war, die die klassische Energie-Impuls Beziehung E={\vec{p}}^2/2m erfüllt. Gleichzeitig wusste man, dass E=\hbar\omega gilt und \vec{p}=\hbar\vec{k} gilt. Damit erhält man eine Dispersionsrelation \omega\left(k\right)=\hbar k^2/2m. Man fordert weiter, dass die Lösung der Schrödingergleichung ebene Wellen sind \psi=e^{\left[i\lef
t-kx\right)\right]} und kann das in eine allgemeine Wellengleichung a\partial_t^n\psi=b\partial_r^l\ \psi einsetzen. Auf beiden Seiten muss die gleiche Potenz von k vorkommen, weshalb l=2n gilt. (Schmalian Theo D Skript 2017 S. 8 ff)
P: Sie wissen sicherlich, wie diese Wellenfunktion gedeutet wird (Wahrscheinlichkeitsinterpretation etc.). Wenn diese jetzt zu einem bestimmten Zeitpunkt normiert wird, gilt diese Normierung dann für alle Zeiten?
S: Ja, man kann für zeitunabhängige Hamiltonian einen Separationsansatz für \psi wählen, also \psi=f\left(
Setzt man das in die Schrödingergleichung ein, sieht man, dass f\left(t\right)=e^\left[-iHt/\hbar\right] gilt (Schmalian Theo D Skript 2017 S. 13 ff). Habe gesagt, dass es sich hierbei um den unitären Zeitentwic
handelt. Unitär, da das komplex konjugierte gleich dem Inversen des Operators ist.
P: Okay. Wie würden sie jetzt ein System freier Teilchen mit Spin in einem Magnetfeld beschreiben? Vernachlässigen wir hierfür die Spin-Spin Wechselwirkung.
S: Das mit dem Spin hat mich etwas verwirrt und ich habe nur H\ =\ -\mu B mit \mu~\ S, dem Spin, aufgeschr
P: Ja da fehlt jetzt noch etwas, wie sieht denn der Hamiltonian für freie Teilchen aus?
S: Ich checke jetzt erst, dass er auf Landau Niveaus hinaus will und schreibe H=\pi^2/2m-\mu B auf. Erkläre, dass \Pi=\left(p-e/c\vec{A}\right) die minimale Kopplung ist, die über Hamiltonmechanik aus der Lorentzkraft folgt. Außerdem ist A das Vektorpotential, dessen Rotation das Magnetfeld B ergibt.
P: Wie sieht das mit der Eichung aus?
S: Da die Rotation eines Gradienten immer Null ist, kann man A^\prime=A+\nabla\chi wählen. Also ein beliebiges skalares Eichfeld \chi hinzufügen.
P: Wie sieht es dann mit dem Hamiltonian und den Eigenwerten aus? Sind die variant?
S: Der Hamiltonian ändert sich unter Eichtransformation. Die Schrödingergleichung allerdings nicht, da wir auch die Wellenfunktion \psi\prime\ =\ \psi\ e^\ [i\ e/(\hbar c)\ \chi(t,r)] umeichen, sodass die Schrödingergleichung wieder gleich aussieht.
P: Ja und bleiben die Eigenwerte dann gleich?
S: Da bin ich mir nicht ganz sicher. War an dieser Stelle verwirrt, weil sich der Hamiltonian ja ändert und damit dachte ich, dass sich auch die Eigenwerte ändern müssten. Logisch klang das für mich aber nicht deswegen habe ich gesagt, dass ich das ausrechnen müsste, aber davon ausgehe, dass sie sich nicht ändern dürfen.
P: Ja dann rechnen Sie mal, wenn wir etwas in der theoretischen Physik nicht wissen, können wir es ja einfach mal ausprobieren.
S: Ich setze in die Schrödingergleichung das Umgeeichte Vektorpotential A^\prime und die Wellenfunktion \psi^\prime ein. Habe mich erinnert, dass es einfacher geht, wenn ich erst einmal die Wirkung von p-e/c\ A

Auf \psi berechne, statt gleich das Quadrat. (Rechnung siehe Schmalian Theo D Skript 2017 S. 82). Alles,
was mit der Eichung \chi zu tun hat kürzt sich. Die Eigenwerte ändern sich also nicht.
P: Sehr gut. Können Sie mir berechnen, welche Eigenenergien für solch ein Problem herauskommen? Sie
können den Spin vernachlässigen, der interessiert uns hier nicht.
S: Standard Rechnung zu Landau Niveaus. Ich habe das Ganze ohne Eichung gemacht. Also H=\left(\pi_x^2+\pi_
und dann gesagt, dass uns interessiert, wie sich diese Operatoren \pi_i verhalten. Dazu können wir
uns die Kommutatoren \left[\pi_i,\pi_j\right]=\left(p_i-e/cA_i\right)\left(p_j-e/cA_j\right)-\left(p_j-e/c
allgemein anschauen. Ausmultiplizieren und Produktregel führt zu \left[\pi_i,\pi_j\right]=i\hbar eB_k/c.
Das erinnert uns an die Kommutatorrelation \left[x,p\right]=i\ \hbar. Damit verhalten sich die \pi_i
wie x und p und da wir sie im Hamiltonian quadrieren und addieren sieht das wie ein harmonischer Oszillato
aus. Daher E=\hbar\omega\left(n+1/2\right).\ Das Omega bekommt man, indem man \widetilde{\pi_x}=\pi_x\left
wählt, sodass für den Kommutator tatsächlich i\hbar herauskommt. Der Hamiltonian soll wie ein HO aussehen,
daher gilt \pi_x^2/2m=^!1/2m\omega^2{\widetilde{\pi_x}}^2. Damit kann man \omega=\ eB\ /mc berechnen.
P: Okay. Was ist jetzt unser B_k?
S: Also ich habe das jetzt ganz allgemein aufgeschrieben. i,j,k stehen für die 3 Raumrichtungen. Haben
wir B in z-Richtung, dann ergibt sich ein HO in x-y-Ebene.
P: Genau das passt. Gehen wir weiter zur relativistischen Quantenmechanik. Da gibt es ja die Dirac
Gleichung. Schreiben Sie einmal auf wie die Aussieht, Die Herleitung, wie man darauf kommt kennen Sie
sicherlich.
S: H=c\vec{\alpha}\vec{p}+mc^2\beta.
P: So jetzt gilt hier ja Lorentzinvarianz. Können Sie mir sagen, wie wir die beweisen könnten? Ich
weiß, sie haben diese Rechnung noch nie gemacht. Es gibt keinen Grund nervös zu werden, ich will nur
wissen, wie Sie an so ein Problem herangehen würden.
S: Ich fande das selbst ganz interessant, weil ich mich das auch schon gefragt hatte. Ich wusste aber
nicht sonderlich viel über Lorentztransformationen. Habe dann erstmal erklärt, dass die Lorentzinvarianz
eine Forderung der speziellen Relativitätstheorie ist. Raum und Zeit können nicht mehr getrennt betrachtet
werden. In der Bewegungsgleichung dürfen daher keine unterschiedlichen Ordnungen der Ableitung nach
Zeit und Ort auftreten.
S: Habe dann gefragt, ob ich den Ansatz für eine spezielle Lorentztransformation machen soll? Z.b.
einen Boost.
P: Ja, sie können gerne einen Boost betrachten.
S: Schreibe die Transformationsmatrix für einen Boost auf. Also \psi^\prime=\Lambda\ \psi
P: (Unterbricht mich). Jetzt haben Sie die Wellenfunktion transformiert. Mit einer Lorentztransformation
transformieren wir aber Koordinaten. Da müsste also x'=\Lambda\ x stehen. Nach kurzem hin und her hat
er verstanden, wieso ich das verwechselt hatte. In 3D haben wir 4 Koordinaten und der Spinor hat ebenfalls
4 Einträge (Spin up-down und Teilchen-Antiteilchen). In höheren Dimensionen ist die Anzahl der Einträge
aber nicht identisch mit der Anzahl an Koordinaten. Daher macht es einen wesentlichen Unterschied,
was wir transformieren. Die Transformation der Wellenfunktion ist nicht die Lorentztransformation.
Er wollte dann, dass ich ganz allgemein die Transformation einer Wellenfunktion aufschreibe.
S: \psi^\prime=S\psi, mit einer beliebigen Matrix S
P: Genau. Jetzt setzen Sei das mal in die Diracgleichung ein. Es wird übersichtlicher, wenn Sie die
kovariante Form aufschrieben. Dafür müssen Sie die Gleichung von links mit \beta multiplizieren.
S: Komme nach etwas rumprobieren auf \left[\gamma_\mu p^\mu-mc\right]\psi=0
P: Jetzt setzen Sie die Transformation ein.
S: Wir hatten schon x^\prime=\Lambda x und \psi^\prime=S\psi\ dastehen. Also in der Diracgleichung:
\left[\gamma\Lambda^{-1}p^'-mc\right]S^{-1}\psi^\prime=0.
P: Im Term mit \prime mc^\prime haben wir ja keine Lorentztransformation. Was müssen Sie jetzt machen,
um wieder auf eine Diracgleichung zu kommen, die wie die untransformierte aussieht?
S: Mit S\ multiplizieren. Also: S\left[\gamma\Lambda^{-1}p^'-mc\right]S^{-1}\psi^\prime=0\ =\left[S{\gamma
P: Genau. Jetzt müssen sie also nurnoch S{\gamma\Lambda}^{-1}S^{-1}=\ \gamma lösen. Somit hat sich
ihr Problem auf ein mathematisches Problem reduziert. Mit dieser Gleichung kann man also die Transformatio
von \psi herausfinden.
P: Gehen wir über zur statistischen Mechanik. Jetzt habe ich Sie ja genug gequält, machen wir hier
was einfacheres. Wie sieht es denn mit der Bose-Einstein Kondensation aus?
S: Wir betrachten Bosonen und erwarten, dass bei niedrigen Temperaturen der Grundzustand von vielen
Teilchen besetzt ist. Das ist bei Bosonen ja im Gegensatz zu den Fermionen erlaubt. Für eine makroskopisch
Besetzung eines Zustands gilt lim\left(N\rightarrow\infty\right){\ n}_p/N\neq0. Mit n_p der Besetzungszahl
eines einzelnen Zustands.
Uns interessiert also, wie N aussieht. Dafür brauchen wir die Zustandssumme. Ich hab das alles für
Bosonen hergeleitet, da ich das gut konnte und auch zeigen wollte. Außerdem kann ich die Boseverteilungsfu
nicht auswendig. Alles wie in seinem Theo Fa 2019 Skript auf Seite 34.
Hatte dann am Ende N=p(e^ [β(E_p - μ)])^{-1} darstehen (kann man wie gesagt sofort über die Boseverteilung
herleiten.

P: Okay die exakte Rechnung kennen Sie sicherlich. Kürzen wir mal ab. Welche Annahmen machen Sie denn, und zu welcher Temperaturabhängigkeit kommen Sie?
S: Habe gesagt, dass man die Summe durch ein Integral ersetzt. Hier kurze Verwirrung, woher dann das Integral über x kommt, aus dem man das Volumen erhält, da man die ganze Zeit nur über p summiert. Habe gesagt, dass man eigentlich von Anfang an über p und x summieren müsste. Das war aber glaube ich nicht richtig. Habe dann noch gesagt man erweitert bei der Summe um \Delta x\ \Delta p\ /\ \Delta x\ \Delta p. Er hat es dann gut sein lassen.
Dann weiter mit \mu\le\ 0 gerechtfertigt, da sonst Integral divergiert und wir für bestimmte Energien sowieso negative Besetztungszahlen bekommen würden. Abschätzung also für \mu=\ 0 ergibt mit Substitution eine Abhängigkeit von T^{3/2}. (Siehe Schmalian Skript Theo Fa 2019 S. 40 ff.)
P: Jetzt haben wir ja einen Fehler gemacht, da die Ungleichung nicht immer stimmen kann.
S: Ja, man darf von der Summe nicht einfach ins Integral übergehen, da man dann die Zustände mit E=0 nicht mehr mitzählt. Man muss also immer den Fall E=0, also N\left(E=0\right)=\left(e^\left[-\beta\mu\righ
mitzählen.
P: Wann wird der interessant?
S: Bei \mu=\ 0, da er dann divergiert und bei divergierendem N ,mithalten kann‘, sodass lim\left(N\rightar
gilt. Also makroskopische Besetzung des Grundzustands.
P: Wie würden Sie dann die kritische Temperatur abschätzen?
S: Wir hatten jetzt schon N=\left(e^{\left[-\beta\mu\right]}-1\right)^{\left\{-1\right)}+const\cdot\left(k
dastehen. Ich wusste nicht, wie ich das ohne die explizite Rechnung machen sollte und hab einfach gemeint ich schieb alles von der Konstanten auf die linke Seite und nenne das \left(k_BT_C\right)^{3/2}.
P: Was passiert dann aber mit N\left(E=0\right)?
S: Achso, das interessiert uns genau im Grenzfall T_C noch nicht, da da gerade erst \mu zu Null wird und wir am kritischen Punkt noch keine makroskopische Besetzung haben.
P: Genau! das wollte ich hören.
Schmalian fragt den Beisitzer, ob er noch Fragen hat. Dann verlassen die beiden das Meeting. Schmalian kommt nach wenigen Minuten zurück und sagt mir meine Note. Er hat nochmal positiv angemerkt, dass ich mich von der Aufgabe zur Lorentzinvarianz nicht nervös machen gelassen habe.
Es kann immer mal vorkommen, dass er was Neues fragt. Ich würde also empfehlen, dass man, wie bei einem Gespräch mit Kommilitonen auch, ganz selbstbewusst an die Sache geht und einfach mal ausprobiert. Habt keine Angst, falsch zu liegen. Alles ist besser als sich einfach zurückzulehen und zu sagen, dass man es nicht weiß.