

Fach: Theoretische Physik
---------------------------

PrüferIn: Schmalian
---------------------

<input checked="" type="radio"/> BP <input type="radio"/> NP <input type="radio"/> SF <input type="radio"/> EF <input type="radio"/> NF <input type="radio"/> LA	Datum: Juni 2020	Fachsemester: 6
--	------------------	-----------------

Welche Vorlesungen wurden geprüft? Theorie D, Theorie E, Theorie F a+b
--

Welche Vorlesung der PrüferIn hast Du gehört? Theorie F a+b
---

## Zur Vorbereitung

Absprache mit PrüferIn über folgende Themengebiete: Keine Absprachen
--

Absprache mit PrüferIn über Literatur/Skripte: Keine Absprachen
---

Verwendete Literatur/Skripte: Komplettes Durcharbeiten (exklusive Streutheorie!) von J.J. Sakurai, J. Napolitano: "Modern Quantum Mechanics, Second Edition" (wenig mathematisch rigoros, aber ein gewaltig gutes Physikbuch) und Auszüge von "EQUILIBRIUM AND NON-EQUILIBRIUM STATISTICAL THERMODYNAMICS MICHEL" von LE BELLAC, FABRICE MORTESSAGNE AND G. GEORGE BATROUNI (Nur Teil über Quantenstatistik. Teils deutlich über Prüfungsniveau). Schmalians Theorie D (ist ganz gut, viel Wellenmechanik) und Theorie F Skript (exzellent! Sollte ein Buch sein).
--

Dauer der Vorbereitung: 10 Wochen, im Mittel um die 8 Stunden täglich.
--

Art der Vorbereitung: Viel Lesen, viel Übungen aus dem Sakurai rechnen, viel mit Partner diskutieren. Den anderen immer zu dem heute neu gelernten ausquetschen. Gegenseitig eigene Beweise und Ideen des Tages vorrechnen lassen.
--

Allgemeine Tips zur Vorbereitung: Such dir einen Partner oder zwei. Nicht mehr. Am besten selbes Niveau.
--

## Zur Prüfung

Wie verlief die Prüfung? Schmalian war sehr freundlich. War eher ein Gespräch als eine Prüfung. Unglaublich sympathischer Mann.
---

Wie reagierte die PrüferIn, wenn Fragen nicht sofort beantwortet wurden? Kann ich nicht wirklich beurteilen. Aber ich denke er lässt einem viel Zeit. Ist mir nie ins Wort gegrätscht während einer Rechnung.
---

Kommentar zur Prüfung: Macht es beim Schmalian. Ihr werdet dort fair benotet.
---

Kommentar zur Benotung: 1.0
-----------------------------

Die Schwierigkeit der Prüfung: Kosmische Hintergrundstrahlung...Aua.
--

## Die Fragen

Disclaimer: Prof. Schmalian hat sich deutlich eloquenter und mit mehr Know-How ausgedrückt als ich ihn hier aus meiner Erinnerung wiedergebe!

Teil 1: Axiome der QM und Interpretation der QM Theorie

Prüfer: Beschreiben sie einen quantenmechanischen Messprozess.

Ich: Born-Interpretation, explizit Wellenfunktionskollaps. Klassische Messapparatur als Filter zu verstehen Stern und Gerlach als Beispiel.

Prüfer: Geben sie die Zeitentwicklung eines Zustandes an.

Ich: Hamiltonian ist axiomatisch der Generator von Zeittranslationen. Hieraus folgt Schrödingergleichung und als Lösung der Zeitentwicklungsoperator.

Prüfer: Das sind ja zwei verschiedene dynamische Prozesse, welche den Zustand ändern, die sie da beschrieben haben: Hamiltonianentwicklung und Kollaps. Wie sind beide Prozesse in Einklang zu bringen? Können sie die Messung nicht dynamisch mit dem Zeitentwicklungsoperator beschreiben?

Ich: Hamiltonian des Messapparats ist uns unbekannt. Deshalb ist keine vollständige QM Beschreibung des dynamischen Messvorgang möglich. Hab darauf verwiesen, dass der Kollapsgedanke nur Sinn macht, falls man das Messgerät als klassisch behandelt. Beispiel: Spin. Up or Down, das Messgerät kennt nur einen definitiven Messwert anzeigen und zwingt das System in diesen Zustand. Die Kollapsmessung ist also als eine Art klassischer Grenzfall zu verstehen.

Prüfer: Können sie so einen Grenzfall bilden? Also ich bin da ganz bei Ihnen, aber kennen sie ein einfache Argument, wie man aus der Hamiltonianentwicklung eines QM Messgeräts den Kollaps im klassischen Limes ableiten kann?

Ich: Druckse kurz rum. Höre dann aber auf und sage ihm offen, dass ich das nicht trivial finde und keine Antwort kenne.

Prüfer: Gut ich nämlich auch nicht. Ich denke da schon sehr lange Zeit darüber nach. (Merkt einiges zum Problem an, leider nichts wirklich befriedigendes, wie er selbst anerkennt.) Machen wir weiter.

Ich: \*Erleichterung, dachte er erwartet ernsthaft eine Antwort.\*

Teil 2: Bestrahlung eins Atoms.

Prüfer: Zeitabhängige Störungstheorie. Ich bestrahle ein Atom mit EM Strahlung.

Ich: Selbständig folgende Schritte durchgeführt

1) Fermis goldene Regel für harmonische Störungen  $V = \prime\{V\} \exp(i\omega t) + \dagger\{\prime\{V\}\} \exp(-i\omega t)$  erklärt. Auf spontane Emission und Absorption eingegangen, gefragt ob er die Fermi Regel kennt oder Beweis benötigt. Wollte er nicht haben.

2) Strahlungsfeld als klassisch betrachten, Maxwellgleichungen ohne Ströme ergeben für ebene Wellen die Lösung  $A \propto \vec{\epsilon} \cos(\omega t - \vec{k}t)$  mit  $\nabla A = 0$  und  $\phi = 0$ . Habe hier nicht explizit die Potential-Maxwell-Gleichungen gelöst, aber erklärt, dass unter der Eichung ( $\nabla A = 0$  und  $\phi = 0$ ) im stromfreien Fall\* halt eine simple Wellengleichung entsteht und man so die ebene A-Lösung trivial ablesen kann. E-Feld und B-Feld hieraus berechnet und Bild der Welle gezeichnet. Fand er gut, dass ich es zeichnen konnte und noch an Theo C erinnert habe glaube ich.

\*Das mit der Stromfreiheit hat er irgendwie als Zwischenfrage gestellt.. Erinnere mich nicht mehr exakt. Die Frage ging in die Richtung: Geht die Eichung  $\nabla A = 0$  und  $\phi = 0$  immer? Antwort hab ich dann mit Nein gegeben und Stromfreiheit gefordert, das war wohl richtig.

3) Wasserstoffhamiltonian. Minimale Kopplung, A einsetzen, Störung abspalten. Zeigen, dass harmonische Welle eine Störung wie in 1) verursacht.

4) Mit vielen Tricks die Übergangsraten berechnet. Vgl. Kapitel 5.8 im Sakurai. Wäre zu lang alles zu nennen. Hab das komplett durchgezogen. Zwischendrin hat er gemeint ich soll erst mal die Polarisation speziell in z-Richtung wählen, damit wir später noch was zu diskutieren haben. Vorfaktoren waren mir irgendwann zu stressig und  $\propto$  wurde mein Freund. Langwellennäherung durchgeführt, qualitative Begründung hat ihm nicht genügt. Hab dann explizit größenordnungsmäßig das erst lineare Glied abgeschätzt (Unterdrückt mit  $Z/274$ ), hat mich aber direkt unterbrochen und gemeint ich kann das.

5) Am Ende findet man für  $\vec{\epsilon} = \vec{z}$  die Rate  $w(i \rightarrow n) \propto \langle i | Z | n \rangle$ . Auswahlregeln ergeben sich dann durch Analyse des Matrixelements, also  $\Delta l = \pm 1$  und  $m = 0$ . Die Auswahlregeln wollte ich mit dem Wigner-Eckhardt Theorem begründen, das fand er nicht gut und zu mathematisch, wurde unterbrochen und gebeten das einfacher zu machen. Hab dann gefragt ob er mir glaubt, dass Drehimpulserhaltung gilt und Photonen Spin 1 haben und das deshalb  $\Delta l = \pm 1$  richtig sein muss. Das fand er viel besser. In den alten Protokollen ist erklärt wie man leicht die m-Auswahlregel über  $[L_z, Z] = 0$  findet, das hab ich dann gemacht, gefiel ihm besser.

(Bemerkung: Will man die l Auswahlregel richtig und nicht über mein handwavy Argument herleiten braucht man mehr Sorgfalt wie in vielen alten Protokollen gegeben ist. Der  $(-1)^l |n\rangle$  Trick (beschrieben in viele Altprotokollen) gibt einem nämlich nur, dass gerade l-Übergänge nicht stattfinden können. Aus dem Wigner-Eckhardt Theorem findet man dann aber zusätzlich, dass alle Übergänge mit  $l = 0, 1, -1$  verschwinden. Bleibt also  $l = -1, 1$ .)

Prüfer: Warum ist denn  $m = 0$ ? Was passiert bei anderen Polarisationsrichtungen  $\vec{\epsilon}$ ?

Ich: Da erhalten sie im allgemeinen nicht-verschwindende Übergänge mit  $m = \pm 1, 0$ . Kurz Rechnung modifiziert. Hat mich unterbrochen und es mir so geglaubt.

Prüfer: Aber der Raum ist doch isotrop, warum spielt es eine Rolle in welche Richtung die Welle polarisiert ist. Diese m-Zahl bricht doch die Isotropie? Das ist wohl doch falsch...

Ich: Naja, ihr Raum ist vielleicht isotrop, aber über m kann man nur reden wenn man die Quantisierungsachse gesetzt hat und dies tut das Messgerät mit welchem Sie messen welche m-Übergänge stattfinden. Wenn ich mein Koordinatensystem drehe verändert sich natürlich auch mein m. Die Polarisierungsrichtung ist also relevant in Bezug auf die Quantisierungsachse. Das hat aber nichts mit Isotropieverletzung im Raum zu tun.

Teil 3: Statistische Physik

Prüfer: Landauphasenübergangstheorie.

Ich: Kann ich das explizit für das Ising-Modell diskutieren? Am besten homogen?

Prüfer: Ja.

Ich: Hab alles gemacht was in seinem Skript dazu stand. Er wollte auf die Wärmekapazität heraus. Bekam heraus:  $T < T_c$ :  $k \cdot T$  und  $T > T_c$ : 0. Vorgehen beschreibe ich hier jetzt nicht ist im Theorie Fa Skript von ihm.

Prüfer: Die Wärmekapazität wird null für große Temperaturen? Ist dass was sie erwarten?

Ich: Nein, das hat mich zugegeben schon bei der Vorbereitung etwas gestört, aber habe es verdrängt. Das würde ja heißen, wir können ohne Schwierigkeiten Milliarden Kelvin erhalten, welches Material macht sowas schon.

Prüfer: Das ist wohl ein Indiz, dass ihre Rechnung falsch ist..

Ich: .. oder dass Landaus Theorie zusammenbricht für höhere Temperaturen.

Prüfer: Nein. Schauen sie sich ihre freie Energie nochmal an. Landau ist nicht schuld an dem Schlamassel. Schauen sie auf  $f_0$  (Defintion in seinem Skript). Das haben sie einfach abgeleitet als hätte es keine T-Abhängigkeit!

Ich: Stimmt! Das gibt uns dann einen Untergrundbeitrag der vom Material abhängt, welches die Isingweine chselwirkung zwischen seinen Spins hat.

Prüfer: Richtig, zeichnen sie die totale Wärmekapazität. Also die von vorhin + eine beliebige Untergrundwä  $C_0$ .

Ich: Ja, jetzt macht es mehr Sinn. Für Temperaturen größer als  $T_c$  ist die Wärmekapazität nicht null, sondern nur der Ising-Beitrag verschwindet, andere Effekte im Material dominieren.

Prüfer: Nehmen sie mal an ihr Material besteht aus freien Fermionen. Was ist dieser  $C_0$  Beitrag.

Ich: Da bekommen wir  $C_0 = \text{const.} \cdot T$  für relativ niedrige Temperaturen! Das kann man sich mit einem relativ einfachen Argument klar machen: Fermikante größtenteils erhalten. D.h.  $U(T \text{ klein}) = U(0) + k_B T \cdot \text{Anzahl der angeregten Fermionen}$ . Das ist so zu verstehen: Die Fermikante wird um  $k_B T$  verbreitert (hab das mit linearer Taylorentwicklung der Fermifuntion um  $E_f$  bewiesen), d.h. einige Fermionen springen auf höhere Energieniveaus und haben im Mittel dann die extra Energie  $k_B T$ . Die Anzahl derjenigen Fermionen, die springen ist proportional zur Anzahl der Zustände im neu zugänglichen Energiebereich, also  $(\text{Zustandsdichte bei } E_f) \cdot \text{Energieverbeiterung}$ , also  $\rho(E_f) \cdot k_B T$ . Vorausgesetzt, die Zustandsdichte ist hinreichend glatt um  $E_f$ . Die Einschränkung fand er wohl wichtig, er nickte eifrig. Insgesamt also  $U(T \text{ klein}) = U(0) + (k_B T)^2$  und damit  $C \propto T$ .

Teil 4: Die Hintergrundstrahlung

Prüfer: Kennen sie kosmische Hintergrundstrahlung? Stichwort: 2.7 Kelvin (Glaube es war 2,7)

Ich: Phononen, Planksches Strahlungsgesetz, 2.7 K gibt Form des Planck Spektrum an.

Prüfer: Ja aber warum 2.7 K. Erklären sie mir das! Mit was equilibrieren Photonen?

Ich: \*An dem Punkt echt überfordert\* Nicht mit sich selbst, mit Materie. Also diese 2.7 K muss ja dann die GGW Temperatur am Urknall gewesen sein???

Prüfer: In der Zeit, in welchem die Hintergrundstrahlung entstand war da ein heißes Plasma aus Elektronen und Protonen. Die sind nicht zu Wasserstoff geworden...Was sagt uns das?

Ich: Naja, dann war die thermische Energie  $k_B T$  größer als ein Rydberg  $\sim 13.6 \text{ eV}$ . Das ist ja die Ionisierungsenergie.

Prüfer: Wie heiß war es also mindestens?

Ich: Das kann ich im Kopf nicht so leicht umrechnen!

Prüfer: Dann sag ich ihnen, dass  $\text{eV}/k_B \sim 10\,000 \text{ K}$ .

Ich: Okay, da war es heißer, als 2.7 K. Viel heißer. Vermutlich weit über 100.000K.

Prüfer: Richtig. Und warum haben wir dann ein 2.7 K Spektrum?

Ich: ...

Prüfer: Unser Universum expandiert. Die Wellenlängen haben das ebenfalls zu spüren bekommen. Aber ich denke, mit der Physik, die hier abgeprüft werden soll, sind wir fertig.