

Fach: Experimentelle Physik		
PrüferIn: Wolf		
☒ BP ☐ NP ☐ SF ☐ EF ☐ NF ☐ LA	Datum: 24. April 2020	Fachsemester: 7
Welche Vorlesungen wurden geprüft? Ex4, Ex5, Ex6		
Welche Vorlesung der PrüferIn hast Du gehört? Keine		

Zur Vorbereitung

Absprache mit PrüferIn über folgende Themengebiete: Moderne Experimentalphysik
Absprache mit PrüferIn über Literatur/Skripte: Nada.
Verwendete Literatur/Skripte: Wikipedia (Deutsch und Englisch), Povh, Mitschriebe von Ex4 - Wulfhekel, Ex5 - Wernsdorfer, Ex6-Folien von Husemann
Dauer der Vorbereitung: 3 Wochen, Corona, 2 Wochen
Art der Vorbereitung: allein
Allgemeine Tips zur Vorbereitung: Wikipedia ist der Boss.

Zur Prüfung

Wie verlief die Prüfung? Super entspannt. Das war die angenehmste Prüfung, die ich jemals hatte. Professor Wolf hatte Fragen vorbereitet, die er der Reihe nach gefragt hat, ein Anfangsthema musste ich nicht raussuchen.
Wie reagierte die PrüferIn, wenn Fragen nicht sofort beantwortet wurden? Hat Hinweise gegeben und irgendwann die Lösung gesagt.
Kommentar zur Prüfung: Super geil.
Kommentar zur Benotung: 1,0
Die Schwierigkeit der Prüfung: Hatte Pionenzерfall nicht mehr im Möckel. Hatte aber auch gegambled, dass der nicht drankommt.

Die Fragen

P: Professor

S: Student

B: Beisitzer

(Alles beginnt damit, dass S etwa 5 min vor Beginn der Prüfung am Raum ist, noch niemand anderes ist da, dann kommt P mit Kaffee dazu und schließt auf. B fehlt noch, also halt nochmal fünf Minuten Smalltalk. Kann S eigentlich nicht so gut, aber P hat ausgleichend viele Kompetenzen. Dann kommt B, einige Formalia werden erledigt.)

P: So, weil ich so Prüfungen nicht so oft mache, habe ich mir einige Fragen aufgeschrieben. Ach übrigens: Sie fühlen sich vorbereitet und gesund genug, um die Prüfung durchzuführen?

S: Besser wird es nicht werden.

P: Gut. Nur zum Sichergehen: Das ist die Bachelorabschlußprüfung?

S: Ja.

P: Das heißt, dass wir Ex4, Ex5 und Ex6 abfragen müssen, ich schlage vor das auch einfach in dieser Reihenfolge durchzuführen. Fangen wir mal: Beschreiben Sie mal ein Experiment mit dem die Teilchennatur des Lichts belegt werden kann.

S: Da gibt es zum Beispiel den Photoeffekt. Dabei strahlt man Licht auf ein Metall, die Kathode, und das Licht schlägt dann Elektronen heraus die an einer Anode eingesammelt werden. Man kann dann den Photostrom messen.

P: Was passiert, wenn ich jetzt die Intensität des Lichts erhöhe?

S: (Erinnert sich dunkel an irgendeinen Graphen.) Uh, da muss ich kurz überlegen. Es gibt da so einen Graphen (zeichnet I-U-Plot mit zwei verschiedenen Kurven), und die Achsenbeschriftung sind U und I (? P nickt zum Glück zustimmend). Da links sind beide Kurven Null, weil da nicht genug Energie übertragen wird um die Austrittsenergie zu erreichen. Wenn man jetzt also die Intensität erhöht, dann wird einfach nur der Strom größer, weil quasi mehr Photonen da sind, die je ein Elektron herausschlagen.

P: Genau. Durch welchen Effekt kommt dieser Anstieg am Anfang zustande?

S: Ja, da ist so Spannung (hat keine Ahnung rät herum), Compton-Effekt? Nee, stimmt nicht, das war dumm...

P: Kein Problem, ich sag's Ihnen g'schwind: Die Anode wirkt wie so ein Staubsauger. Je höher die Spannung ist, desto effektiver saugt die und irgendwann geht die Kurve in Sättigung, weil alle Elektronen auf die Anode treffen. Was passiert aber, wenn man die Wellenlänge des Lichts immer weiter verkürzt?

S: (Malt den anderen relevanten Plot für den Photoeffekt auf.) Dafür braucht man jetzt so ein Diagramm, mit der Energie der Photonen hier und der Energie der Elektronen auf der y-Achse. (S ärgert sich, hätte lieber Abszisse gesagt, war aber in diesem Moment dumm.) Es gibt eine Grenzfrequenz, bei der die Elektronen herausgelöst werden können, darunter passiert nix, obendrüber steigt der Graph linear mit Steigung h an.

P: Schreiben Sie doch grad mal die Formel für die Energie und den Impuls eines Photons hin.

S: (Schreibt nach einigem Sortieren: $E = hf = hc/\lambda$ und $p = h/\lambda$)

P: Wie beschreibt man eine ebene Welle mathematisch?

S: (Schreibt, nach dem Hinweis dass die Zeit fehlen würde: $P = e^{i(kr - \omega t)}$)

P: Malen Sie das doch mal auf.

S: (Malt ebene Wellenfronten.) Man hat hier in gleichmäßigen Abständen Wellenfronten und senkrecht dazu den Wellenvektor.

P: Oje, viel zu umständlich in 2 Dimensionen. Malen Sie das doch mal im Impulsraum.

S: (Malt einen Kreis. Das ist falsch und dumm, deswegen weist P darauf hin und S korrigiert zu einer Deltadistribution.) Das ist dann die Fouriertransformation von der Ortsraumwellenfunktion.

P: Ja, jetzt stimmt es. Sehen Sie: Ebene Wellen sind so trivial, die kann man nicht mal mit einer mathematischen Funktion beschreiben!

S: Sagen Sie das mal einem Theo A-Studenten.

P: Sagen Sie mir lieber mal, wie lang ein Photon ist.

S: (Steht auf dem Schlauch, rät rum, schließlich mit viel Hilfe von P:) Unendlich lang, denn es ist ja die Fouriertransformierte von der Deltadistribution.

P: (Irgendeine überleitende Frage.) Was gibt es denn noch so für fundamentale quantenmechanische Experimente?

S: Den Franck-Hertz-Versuch. (Skizziert Versuchsaufbau.) Da hat man eine Glühkathode, dann eine Beschleunigungsanode und noch eine Gegenspannung in einer teilevakuierten Röhre. (Skizziert den typischen I-U-Plot.) Man bemerkt, wenn man den Strom misst, dass es da in periodischen Abständen Maxima gibt. Das kommt dadurch zustande, dass die beschleunigten Elektronen mit dem Restgas stoßen und dieses anregen. Dabei verlieren sie einen Teil der Energie, wenn sie durch die anliegende Spannung genug beschleunigt werden, dann können sie erneut stoßen. Man kann das sogar sehen, je nach Material bilden sich dann leuchtende Scheiben in der Röhre aus.

P: Die Elektronen stoßen ja an den Atomen. Nennen Sie doch mal ein Atommodell, in dem dieser Vorgang beschreibbar ist. Am besten im Vergleich zu einem früheren.

S: Früher gab es das sogenannte Rosinenkuchenmodell von Thompson, bei dem die Elektronen alle in eine positive Grundmasse eingebettet sind. Das Bohrsche Atommodell ist dann die nächste Stufe. Nach de Broglie haben Elektronen auch Wellencharakter und im Bohrschen Atommodell existieren dann eben verschiedene Bahnen von Elektronen um den Kern herum, deren Umfang jeweils das Vielfache der Elektronenwellenlänge sein muss, weil die sonst destruktiv interferieren würden und dann würden sich Elektronen selbst auflösen. Das wäre dumm.

P: Sehen Sie, das ist so eine Sache, die ich überhaupt nicht verstehe: Warum wird dieses Modell überhaupt noch gelehrt? Das ist so rudimentär und so unintuitiv: Eigentlich sind Elektronenbahnen ja dreidimensional. Und wer kann sich schon vorstellen, wie eine stehende Welle auf einer Kreisbahn aussieht? Es gibt aber ja zum Glück neuere Modelle. Wie geht es denn richtig?

S: Tatsächlich sind die Elektronenbahnen dreidimensionale Orbitale. Für das Wasserstoffatom kann man das lösen, da sind die Wellenfunktion dann eine Kombination aus den Kugelflächenfunktionen und den Laguerrepolynomen. Man benötigt drei Quantenzahlen um das zu beschreiben, die Hauptquantenzahl, welche dem Energieniveau und damit der Bahn im Bohrschen Atommodell entspricht, der Neben- und der magnetische Quantenzahl, welche daraus entstehen, dass das Wasserstoffatom ein Zentralpotential ist. Das Energieniveau schaut dann etwa so aus (zeichnet die 0. Ordnung Störungstheorie), und die Energien liegen bei Ry/n^2 .

P: Was und wie groß ist denn die Entartung?

S: (Steht komplett auf dem Schlauch, da gedanklich schon bei der Feinstruktur) Entartung bedeutet, dass Zustände mit verschiedenen Quantenzahlen die gleiche Energie haben. Das wird aber meistens aufgehoben durch weitere Effekte. (Rät noch irgendwas herum für die Größe der Entartung, hat kein Schimmer worauf P herauswill.)

P: Die Entartung ist n^2 -fach. (Stimmt, wir waren ja noch gar nicht bei FS.) Sie haben ja eben schon von weiteren Korrekturen geredet. Was gibt es denn da so?

S: Das nächste ist die Feinstruktur, da gibt es die Spin-Bahn-Kopplung, eine relativistische Korrektur und den Dyson-Term aus der QFT. (Kurze Erklärungen zu den drei Termen: Spin des Elektrons mit der Elekt: keine klassische Impulsbeziehung und die Delokalisierung des Elektrons.)

P: Und sonst so?

S: Eine Stufe kleiner gibt es dann noch die Hyperfeinstruktur, die beschreibt die Kopplung des Elektrons an den Kernspin.

P: Sie sind zwar aufgeregt, aber vielleicht kriegen Sie es hin: Wieviele Elektronen hat das Sauerstoffatom?

S: (Fühlt sich eigentlich zu diesem Zeitpunkt richtig entspannt, seit dem Franck-Hertz-Versuch spätestens hat die Prüfung sogar Spaß gemacht.) 8. Um die auf die Schalen zu verteilen kann man das Madelungschema benutzen: 2 e in 1s, 2 e in 2s, 4 e in 2p. Das heißt in 2p sind noch 2 Plätze frei.

P: Warum kann man nur zwei Elektronen da rein?

S: Weil Elektronen Fermionen sind, das heißt, dass keine zwei identischen Teilchen an den gleichen Orten sein können. Hätten Elektronen noch mehr Eigenschaften, dann könnte man halt entsprechend mehr Elektronen an den gleichen Ort packen. Da sie aber nur den Spin als Eigenschaft haben, passen eben nur zwei Elektronen rein.

P: Warum sind die Sauerstoffatome so bindungsfreudig?

S: Es gibt da in der Chemie diese Oktettregel, welche besagt, dass alle Atome Edelgaskonfiguration anstreben. Deswegen geht das Atom dann Bindungen ein mit anderen Atomen. (S fängt an nonchalant ein paar fancy Begriffe zu dropfen (LCAO, kovalente Bindung) und halb zu erklären, bevor P abwürgt.)

P: OK, das reicht. Jetzt sind wir ja sowieso schon bei Festkörpern, dann malen Sie doch bitte gerade mal einen auf und füllen Sie ihn mit Elektronen.

S: (Malt einen 3d-Kasten.)

P: Oh, machen Sie es lieber einfach.

S: (Malt eine 1d-Kasten.) Die Elektronen sehen dann sinusförmig aus. Die unterste Mode ist ein so ein Buckel, da passen wieder zwei Elektronen rein. In der nächsten Mode gibt es in der Mitte einen Knoten, da passen auch wieder zwei Elektronen rein und so weiter und so fort.

P: Wie heißt die höchste Energie, die eingenommen wird?

S: Das ist die Fermienergie.

P: Wenn man dann vorher bei dem Photoeffekt Elektronen herauslöst, wie geht das dann?

S: (Skizziert Fermi-Dirac-Verteilung.) Bei $T=0$ ist die Verteilung eine reine Stufenfunktion, bei höheren Energien rundet sich das so bissle ab.

P: Wo sind die Elektronen, die wir vorher beim Photoeffekt herausgelöst haben?

S: Die sind hier in diesem kleinen Zipfel, der höher als die Fermienergie ist.

P: Ja genau! Sehen Sie, wie abgefahren das ganze ist? Wie wahnsinnig viele Elektronen in so einem Festkörper sind? Und dann soll man das alles auch noch beschreiben! Deswegen bin ich Teilchenphysiker. Wissen Sie zufällig wie groß die Fermienergie ist? Zum Beispiel von Kupfer?

S: In Ex 5 hieß es mal: "Der Fermisee ist 70000 K tief."

P: Das ist genau die richtige Größenordnung! Ich habe das vorher mal nachgeguckt: Die Fermitemperatur von Kupfer ist (irgendwas rund um 75000). Können Sie jetzt bitte mal die Energiedispersion für Elektronen zeichnen?

S: (Malt ein Achsenkreuz und die Dispersionsrelation für Phononen rein.) Es gibt da die Brillouin-Zone, die wiederholt sich dann periodisch. Gegen den Rand hin flacht das ab, in der Mitte ist das aber hinreichend linear.

P: Nee, das ist falsch. Mir ist das bei der letzten Prüfung auch passiert: Das ist die für Phononen.

S: Oh, wie dumm. Die für Elektronen schaut so parabelförmig aus, flacht aber am Rand trotzdem ab.

P: Ja. Man kann die dann noch so nach oben ergänzen indem man die dann immer so umklappt.

S: Das schaut dann ungefähr so aus. (Skizziert.)

P: So, da haben Sie ja jetzt diese Energiebänder. Da gibt es ja auch ein paar spezielle.

S: Das sind dann Leitungsband und Valenzband. (Skizziert einfaches Modell.) Die sind wichtig um Leiter zu bestimmen: Wenn das oberste gefüllte Band komplett voll ist, dann kann der Stoff nicht leiten, weil dann keine Elektronen angeregt werden können. Das ist zum Beispiel so, wenn die Fermienergie in der Bandlücke zwischen den Bändern liegt. Wenn die Fermienergie in einem Band verläuft, dann kann der Stoff gut leiten.

P: So, genug Festkörperzeug. Welche fundamentalen Wechselwirkungen und Teilchen kennen Sie?

S: (Nice, endlich der hotte shit.) Die fundamentalen Wechselwirkungen sind vier: Gravitation, Elektromagnetismus, schwache und starke Kraft. Einige von denen lassen sich in gewissen Theorien noch vereinfachen. Es gibt drei Neutrinos mit zugehörigen Leptonen. Also eigentlich sind alles Leptonen (Schreibt die Duplette $(\nu_e, e), (\nu_\mu, \mu), (\nu_\tau, \tau)$ auf), dann gibt es noch sechs Quarks (schreibt $(u, d), (c, s), (t, b)$). Für die

Wechselwirkung existieren dann noch die Austauschteilchen. Bei der schwachen gibt es W in zwei Varianten und Z; das Photon A für Elektromagnetismus; das Gluon g bei der starken Kraft und es gibt auch noch das Higgsteilchen H.

P: Wieviele Gluonen gibt es?

S: Das kommt drauf an, wie weit man in ein Nukleon hereinguckt. Es gibt da die Skalenbrechung und deshalb existieren mit zunehmendem Energieübertrag immer mehr Seequarks und Gluonen.

P: Das meine ich nicht. Es gibt eine feste Zahl von verschiedenen Nukleonen, die existieren.

S: (Jetzt hat's geschnaggelt:) Es gibt drei Farbladungen und jedes Gluon hat zwei, also existieren $3 \times 3 = 9$ Gluonen.

P: (Grinst sich einen ab.) Das ist falsch.

S: Dann sind es wohl acht.

P: Stimmt. Gruppentheoretisch existiert ein Oktett und ein Singulett. Das Oktett ist in der Natur realisiert, das Singulett nicht. Wenn das so wäre, dann gäbe es farblose Elementarteilchen. Jetzt will ich mit Ihnen nochmal was machen, was ich bisher noch bei keiner Prüfung gemacht habe. Vorhin erwähnten Sie Baryonen, doch es gibt da ja auch noch so ein paar leichtere Teilchen.

S: Es gibt noch Mesonen.

P: Genau, was ist denn in einem π^+ drin?

S: (Schreibt) $|\pi^+\rangle = |u \bar{d}\rangle$

P: Das ist eine dumme Schreibweise. Machen Sie das lieber mal so, wie in einem Feynmandiagramm und zeichnen Sie den Zerfall ein.

S: Ich rate mal, dass das Pion über die schwache Wechselwirkung, hier ein W^+ , in ein Elektroneneutrino und ein Positron zerfällt.

P: Überraschung: Das stimmt nicht, obwohl man das eigentlich denken würde. Tatsächlich zerfällt das viel öfter in ein Myon und Myoneneutrino. Haben Sie eine Ahnung warum?

S: (Erinnert sich dunkel an irgendeine Vorlesungsfolie.) Das ist bestimmt wieder irgend so ein Erhaltungssatz. Aber ansonsten...

P: Der Witz an der Sache ist, dass das W-Boson nur an linkshändige Teilchen koppelt.

S: (Skizziert den Zerfall.) Im Ruhesystem des Protons fliegen die beiden Teilchen back-to-back davon und damit funktioniert das nicht, weil das W-Boson an ein linkshändiges Antiteilchen koppeln müsste. Aber das wäre doch beim Myon genauso?

P: Ja. Gut, ich sage Ihnen geschwind, damit Sie nicht im Dunkeln stehen bleiben: Bei massebehafteten Teilchen ist bei jeder Händigkeit immer noch ein kleiner Teil der jeweils anderen Händigkeit beigemischt. Je schwerer das Teilchen, desto größer der Anteil, desto stärker die Kopplung. Gut, meine Fragen sind jetzt ziemlich erschöpft, also bitte ich Sie mal kurz raus zu gehen.