

Prüfungsprotokoll der Fachschaft Physik

Fachschaft Physik

Vorlesungen, die geprüft werden:

Moderne Experimentalphysik I und Moderne Experimentalphysik II

Prüfer: Prof. U. Husemann

Datum der Prüfung: 08.10.2024

Prüfungsart: Mündliche Prüfung

Vor der Prüfung:

Welche Vorlesungen hast du gehört? Waren diese von den Prüfern und hast du diese auch regelmäßig besucht? Ex 4 (Wulfhekel) und Ex 5 (Ustinov, Klute), fast immer anwesend

Fanden vor der Prüfung Absprachen statt (Form, Inhalt, Literatur, Skripte, ...)? Wenn ja, welche? Wurden sie eingehalten? Prüfung ungefähr gedrittelt von den Themen (Atom-, Festkörper- und Teilchenphysik), hat ungefähr gepasst

Wie lange hast du auf die Prüfung gelernt und hast du alleine oder in einer Gruppe gelernt? ca. 7 Wochen Lernen (6 Tage pro Woche jeweils ca. 2-4 Stunden), davon erst 4 Wochen Karteikarten schreiben und lernen, dabei thematisch am Modulhandbuch orientiert, Fragen in Kleingruppe geklärt, dann 3 Wochen Protokolle abfragen und Themen, die nicht so gut geklappt haben, nochmal anschauen

Welche Literatur/Skripte hast du verwendet? Kannst du Empfehlungen aussprechen?

Generell: Internet (viel Wikipedia)

Atomphysik: Vorlesungsmitschrieb, Demtröder

Festkörperphysik: Vorlesungsmitschrieb, Gross & Marx

Teilchenphysik: Vorlesung 2020 von Husemann, Demtröder, Povh

Kannst du Tipps für die Vorbereitung geben? (Lernstil, ...) Für mich hat meine Art der Vorbereitung gut funktioniert. Die Karteikarten am Anfang waren gut um Dinge auswendig zu lernen, aber auch die Protokolle waren wichtig um ein Gefühl dafür zu bekommen, was in einer Prüfung wirklich wichtig ist. Generell ist es auch sehr gut in einer Gruppe zu lernen, da Fragen dann viel besser geklärt werden können. Das muss auch nicht bei allen der gleiche Prüfer sein.

Zur Prüfung:

Wie ist der Prüfungsstil (Prüfungsatmosphäre, (un)klare Fragestellungen, Fragen nach Einzelheiten oder eher größere Zusammenhänge, gezielte Zwischenfragen oder lässt

er/sie dich erzählen) der Prüfer? Wird Unwissen abgeprüft? in seinem Büro am Campus Nord, vor mir Blatt Papier um während der Prüfung Skizzen zu machen oder Formeln aufzuschreiben, angenehme Atmosphäre, manchmal Detailfragen, aber nicht immer, bei Unwissen weitere Fragen gestellt, die zu Antwort führen oder Antwort gesagt, wenn es danach noch nicht klar war

Was war schwierig in der Prüfung? sich nicht verunsichern lassen, wenn man etwas nicht weiß, nicht die Motivation während der langen Zeit des Lernens verlieren

Welche Fragen wurden konkret gestellt? Das Gespräch ist natürlich nur sinngemäß und nicht vom genauen Wortlaut so abgelaufen und ich habe auch bestimmt noch ein paar Fragen vergessen.

Husemann (H): Fühlen Sie sich in der Lage heute diese Prüfung zu machen?

Ich (I): Ja

H: Haben Sie ein Thema zum Einstieg vorbereitet?

I: Nein, das habe ich nicht.

H: Ach, tatsächlich nicht. Dann fangen wir doch mal mit radioaktiven Zerfällen an. Da gibt es ja den β -Zerfall.

I: Es gibt zwei verschiedene Arten des β -Zerfalls, β^+ und β^- . β^- ist deutlich wahrscheinlicher *Feynman-Diagramm aufgezeichnet und grob erklärt* Dann gibt es noch...

H: Sie haben gesagt, der β^- -Zerfall ist deutlich wahrscheinlicher, warum ist das so?

I: Das liegt daran, dass das Neutron schwerer ist. Die Lebensdauer ist auch kürzer. Das sind ungefähr 900 Sekunden beim Neutron.

H: Und wie lange beim Proton?

I: Ich weiß es nicht genau, aber auf jeden Fall mehrere Jahre.

H: Mindestens 10^{25} . Wir wissen gar nicht, ob freie Protonen überhaupt zerfallen. Kann der β^+ -Zerfall trotzdem stattfinden?

I: In Kernen geht das bei einem Protonenüberschuss.

H: Sie haben hier ja jetzt ein paar Erhaltungssätze genutzt, können Sie sagen welche?

I: Baryonenzahl, weil vorher und nachher eins (Neutron und Proton), Leptonenzahl, vorher keins und nachher auch nicht, da Elektron positiv zählt und Antielektronneutrino negativ, Leptonenfamilienzahl, weil Elektron und Antielektronneutrino in gleicher Familie sind, Ladung, Neutron ungeladen, Proton und Elektron entgegengesetzt, Neutrino ungeladen, Parität ist nicht erhalten, sondern verletzt

H: Woran sieht man das hier?

I: Das W-Boson koppelt nur an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen.

H: Was hat es mit der Händigkeit auf sich, woher kommt das?

I: Das ist die Chiralität. Wenn man γ_5 auf den Spinor eines Teilchens anwendet erhält man einen Eigenwert, bei +1 ist es rechtshändig, bei -1 linkshändig.

H: Also ein sehr abstraktes Konzept, wie kann man das experimentell messen? Helizität, jetzt hab ichs schon verraten. Was ist das und wie hängt es mit der Chiralität zusammen?

I: Die Helizität ist die Projektion des Spins auf den Impuls. Für masselose Teilchen ist beides gleich, also für das Neutrino, zumindest ungefähr. Ansonsten hängt es mit der Chiralität über $(1-\beta)$ zusammen, aber die genaue Formel weiß ich nicht.

H: Was hat das also für einen Einfluss?

I: β ist ja v/c , also hat es was mit der Geschwindigkeit zu tun. Ich weiß aber nicht wie genau.

H: Was sorgt dafür, dass es nicht lorentzinvariant ist?

I: *habe keine Ahnung*

H: Das liegt daran, dass man in ein Bezugssystem wechseln kann, in dem es schneller als ein anderes Teilchen ist. Dadurch wird der Impuls gedreht, aber der Spin nicht (Bin mir nicht mehr sicher, ob das die Erklärung war)

H: Was hat dieses W-Boson denn für Eigenschaften?

I: Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung, Masse ca. 80 GeV, negativ geladen, gibt noch ne andere Version, das bis auf Ladungsvorzeichen gleich ist, hier virtuell. Die Energie reicht nicht aus um es tatsächlich zu erzeugen.

H: Wie ist es dann trotzdem möglich?

I: Im Anfangs- und Endzustand passt es. Durch die Heisenbergsche Unschärferelation kann man das W-Boson dazwischen aber virtuell erzeugen.

H: Wie könnte man es tatsächlich erzeugen?

I: Das geht zum Beispiel mit Elektron-Positron-Kollisionen.

H: Wie sieht das dann aus? Zeichnen Sie es mal auf.

I: *zeichne Feynman-Diagramm* Zuerst wird zum Beispiel ein Z-Boson erzeugt und dann ein Paar aus W-Bosonen. Das liegt an der Ladungserhaltung. Vorher war die Ladung insgesamt null, das Elektron und das Positron haben die entgegengesetzte Ladung, also muss es auch danach so sein.

H: Ja, das ist eine Möglichkeit, aber es gibt noch einen Prozess, der hier viel relevanter ist. Wissen Sie welcher das ist?

I: Es könnte auch ein Photon sein.

H: Ja, aber viel häufiger hat man ein Neutrino, das ausgetauscht wird. Wie sieht denn der Wirkungsquerschnitt aus?

I: *zeichne Wirkungsquerschnitt* Der erste Peak ist die Erzeugung des Z-Bosons bei einer Schwerpunktsenergie von ungefähr 90 GeV, beim zweiten entsteht das W-Boson-Paar bei ungefähr 160 GeV.

H: Ist das denn genau so ein Peak beim W-Boson wie beim Z-Boson?

I: Nein, das ist flacher und ein bisschen so wie eine Ebene.

H: Woran liegt das?

I: Da finden noch viele andere Prozesse statt.

H: Das ist ein Schwelleneffekt und die können dann noch Impuls wegtragen. Wie kann man das W-Boson denn dann messen?

I: Da misst man wahrscheinlich eher die Zerfallsteilchen.

H: Genau, einen Zerfall des W-Bosons haben wir hier ja schon, in Elektron und Neutrino. Wie könnte man die nachweisen?

I: Das Elektron kann man zum Beispiel mit Spurdetektoren oder elektromagnetischen Kalorimetern nachweisen. Das Neutrino kann man gar nicht nachweisen, sondern nur über fehlenden Impuls oder fehlende Energie.

H: Wie macht man das?

I: Man nimmt meistens den transversalen Impuls, weil man da genau weiß wie der vorher aussieht. Der ist nämlich null. In longitudinaler Richtung nicht unbedingt. Wenn man dann insgesamt einen Wert abweichend von null misst, weiß man, dass da noch ein Teilchen war, das man nicht detektiert hat.

H: Bei der Elektron-Positron-Kollision kennt man die Ausgangssituation gut genug, dass man auch den gesamten Impuls nehmen kann. Wie funktioniert denn so ein Kalorimeter?

I: Da entsteht ein elektromagnetischer Schauer und über den Schauer kann man dann die Energie des ursprünglichen Teilchens bestimmen.

H: Aus welchen Materialien besteht das dann?

I: *überlege, aber habe nicht wirklich eine Idee*

H: Wie kann man denn die Schauerteilchen nachweisen?

I: Zum Beispiel mit Ionisationskammern. Wenn da ein Teilchen durchfliegt ionisiert es entlang seiner Bahn und die Ionen kann man dann messen, wenn sie zur Kathode bzw. Anode driften.

H: Das wäre auch eine Möglichkeit. Aber wie kann man es noch machen?

I: *habe keine Ahnung*

H: Mit Szintillatoren kann man das zum Beispiel machen. Wie funktionieren die?

I: Da findet Anregung statt und bei der Abregung werden Photonen abgestrahlt. Die weist man dann nach. Vorher verstärkt man sie noch mit einem Photomultiplier. Da trifft das Photon auf sogenannte Dynoden. Zuerst schlägt das Photon ein Elektron raus. Danach schlägt das weitere Sekundärelektronen raus und so weiter wodurch das Signal verstärkt und danach gemessen wird.

H: Das am Anfang ist eine Photokathode, die Dynoden kommen erst danach. Szintillatoren hat man früher vor allem genutzt. Wissen Sie auch wie man das heutzutage macht?

I: Nein, das weiß ich nicht.

H: Da nimmt man häufig Halbleiter. Aber ich glaube, Halbleiter waren bei Ihnen in Ex 5 nicht so richtig Thema. Bei Ionisationskammern wäre das Material dann meistens Argon. Jetzt machen wir mal einen Themenwechsel. Mit Szintillatoren sind wir ja schon ein bisschen bei Festkörpern. Anorganische Szintillatoren sind Kristalle. Wie funktioniert das da mit der Leitfähigkeit?

I: Das kann man vereinfacht so aufzeichnen. *zeichne Bändermodell*. Da gibt es das Valenzband, das ist das oberste besetzte Band und das Leitungsband, das ist das unterste unbesetzte Band. Die Fermi-Energie trennt besetzte von unbesetzten Zuständen. Wenn die in der Mitte der Bandlücke ist, gibt es keine freien Zustände, in die die Elektronen streuen können und es ist nicht leitend. Wenn die Fermi-Energie im Leitungsband ist, gibt es freie Zustände dort und das Material ist leitend. Das ist dann ein Metall. Wenn es in der Bandlücke ist, kommt es auf die Größe der Bandlücke an. Wenn sie über 4 eV ist, ist es ein Isolator, darunter ein Halbleiter, weil man durch eine Spannung die Fermi-Energie ins Leitungsband anheben kann und es leitend machen.

H: Das ist noch ein bisschen komplexer bei Halbleitern. Wie entstehen denn die Bänder?

I: Im wesentlichen durch das periodische Potential. Da kann man zwei Näherungen nutzen. Man kann die Elektronen erstmal als frei annehmen und wenn man dann das Potential immer mehr berücksichtigt, vertiefen sich die Energiebänder. Die andere Möglichkeit ist das Tight-Binding-Modell. Da nimmt man an, dass die Elektronen sehr stark an ihr jeweiliges Atom gebunden sind. Wenn man immer mehr Atome mitberücksichtigt, vertiefen sich die Energiebänder.

H: Dann gibt es ja auch noch sowas wie Bloch-Wellen.

I: Genau, die bestehen im Wesentlichen aus dem Modulationsfaktor u_k und einer ebenen Welle.

H: Wo steckt hier die Periodizität?

I: Die steckt schon im u_k . Es ist zum einen periodisch in \vec{G} , das ist der Gittervektor im reziproken Raum, aber auch periodisch in \vec{R} , das ist der Gittervektor im Ortsraum.

H: Können Sie das auch aufzeichnen wie man zu den Energiebändern kommt?

I: *zeichne Parabel* Ohne Potential sieht es erstmal so aus. Wenn man es dann berücksichtigt erhält man am Rand der Brillouin-Zonen, das ist bei π/a und $-\pi/a$ eine Gruppengeschwindigkeit von null und dadurch eine konstante Energie. *Zeichne das auf* Dann gibt es eine Lücke und das geht so weiter. *Zeichne weiter*

H: Woher kommt die Abhängigkeit von k^2 im ursprünglichen Bild?

I: *überlege kurz* Das liegt am kinetischen Term.

H: Genau, da sind sie auf der richtigen Spur. I: Der Impuls ist proportional zu k und der kinetische Term proportional zum Impuls im Quadrat.

H: Genau, also einfach $p^2/2m$. Wie kann man die Energiebänder messen? Haben Sie darüber gesprochen?

I: Das geht mit ARPES. Das ist angle-resolved photoemission spectroscopy. Da nutzt man den Photoeffekt. Wenn man ein Photon auf den Festkörper schickt, schlägt das ein Elektron raus. Die Energie und die Herkunft des Elektrons kann man messen. Wenn man den Festkörper dann dreht, erhält man eine dreidimensionale Karte der Energien.

H: Das müsste man dann noch in den k-Raum umrechnen.

I: Ja genau, das müsste man noch umrechnen.

H: Wie sieht es denn mit der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit aus?

I: Da bin ich mir gerade nicht sicher. Ich glaube, für hohe T war es proportional zu T^3 , für niedrigere zu T^{-4} und für noch niedrigere konstant. (Ich bin mir sehr unsicher, ob das stimmt, aber er hat auch nicht widersprochen)

H: Die Leitfähigkeit hängt ja auch mit der spezifischen Wärme zusammen.

I: Ja, da gibt es zwei verschiedene Modelle, einmal die Debye-Näherung. Da benutzt man den Debye-Wellenvektor. Erstmal nimmt man lineare Dispersion und 3 Dispersionszweige an. Dann integriert man über den Debye-Wellenvektor, über eine Kugel mit konstantem ω , also konstanter Frequenz. Darin sind genau N Wellenvektoren enthalten, dadurch erhält man 3N Schwingungsmoden, wie es auch tatsächlich der Fall ist. Dann erhält man die Wärmekapazität abgänglich von der Debyetemperatur. Ich glaube, die setzt auch die Grenzen für die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit. *ergänze das auf dem Blatt* Die andere Möglichkeit ist die Einstein-Näherung. Da nimmt man auch lineare Dispersion an, aber nur eine Eigenschwingung. Dadurch erhält man dann ein einfacheres Modell, das aber nicht ganz stimmt.

H: Gehen wir jetzt mal zu Atomen. Die einfachsten, die wir kennen sind Wasserstoff und Helium. Die sind sehr ähnlich, aber es gibt auch Unterschiede. Was sind da die Gemeinsamkeiten, was die Unterschiede?

I: Beide haben eine Kern, aber beim Wasserstoffatom gibt es nur ein Proton und beim Helium zwei. Bei beiden gibt es ein Elektron. Also bei Helium wäre das dann ein Ion, eigentlich sind es 2. Dadurch muss man bei Helium auch die Wechselwirkung der Elektronen untereinander beachten und nicht nur die mit dem Kern, bei Helium ist das dann auch die Wechselwirkung des Kerns mit beiden Elektronen. Bei Helium gibt es durch die 2 Elektronen zwei verschiedene Möglichkeiten. Die Elektronen haben einen Spin und die können sich entweder parallel anordnen, das ist dann Orthohelium, oder antiparallel, das ist dann Parahelium. *Energiespektrum bis $n=2$ aufgezeichnet und Quantenzahlen erklärt*

H: Jetzt haben Sie hier keinen 1s-Zustand gezeichnet.

I: Ja, das liegt am Pauli-Prinzip. Dadurch dass die Spins parallel sind, könnten sie im 1s-Zustand nicht in 2 verschiedenen Zuständen sein, was sie aufgrund des Pauli-Prinzips aber sein müssen.

H: Wie sieht Wasserstoff im Vergleich dazu aus?

I: Da ist die Energie höher. Bei Helium hat der Grundzustand eine Energie von -74,8 eV. Bei Wasserstoff ist es minus die Rydbergenergie durch n^2 , also höher. Da ist aber alles voll, also zeichne ich das hier tiefer.

H: Wieso ist das bei Helium tiefer?

I: Das liegt unter anderem an der Abschirmung des Kerns.

H: Aber dann müsste die Bindungsenergie doch eigentlich sinken und es dadurch höher liegen oder nicht?

I: Stimmt, das macht Sinn. In der Vorlesung hatten wir aber den Wert.

H: Komisch. Das können wir ja später nochmal nachschauen. Machen Sie weiter mit dem Wasserstoffspektrum.

I: *zeichne es bis $n=2$ auf* Wenn man es sich genauer anschaut, entdeckt man bei ungefähr 10^{-4} eV die Feinstruktur. Die kommt von der Spin-Bahn-Kopplung. Dadurch werden die Energien abhängig von J aufgespalten, das ist die Summe aus Bahndrehimpuls und Spin. *zeichne es ein.* Bei ungefähr 10^{-6} eV gibt es dann zwei Effekte. Der eine ist der Lamb-Shift. Das ist eine Auf-

spaltung bezüglich I. Das kommt durch verschiedene Effekte zustande, zum Beispiel Vakuumfluktuationen und Selbstenergie. *zeichne es ein*. Für s-Elektronen ist es stärker, weil die eine gewisse Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Kern haben und man benötigt das Coulombpotential des Kerns. Der andere...

H: Können Sie darauf nochmal genauer eingehen? Sie haben gesagt, man braucht das Coulombpotential des Kerns.

I: *zeichne Feynman-Diagramme* Das Elektron stößt ein Photon aus und nimmt es dann wieder auf und hier entsteht ein Quark-Antiquark-Paar.

H: Der Effekt der Vakuumfluktuation ist deutlich stärker. Was wird da produziert?

I: Das ist ein Elektron-Positron-Paar. Ich hatte mich eben versprochen. Das schirmt dann den Kern ab.

H: Quark-Antiquark geht schon auch, aber dann braucht man halt mehr Energie und das ist unwahrscheinlicher. Machen Sie weiter.

I: Der nächste Effekt ist die Hyperfeinstruktur. Das geschieht aufgrund des Kernspins. Der Kern hat dadurch ein magnetisches Moment und das Elektron auch wegen seines Bahndrehimpulses und Spins. Das bewirkt dann eine Aufspaltung bezüglich F, das ist die Summe aus J und I, dem Kernspin. *ingezeichnet*

H: Haben alle Kerne einen Spin?

I: Nein, es gibt auch welche die keinen haben. Das kann man sich mit dem Schalenmodell erklären. Die Nukleonen sind in Schalen angeordnet, ähnlich wie die Elektronen im Atom. Wenn die Schalen voll sind, ist der Kernspin null und das Atom ist besonders stabil. Da gibt es die magischen Zahlen. Wenn es so viele Neutronen bzw. Protonen sind, ist der Kern stabil. Die ersten sind 2, 8, 20, 28 und 50.

H: Zu Anwendungen der Hyperfeinstruktur. Sie haben ja bestimmt schon vom MRT gehört. Wie funktioniert das?

I: Die Kernspins sind erstmal irgendwie angeordnet. Man kann sie aber mit einem B-Feld ausrichten. Wenn man sie dann mit einem Puls daraus auslenkt präzessieren sie um die Achse. Wenn das auslenkende Feld wieder ausgeschaltet ist, relaxieren sie langsam oder auch nicht so langsam in die Ausgangslage zurück. Das kann man vermessen. In verschiedenen Geweben ist das unterschiedlich und dadurch kann man dann ein Bild erstellen.

H: Genau, das ist das Grundprinzip. Können Sie mir sagen welche Magnetfeldstärken man verwendet, welche Pulse und wie man das misst?

I: Die Magnetfelder sind bei wenigen Tesla. Bei den Pulsen gibt es 90°- oder 180°-Pulse. Das ist der Winkel um den es ausgelenkt wird. Gemessen wird es mit Spulen in denen durch die Relaxation Strom erzeugt wird.

H: Haben Sie schonmal was vom (Name vergessen)-Puls gehört?

I: Nein.

H: Da lenkt man es erst um 90° aus, dann driften die Spins auseinander. Dann lenkt man es um 180° aus und sie driften wieder zusammen. Dadurch kann man das Signal verstärken. Gehen wir doch mal zum α -Zerfall. Wir haben mit radioaktiven Zerfällen angefangen. Dahin gehen wir wieder zurück.

I: Da zerfällt ein Kern in 2 Tochterkerne. Meistens ist der eine davon Helium und der andere dann je nachdem was am Anfang da war.

H: Und was ist die Voraussetzung dafür?

I: *stehe ein bisschen auf dem Schlauch* Man kann es entweder durch Neutronenbeschuss induzieren oder es passiert von alleine.

H: Das ist bei der Kernspaltung.

I: Achso, ja, das habe ich verwechselt.

H: Wie ist es denn bei der Bindungsenergie?

I: Das weiß ich leider nicht.

H: Da gibt es ja das Fermigasmodell.

I: Achso, ja stimmt. *zeichne es auf und erkläre grob*

H: Jetzt haben sie auf beiden Seiten einfach so ein Kastenpotential gezeichnet. Stimmt das?

I: Nein, das ist sehr vereinfacht. Bei Protonen kommt noch die Coulombkraft dazu. *zeichne das dazu*

H: Genau das muss also beim Zerfall da erstmal drüberkommen. Geht das sonst noch irgendwie?

I: Es kann auch durchtunneln. Wenn man quantenmechanische Effekte mitbeachtet.

H: Das passiert auch tatsächlich. Wenn man das ausrechnet, merkt man das. Dann ist die Zeit jetzt auch schon ungefähr vorbei. Gehen Sie bitte kurz vor die Tür.

Feedback zur Prüfung

Fandest du die Benotung angemessen? Ich war sehr überrascht. Ich hatte vor der Tür schon mit was im 2er-Bereich gerechnet, weil ich an einigen Stellen gehangen bin, aber habe dann eine 1,0 bekommen. Er meinte, dass ich zwar ein paar Sachen nicht wusste, aber beim Rest hatte er den Eindruck, dass ich ein tiefgreifende Verständnis hatte, deswegen haben sie mir die paar Fehler verziehen.

Würdest du die Prüfer weiterempfehlen? Ja, auf jeden Fall. Die Prüfungsatmosphäre ist angenehm und die Benotung sehr gut.