

Fach: Experimentelle Physik

PrüferIn: Klute

BP  NP  SF  EF  NF  LA Datum: 12. April 2024 Fachsemester: 5

Welche Vorlesungen wurden geprüft? Moderne Experimentalphysik 1&2

Welche Vorlesung der PrüferIn hast Du gehört? Teilchenphysik Anteil in Mod Ex 2

## Zur Vorbereitung

Abprache mit PrüferIn über folgende Themengebiete: Keine Abprache über bestimmte Themengebiete. Sollte aber ein ca. 10 Minütige Diskussion eines Themas Vorbereiten. Habe Halbleiter / Bandstruktur / pn-Übergang gewählt.

Abprache mit PrüferIn über Literatur/Skripte: Keine Abprache

Verwendete Literatur/Skripte: Teilchenphysik: Folien zur Vorlesung WS 2023/24 die ich bei ihm besucht habe.

Festkörperphysik: Gross/Marx sowie die Webseite der Uni Kiel. Kann ich für den Festkörperphysik Teil sehr empfehlen!

([https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw\\_for\\_et/index.html](https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw_for_et/index.html))

Atomphysik: Atomphysik von Theo Mayer-Kukuck

Dauer der Vorbereitung: ca 2 Monate ca 4 Stunden pro Tag

Art der Vorbereitung: Alleine

Allgemeine Tips zur Vorbereitung: Skripte/Bücher/Folien durchgehen und Zusammenfassungen der einzelnen Kapitel schreiben. Wichtige Skizzen/Diagramme merken. Genaue Formeln eher unwichtig. Man muss das Prinzip verstanden haben und zusammenhänge verstehen.

Halbleiter / Bandstruktur / pn-Übergang wird auf jeden Fall abgefragt meinte er.

Themen die wahrscheinlich in jeder seiner Prüfnng drankommen:

Standartmodell, Beta zerfall (Feynman Diagramm), Welle Teilchen Dualismus, Tröpfchenmodell, Vorstellung des Wasserstoffatoms, Teilchendetektoren

(Si-Pixel,Ecal,Hcal,..). Lohnt sich den Aufbau des CMS anzuschauen.

## Zur Prüfung

Wie verlief die Prüfung? Sehr gut. Entspannte Atmosphäre, sehr netter und freundlicher Prüfer. Kann ich nur weiterempfehlen.

Wie reagierte die PrüferIn, wenn Fragen nicht sofort beantwortet wurden? Er hat die frage konkretisiert oder etwas umformuliert. Gibt Tipps oder erwähnt stichworte die einem zur Antwort helfen.

Kommentar zur Prüfung: Kann Klute nur weiterempfehlen. Ruhige Atmosphäre hilft einem nicht so nervös zu sein. Hat zusätzlich auch Fragen auf Master Niveau gestellt die ich dementsprechen nicht wirklich beantworten konnte. Dies war aber nur weil er interessante Dinge / Themen ansprechen wollte. Er erwartet nicht dass man die Beantworten kann und spielen dementsprechen in der Benotung keine Rolle

Kommentar zur Benotung: 1.0, auch wenn ich hier und da eine paar Hinweise gebraucht habe oder mich verhaspelt habe. Es wird nicht erwartet das alles auf Anhieb perfekt läuft.

Die Schwierigkeit der Prüfung: Das springen zwischen Themen. Manchmal hatte ich Schwierigkeiten zu verstehen was er von mir wollte. Gibt aber dann entsprechend Hinweise. Alles halb so wild.

## Die Fragen

Klute hat zwischen durch Fragen auf Master Niveau gefragt. Diese richtig zu beantworten ist nicht gefordert

Ich werde sie mit "(\*master)" markieren.

Desweiteren habe ich immer mal wieder Skizzen/Diagramme gemalt. Das werde ich nicht immer explizit dazu schreiben.

Als einstiegsthema habe ich Halbleiter/PN-Übergang/Bandstruktur gehabt.

Modell freier Elektronen im Gitter aber berücksichtigung der Brechung.

->Stehende wellen, energieaufspaltung -> es entstehen Bänder. Unterschied Nichtleiter, halbleiter, Leiter. Sollte beispielhaft Materialien nennen die in diese Kategorie fallen. PN Übergang erklärt. Raumladungszone, E-Feld etc. Man hat dann eine Diode. Alles wie ich das Vorbereitet hatte.

Danach sind wir zu den Fragen gekommen.

--

I: Ich / K: Klute

--

K: Wie verwendet man denn Halbleiter in der Teilchenphysik?

I: Teilchen fliegt durch Raumladungszone, ionisiert elektron, dieses schlägt je nach energie weitere e aus dem Gitter, messbarer Strom.

K: Was misst ein SI-Pixel Detektor denn eigentlich

I: Position. Mit Mehreren Pixeldetektoren lässt sich eine Teilchenbahn Rekonstruieren. Da Magnetfeld werden geladene Teilchen abgelenkt.

-> Impulsmessung durch Krümmungsradius

K: Und wie genau kann so ein Pixeldetektor die Position messen?

I: Sehr genau

K: \*Licht freundlich\* ja natürlich. Gibt mir eine Zahl/Einheit

I: Mikrometer

K: Genau. Dann sind wir fertig mit der Festkörperphysik. Wenn ich jetzt ein Proton und ein Elektron habe, also ein Wasserstoffatom, wie kann stellt man sich das heutzutage vor?

I: Bohr hat postuliert, dass sich elektronen auf Kreisbahnen bewegen aber das ist falsch. Man muss die Wellennatur der Materie mit einbeziehen. Elektron ist in Orbitalen an das Atom gebunden, die eine Ausgedehnte Wahrscheinlichkeitsdichte haben. z.B s-Orbital ist kugelsymmetrisch. (Habe dazu skizzen gemalt)

K: Wellennatur? Das ist interessant. Wie kommt man den darauf dass Elektronen Wellencharakter haben. Also wie äußert sich das?

I: Zeichne Doppelspalt, erkläre klassische erwartung dass man die e's direkt hinter den spalten erwartet. Aber Wellennatur, es entstehen Kugelwellen an den Spalten (Huygens Prinzip) Elektron interferiert also mit sich selbst. Es entsteht Interferenzmuster, bzw man findet das Elektron an orten an denen man sie nicht erwarten würde.

K: Sehr gut. Was ist jetzt wenn ich z.B am linken spalt einen Detektor anbringe der mir sagt ob das elektron da durchgegangen ist oder nicht. Was ist dann?

I: Die Wellenfunktion kollabiert in jeden Fall. Man weis dann durch welchen Spalt das elektron gegangen ist. Am anderen Spalt gibt es dann keine Welle mehr

->keine Interferenz mehr -> kein Interferenzmuster.

K: Ja, das ist faszinierend oder? selbst wenn ich das elektron nicht am linken spalt gemessen habe änder sich das Ergebnis. Und bei photonen? Wie kommt man bei denen drauf dass das Teilchen sind? Klassisch wird Licht ja als Welle beschrieben.

I: Erkläre Photoeffekt, dass die Energie Quantisiert sein muss bzw, dass die klassische Theorie nicht das richtige Ergebnis vorhersagt da die Energie der rausgelösten e- lediglich von der Frequenz des Lichts abhängt.

K: Gut, jetzt haben wir über das Elektron gesprochen, wie sieht es mit dem Proton im Kern aus. Wie stellt man sich das vor?

I: Besteht aus Quarks (uud).

K: Richtig, aber die Quarks sind ja geladen. Warum ist das Proton dann stabil? sollten die sich nicht abstoßen?

I: Ja, aber die starke Kernkraft ist stärker. Farbladung erklärt, gluon austausch, seequarks.-> Innere Struktur erklärt.

K: Und das Neutron?

I: udd

K: Wenn ich denn jetzt ein Proton und ein Neutron im Kern habe, was hält diesen Kern dann zusammen?

I: Auch die starke Wechselwirkung. Pionen austausch.

K: Ja, aber dass ist nur ein Modell. Hier haben wir kurz drüber gesprochen dass der Pion austausch nur ein Modell ist das nur für bestimmte energien gilt. Die Anziehung untereinander ist aber trotzdem Irgenwie auf Gluonen zurückzuführen.

K: Wie könnte man denn die Anziehung der Starken WW berechnen/beschreiben? (\*master)

--

Ich kann mich an den Teil nicht mehr exakt erinnern einfach weil ich mit der Frage überfordert war. Aber der Vollständigkeit schreibe ich auf was ich noch weis.

I: Schwierig. Bei der EM WW macht man es über Feynman Diagramme. Da die FS-Konstante klein ist ( $1/137$ ) kann man höhere Ordnungen vernachlässigen. Bei Gluonen ist die WW Konstante aber Größenordnung 1. Da geht das dann nicht.

K: Ok. Man kann natürlich mit der Störungsrechnung versuchen zu arbeiten. Sie sagen das das mit den Höheren Ordnungen aber nicht klappt. Wenn sie hier im Institut rumfragen können die Leute ihnen aber trotzdem Berechnungen anstellen.

Wie machen die das denn?

I: Keine Ahnung.

Er wollte hier auf die laufende Kopplung raus, die Kopplungskonstante verändert sich ja mit dem Impulsübertrag. Es gibt also Bereiche die man durchaus modellieren kann.

--

K: Okay. Sie haben oben darüber gesprochen dass das Proton aus Quarks besteht. Was gibt es denn noch für Teilchen?

I: Male Standardmodell auf.

K: Fragt mich Stichprobenartig ab was diese Teilchen für Eigenschaften haben/ mit welchen Bosonen sie wechselwirken. Also Spin/Ladung der Teilchen sollte man kennen und an welchen WW sie teilnehmen. Bei Bosonen ist auch die Masse wichtig.

Man sollte wissen das sich Z und W Bosonen im GeV Bereich befinden und Gluon und Photon masselos sind.

K: Was ist denn der Unterschied zwischen Photon und Gluon?

I: beide masselos, beide Spin 1. Gluon trägt aber Farbladung, Photon trägt keine Ladung. Gluon kann daher mit sich selbst wechselwirken.

K: Genau. Was ist mit dem W und Z Boson, an was koppeln die?

I: Schwache Ladung. Hatte mich hier kurz durcheinander gebracht weil ich auf die schnelle nicht wusste ob Neutrinos mit Schwacher WW interagieren. Habe mich dann schnell korrigiert. Sie WW natürlich mit der schwachen.

K: Genau, das werden sie auch jetzt gleich sehen. Was ist denn der Beta zerfall?

I:  $n \rightarrow p + e + \text{anti}(\nu_e)$

K: Das würde jetzt ein Atomphysiker sagen. Ein Teilchenphysiker würde ein Feynman Diagramm malen.

I: Male das Feynman Diagramm zum Beta zerfall auf Quark Ebene.

K: Genau. Das W Boson WW also mit dem Neutrino. Hier in Karlsruhe wird die Neutrinomasse vermessen.

I: Ja am KATRIN Experiment.

K: Was können sie mir dazu sagen?

I: Tritium Beta zerfall. Es entsteht  $\text{He} + e + \text{anti}(\nu_e)$  Das ist ein Drei Körper zerfall. Energie die frei wird kann sich frei auf die drei Teilchen verteilen.  $e^-$  hat also keine feste Energie sondern es entsteht Spektrum an möglichen Energien. Wenn aber das Neutrino Masse hat muss mindestens die Ruheenergie des Neutrinos immer ans Neutrino gehen, was die maximale Energie des Elektrons limitiert. Durch die genaue Vermessung des Endspektrums kann man also die Neutrinomasse bestimmen.

K: Genau. Wie kann man die Neutrinomasse denn sonst noch bestimmen? Es gibt noch andere Möglichkeiten, das hören die Leute vom KATRIN nur nicht so gerne. (\*master)

I: Keine Ahnung.

K: Hier hat Klute darüber erzählt dass man mit der Masse die sich im Universum befindet auch irgendwie auf die Neutrinomasse schließen kann bzw. den Bereich der möglichen Massen einschränken. Habe ich nicht ganz folgen können.

K: Bleiben wir bei Atomkernen. Bei Wulfhekel haben sie über Kerne und Bindungsenergien gesprochen oder?

I: Ja, erkläre Tröpfchenmodell, wie die Kerne zustandekommen. Ohne große Beweise oder Rechnungen, nur erklärt, paar Skizzen gezeichnet.

K: Gut. Wie detektiert man denn Teilchen? Also nehmen wir an sie wollen ein 20 GeV Elektron nachweisen bzw. vermessen. wie macht man das?

I: Pixeldetektor wieder erwähnt. Energiemessung im ECal. Da 20 GeV Paarbildung

-> EM Schauer. Nachweis über Szintillatoren und PMT's.

K: Genau und wie bestimmt man jetzt daraus die Teilchenenergie also was misst man jetzt eigentlich.

I: (Nach ein bisschen hin und her geredet, weil ich seine Frage nicht ganz verstanden hatte)

Das Licht was vom Szintillator kommt.

K: Genau. Also da entsteht eine (Teilchen) Lawine. Und dann? Irgendwann kommt so eine Lawine ja im Tal an.

I: Ja, falls nicht mehr genug Energie da ist  $e^-e^+$  Paare zu bilden hört die Paarbildung auf.

K: Bei wie viel Energie ist das?

I: 1 MeV.

K: Warum?

I: Na ein  $e^-$  und  $e^+$  wiegt jeweils ca 500 keV und wenn ich zwei davon erzeugen will bräuche ich also mindestens 1 MeV.

K: Genau. Sehr gut. Wir sind jetzt relativ schnell die Themen durchgegangen und haben noch Zeit. Sprechen wir noch über das Higgs Boson. (Zeigt auf mein gemaltes Standardmodell). Sie haben hier ein kleines  $h$  für das Higgs Boson gemalt. Normalerweise schreibt man da ein Großes H. Warum? (\*master)

I: Bin mir nicht sicher.

K: Beim großen H handelt es sich um das Higgs des Standardmodells. Mit dem kleinen  $h$  spricht man von einer modifizierten Version des Standardmodells.

Was stimmt den am SM nicht dass man es modifizieren muss?

I: Neutrinos haben Masse. Kurz über Neutrinooszillation geredet und dass das Neutrino aber laut SM masselos sein müsste. Oszillation aber nur möglich wenn Neutrinos Masse haben.

K: Okay, das ist aber einfach. Welche Probleme hat das SM denn noch? (\*master)

I: Keine Ahnung

K: Es gibt keinen Kandidaten für Dunkle Materie. Durch Modifizieren des SM kann man sich aber relativ einfach welche dazudenken. Aber da sind wir schon wieder bei den Fragen im Master. (Hätte man theoretisch drauf kommen können aber ich hatte das einfach nicht mehr auf dem Schirm)

Ein bisschen Zeit haben wir noch. Sprechen wir über Myonen. Wie werden die denn im CMS detektiert? (habe vorher bei Teilchendetektoren immer wieder das CMS als Beispiel genommen)

I: Nunja, es gibt Myonenkammern hinter der Spule. Dort wird in Vieldrahtkammern der Myonenimpuls gemessen. (hatte mir dieses Thema kaum angeschaut weil das recht kompliziert ist mit den Myonen am CMS)

K: Genau. Man verwendet keine Pixeldetektoren da man so weit außen am Detektor davon zu viele bräuchte. Was ist aber der Unterschied zwischen den  $e^-$  und den Myonen? Warum machen die Myonen so viel Arbeit?

I: Die Myonen im CMS sind MIP'S. Sie interagieren also kaum mit den SI-Pixeln oder Kalorimetern. Sie schaffen es also bis durch die Spule.

K: Ja Richtig, aber was ist denn ein MIP. Wenn ich jetzt ein  $e^-$  und ein Myon habe, beide mit sagen wir 10 GeV, was ist dann der Unterschied zwischen den Teilchen?

I: Myon deutlich schwerer. Male hier die Bethe Bloch Gleichung als Skizze auf. Also Energieverlust in Abhängigkeit des Impulses. Myonen interagieren also kaum mit der Elektronenhülle. Elektronen aber schon. Außerdem sind  $e^+$  deutlich leichter. Bremsstrahlung skaliert mit Beschleunigung. Elektronen werden im E-Feld des Materials deutlich mehr hin und her beschleunigt und strahlen dementsprechend stark ab. Myonen deutlich weniger.

K: Genau! Sehr gut erklärt. Die Elektronen werden richtig durchgerüttelt. Die Myonen dagegen kaum. Wie misst man denn jetzt die Myonen am CMS?

I: Hier haben wir wieder ein bisschen hin und her geredet. Im Endeffekt waren im Folgenden Dinge wichtig. Myonen interagieren kaum, auch nicht viel mit den SI-Pixeln. Werden aber vom Magnetfeld abgelenkt. Hinter der Spule ändert sich die Richtung des Magnetfeldes. Hier werden sie also in die andere Richtung abgelenkt und hinterlassen dann eine Spur in der riesigen Vieldrahtkammer. Dadurch kann man den Myonenimpuls bestimmen.

Dann war die Prüfung auch fertig. Wurde rausgebeten damit sie die Note besprechen können. Danach noch kurzen Ausblick auf das 6. Semester und Master