Diplomprüfung Experimentalphysik

18. Mai 2000

Prüfer: Hunklinger
Beisitzer: v. Schickfus
Note: 1,3

1 Kern- und Elementarteilchenphysik

H: Was sind denn Quarks?

I: Quarks sind die Bestandteile hadronischer Materie, also von Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen. Hadronen kann man in Mesonen ($q\overline{q}$) und Baryonen (qqq oder $\overline{qqq}$) einteilen. Es gibt u,d,c,s,t und b-Quarks (jeweils mit Massen und Ladungen). Beim Charm-Quark gibt es gebundene Zustände, nämlich das Charmonium (hätte ich vielleicht nicht sagen sollen). Bei den Massen muss man berücksichtigen, dass Quarks in Hadronen von einer Quark-Antiquark-„Wolke" umgeben sind, den sogenannten Seaquarks.

H: Wo gibt es ein ähnliches Konzept wie bei den Quarkmassen?

I: Z.B. in der Festkörperphysik: Da gibt es das Konzept der effektiven Masse von Elektronen, obwohl es da nicht um virtuelle Teilchen geht, sondern um Wechselwirkung mit dem Gitter.

H: Sie haben doch Tieftemperaturphysik gemacht ...

I: Ach so, bei Supraleitern kann das Magnetfeld nicht eindringen (Meißner-Effekt). Man kann das mit Hilfe des Yukawa-Potentials so auffassen, als ob das Photon eine Masse bekommen hätte: In der Kernphysik, wo das Yukawa-Potential vor allem verwendet wird, beschreibt es den Austausch (massiver) Pionen

H: Sie erwähnten das Charmonium. Was ist denn das?

I: Ein gebundener Zustand auch Charm- und Anticharm-Quark. Analog zum Positronium, aber dort: elektromagnetische WW, hier: starke WW.

H: Warum ist die Analogie Charmonium-Positronium so ausgeprägt? Es handelt sich doch um zwei verschiedene Wechselwirkungen? Wie seht denn das Potential beim Charmonium aus?

I: Im Wesentlichen Confinement-Potential (bei größeren Abständen) ... Bei kürzeren Abständen zusätzlicher Term.

H: Das Anregungsspektrum des Charmoniums ist dem des Positroniums sehr ähnlich. Wie bestimmt man es?

I: Man kann Charmonia z.B. durch e^+e^--Kollisionen erzeugen. Bei bestimmten Schwerpunktsenergien treten Resonanzen auf, d.h. der Wirkungsquerschnitt hat einen Peak.

H: Ja, aber die Auflösung ist nicht sehr gut. Wie geht es denn noch?

I: Die angeregten Zustände zerfallen. Man kann auch die Zerfallsprodukte ...

H: Was kann denn noch passieren?

I: (nach einigem Rumstochern): Der angeregte Zustand kann elektromagnetisch in den Grundzustand zerfallen.

H: Gibt es bei anderen Quarks auch gebundene Zustände?

I: Beim Bottom-Quark ja (Bottomium), beim Top-Quark ist es noch nicht nachgewiesen worden. Bei den leichten Quarks gibt es keine gebundenen Zustände.

H: Woran liegt das?

I: An den Massen?

H: Ja, es hat etwas mit den Massen zu tun. Wenn man die Seaquarks betrachtet ... Die mischen dann stärker.

I: Ach so, weil die Massen der leichten Quarks näher beieinander liegen!

2 Atomphysik (Positroniumphysik)

H: Bleiben wir bei den gebundenen Zuständen, betrachten wir das Positronium. Was gibt es für Unterschiede zwischen Wasserstoffatom und Positronium?

I: Beim Positronium sind die Massen der beiden Teilchen genau gleich, beim H-Atom hat das Proton die 1836-fache Masse des ElektronsDeshalb sind Feinstruktur und Hyperfeinstruktur ...

H: Zunächst einmal zu den Energieniveaus. Was gibt es da für Unterschiede?

I: Es geht jeweils die reduzierte Masse μ ein:

$$E_n = -\frac{\mu c^2 \alpha}{2n^2}$$

Beim H-Atom ist die reduzierte Masse ungefähr gleich der Elektronenmasse, beim Positronium ist $\mu = \frac{m_e}{2}$. Deshalb liegen die Energieniveaus des Positroniums halb so „tief" wie die des H-Atoms.

H: Und was ändert sich noch?

I: (endlich) Beim H-Atom ist die Aufspaltung der Hyperfeinstruktur etwa 1000 mal schwächer als die der Feinstruktur, weil in die jeweiligen Magnetonen m_e bzw. m_p eingehen (Landé-Faktoren berücksichtigen!), beim Positronium sind beide Effekte vergleichbar.

H: Wie erzeugt man Positronia?

I: Man braucht zunächst Positronen. Die kann man z.B. erzeugen, indem man Elektronen durch geeignete Materie schießt.

H: Es geht noch einfacher.

I: Man kann natürlich auch Paarbildung (aus Photonen) nutzen.

H: Es geht noch einfacher: β-Zerfall! Jetzt haben wir also Positronen ...

I: ... die man natürlich noch abbremsen muss

H: Wie macht man das?

I: Mit elektrischen Feldern.

H: Das wäre bei den Energien, die die Positronen so haben, eher aufwändig.

I: Bei Atomen kann man optisch kühlen ... Das funktioniert hier wahrscheinlich nicht.

S: Die ersten Experimente mit Positronia gab es vor 50 Jahren ...

I: Da gab es natürlich noch keine Laser.

H: Wie werden z.B. β-Strahlen in Materie absorbiert?

I: Intensität fällt etwa exponentiell ab.

H: Auf jeden Fall räumlich verteilt. Nehmen wir α-Teilchen. Wie werden die nachgewiesen (historisch)?

I: Mit Szintillationsdetektoren.

H: Und danach?

I: Geiger-Müller-Zählrohr

H: Noch davor ...

I: Wilsonsche Nebelkammer: Man hat übersättigten Dampf, der kondensiert, sobald ein Kondensationskeim vorhanden ist. Man sieht also die Spur des α-Teilchens.

H: Und diese Spur verschwindet auf einmal ... Das α-Teilchen verliert seine Energie durch Ionisationsprozesse. Beim Positron ist es im Prinzip genau so. Nun haben wir also langsame Positronen, die sich ein Elektron einfangen können. Wie können die Spins koppeln?

I: Entweder zu $S = 0$ (Singulett) oder zu $S = 1$ (Triplett) [nach Zwischenfrage] Der Singulett-Zustand ist der Grundzustand.

H: Wie zerfällt ein Positronium?

I: (Anihilation, dachte ich natürlich sofort, traute mich aber nicht recht, es zu sagen: zu simpel)

H: Welcher Zustand ist langlebiger?

I: Der Singulett-Zustand hat eine antisymmetrische Spinwellenfunktion, muss also eine symmetrische Ortswellenfunktion haben, damit eine hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeit ,,zwischen den Teilchen". Deshalb ist der Triplett-Zustand langlebiger, weil er eine antisymmetrische Ortswellenfunktion hat, damit weniger Überlapp.

H: Betrachten wir mal den Zerfall des Positroniums im Grundzustand.

I: Zerfall durch Anihilation, Photonenenergie 1,022 MeV.

H: Nun gibt es da Erhaltungssätze ...

I: Energie-, Impulserhaltung und ... [S: wichtig für 2. Keplersches Gesetz] Drehimpulserhaltung [aua!] ... Der Gesamtdrehimpuls im Grundzustand ist 0, also Zerfall in zwei Photonen ...

H: Und beim angeregten Zustand ...

I: Da ist der Gesamtdrehimpuls 1, also auch Zerfall in ein Photon [skeptischer Blick]; Ach so, das kommt mit der Impulserhaltung nicht hin, deshalb Zerfall in drei Photonen, was den Zustand noch langlebiger macht.

H: Es kann auch in mehr als drei Photonen zerfallen.

3 Festkörperphysik

H: Betrachten wir Elektronen in zwei Modellen: freies Elektronengas und Energiebänder. Ist das ein Widerspruch?

I: (wusste erst einmal nicht, worauf H. hinauswollte) Es ist eigentlich kein Widerspruch, denn wenn Elektronen nicht mehr auf ein Atom lokalisiert sind, hat man keine diskreten Energieniveaus mehr, sondern kontinuierliche.

H: wirklich kontinuierlich?

I: Nein, aber die Niveaus liegen so dicht, dass man von einem Quasi-Kontinuum sprechen kann.

H: Nehmen wir z.B. Kalium. Wie sieht das denn da aus?

I: (hingemalt) Es gibt ein Valenzband und ein Leitungsband, Valenzband ist halb gefüllt.

H: Man hat also Bänder, und kein Kontinuum [das meinte er also!].

I: Das liegt daran, dass die Elektronen kein perfektes freies Elektronengas sind, sondern mit den Ionen wechselwirken. Wenn man nur die Gitterperiodizität berücksichtigt (leeres Gitter), erhält man für E(k) eine Parabelkette, keine Bandlücke. Man kann nun das Potential in eine Fourier-Reihe entwickeln. Wenn man nur die erste Fourier-Komponente V_1 berücksichtigt (Zwei-Komponenten-Näherung), erhält man zwei Bänder mit „gegenläufigen“ sinusförmigen Dispersionsrelationen, und eine Energielücke $2|V_1|$.

H: Was passiert, wenn man ein elektrisches Feld anlegt?

I: Elektronen werden beschleunigt (im E(k)-Diagramm gezeigt)

H: Wenn man sich das mit der Fermi-Kugel anschaut (Verschiebung)

I: Die Verschiebung der Fermi-Kugel ist sehr gering, weil durch Streuprozesse Elektronen auf die „Rückseite“ der Fermi-Kugel gelangen. Deshalb liegen die Niveaus, in die die Elektronen angehoben werden, kaum über der Besetzungskante.

H: Sie erwähnten die effektive Masse. Wie groß ist denn die Abweichung von der Elektronenmasse bei Kalium?

I: (wild drauflosgeraten) kleiner als 10%.

H: Bei Kalium ist sie erheblich kleiner, aber das ist eher eine Ausnahme. Wie kann man denn diese Struktur experimentell nachweisen?

I: Durch Glühemission(?) (frei nach Hunklinger-Skript erklärt, Bildkraft etc.)

H: Wie sieht denn die Strom-Spannungs-Kurve aus?

I: Zeigt Sättigungsverhalten (hingemalt)

H: Das ist also ziemlich unspezifisch. Sie erwähnten die effektive Masse. Wie kann man die denn bestimmen? Z.B. mit Magnetfeld?

I: Hall-Effekt?

H: Nein.

I: Zyklotron-Resonanz. Man strahlt zusätzlich Mikrowellen ein, und bei Vielfachen der Zyklotron-Frequenz $\omega_C = \frac{eB}{m^*}$ (dort geht die effektive Masse ein!) treten Resonanzen auf.

H: Warum treten gerade bei diesen Frequenzen Resonanzen auf?

I: Weil die Elektronen so immer „im richtigen Moment“ Energie zugeführt bekommen.

H: ... das hängt damit zusammen, dass Mikrowellen nicht sehr tief eindringen.

Fazit

Eine eher ungewöhnliche Hunklinger-Prüfung! Den drei Bereichen wurden jeweils 20 Minuten gewidmet, also eigentlich ziemlich ausgewogen. Einige Dinge wie z.B. gebundene Zustände scheinen Hunklinger ganz besonders zu faszinieren; wenn man sie anspricht, sollte man besser darauf vorbereitet sein als ich! Ansonsten kann ich die Eindrücke aus anderen Prüfungsberichten voll bestätigen: Es herrscht eine sehr angenehme Prüfungsatmosphäre (eher die eines Gesprächs), Hunklinger hilft, wenn man nicht weiterkommt, will dann aber auch Ergebnisse sehen. Auf jeden Fall ein empfehlenswerter Prüfer!

Literatur

Atom- und Molekülphysik

- H. Haken, C. Wolf: *Atom- und Quantenphysik*, Springer
- H. Haken, C. Wolf: *Molekülphysik und Quantenchemie*, Springer

Festkörperphysik

- S. Hunklinger: *Festkörperphysik*, Heidelberg 1998 (Hunklinger-Skript: was auch sonst?)

Kern- und Teilchenphysik

- T. Mayer-Kuckuk: *Kernphysik*, Teubner
- B. Povh et al.: *Kerne und Teilchen*, Springer