

## 6. Zusammenfassung

Die simultane Aussendung zweier E1-Photonen (2E1) als ein Prozeß höherer Ordnung wurde im Rahmen der Atomphysik für drei unterschiedliche Beispiele untersucht. Das Interesse lag hierbei besonders bei schweren Ein- und Zweielektronensystemen bzw. bei den analogen Systemen mit einer Vakanz in der Elektronenhülle. Durch Anwendung einer Koinzidententechnik zum Nachweis der beiden ausgesendeten Photonen wurde die Spektralverteilung des Prozesses für die jeweiligen Systeme gemessen. Seine besondere Bedeutung bezieht der Zweiphotonenzerfall aus der Tatsache, daß zu seiner Berechnung die komplette Struktur des Ions bekannt sein muß. Eine genaue Messung des 2E1-Prozesses, vor allem der zugehörigen Energieverteilung, testet somit sehr sensitiv unsere Kenntnis gerade dieser kompletten Struktur des Ions.

Heliumähnliche Ionen stellen die einfachsten Systeme dar, in denen man die konkurrierenden Einflüsse von relativistischen Effekten und der Elektron-Elektron-Wechselwirkung auf die Wellenfunktionen und somit auch auf die Energieverteilung der Photonen des 2E1-Zerfalles untersuchen kann. Während für mittlere Kernladungszahlen ( $Z \approx 20$  bis  $30$ ) beide Effekte berücksichtigt werden müssen, sind die Wellenfunktionen für schwere Systeme ( $Z > 70$ ) fast ausschließlich durch relativistische Effekte bestimmt. Um die Auswirkungen der beschriebenen Einflüsse auf den Zweiphotonenzerfall zu untersuchen, wurde die Energieverteilung in He-ähnlichem Nickel ( $Z = 28$ ) bzw. Gold ( $Z = 79$ ) gemessen.

Als Erweiterung des bisherigen sind die Untersuchungen des 2E1-Zerfalles in Vielelektronensystemen zu sehen. Durch die höhere Anzahl der Elektronen wird die Wechselwirkung der Elektronen untereinander immer wichtiger. Bei einer theoretischen Beschreibung des 2E1-Zerfalles muß dieser Sachverhalt natürlich berücksichtigt werden. Um dies experimentell zu überprüfen, wurde die Energieverteilung des 2E1-Zerfalles in Silber ( $Z = 47$ ) mit einer Innerchalenvakanz bestimmt.

### **H- und He-ähnliches Nickel:**

Das Experiment zur Bestimmung des 2E1-Prozesses in mittelschweren Systemen wurde mit Hilfe der 'beam foil spectroscopy' (BFS) am ATLAS-Beschleuniger des Argonne National Laboratory, Argonne (USA) durchgeführt. Hierbei wurde erstmalig die Spektralverteilung für wasserstoff- und heliumähnliche Ionen dieses Elements bestimmt. Die gute Übereinstimmung

der experimentellen Daten mit den Monte-Carlo-Simulationen auf der Basis der entsprechenden theoretischen Vorhersagen ist an dieser Stelle hervorzuheben.

Obwohl der Vergleich gute Übereinstimmung zeigt, ist diese Methode von einer (separaten) Effizienzbestimmung der verwendeten Detektoren mit ihren Unsicherheiten abhängig, die Eingang in die Simulation findet. Für ein vorangegangenes Experiment zur Bestimmung der Energieverteilung des 2E1-Zerfalles in Krypton [9] war gerade diese Unsicherheit in der Effizienzbestimmung der limitierende Faktor für die Aussagekraft des Experiments. Um die Genauigkeit weiter zu steigern, wurde während der Strahlzeit abwechselnd der Zweiphotonenzerfall sowohl in H- als auch He-ähnlichem Nickel beobachtet. Da die Spektralverteilung des 2E1-Zerfalles in H-ähnlichem Nickel sehr präzise theoretisch beschrieben werden kann, dient diese Messung als eine in-situ Kalibration des Detektorsystems. Dies ermöglicht eine modellunabhängige Bestimmung der Energieverteilung des Zweiphotonenzerfalles aus der Messung mit He-ähnlichen Nickelionen. Durch Ableitung einer zum Matrixelement  $|M_{fi}|^2$  proportionalen Größe läßt sich der bisher strengste Test der theoretischen Vorhersagen durchführen. Die Z-Abhängigkeit der Energieverteilung des 2E1-Zerfalles aufgrund des Einflusses der Elektron-Elektron-Wechselwirkung und der relativistischen Effekte konnte erstmals im mittleren Kernladungsbereich  $Z \approx 30$  klar gezeigt werden, siehe Abbildung 3.11. Die experimentellen Werte stimmen im Rahmen ihrer Genauigkeit sowohl mit einer nicht-relativistischen Rechnung von Drake als auch einer relativistischen Rechnung von Derevianko und Johnson überein, da sich in diesem Z-Bereich beide Rechnungen praktisch nicht unterscheiden.

### **He-ähnliches Gold:**

Für die Untersuchung des 2E1-Prozesses in sehr schweren (heliumähnlichen) Systemen wurde ein analoges Experiment am SIS-ESR-Beschleunigerkomplex der GSI durchgeführt. Die wichtige Frage der Besetzung des Ausgangszustandes des 2E1-Zerfalles bei Stößen zwischen schweren hochgeladenen Ionen und Festkörpertargets wurde im Hinblick auf die Notwendigkeiten des Experiments untersucht. Hierbei zeigte sich die Anregung eines heliumähnlichen Goldionenstrahles (von SIS) mittels eines relativ schweren Targets wie Aluminium im Experiment als effektivster Besetzungsprozeß für den Ausgangszustand  $1s2s\ ^1S_0$  des Zweiphotonenzerfalles. Analog zum vorhergehenden Experiment in Nickel wird für einen Vergleich mit den experimentellen Daten eine Monte-Carlo-Simulation benötigt. Für deren An-

wendung ist die durchgeführte Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit des Detektorsystems in Abhängigkeit von der Photonenenergie von entscheidender Wichtigkeit.

Wie ein Vergleich zwischen Experiment und Simulation zeigt, konnte mit dem verwendeten Aufbau erstmalig die Spektralverteilung des 2E1-Prozesses in heliumähnlichen Gold gemessen werden. Nach theoretischen Vorhersagen ändert sich das Aussehen der Spektralverteilung in Abhängigkeit von der Kernladungszahl  $Z$  sehr stark. Speziell bei schweren Systemen mit ihren starken Zentralfeldern nimmt aufgrund relativistischer Effekte die Intensität in den Flanken der Verteilung im Vergleich zu den leichten Systemen ab. Um dies zu verifizieren, wurde die experimentelle Energieverteilung mit den Monte-Carlo-Simulationen für heliumähnliches Argon ( $Z = 18$ ) und Gold ( $Z = 79$ ) verglichen. Im Rahmen der experimentellen Genauigkeit konnten die Vorhersagen der Theorie bestätigt werden (Abbildung 4.18). Durch Ableitung einer zum Matrixelement  $|M_{fi}|^2$  proportionalen Größe, vgl. Abbildung 4.19, kann diese Aussage weiter verdeutlicht werden.

### **Innerschalenvakanz in Silber:**

Neben den Experimenten in Wenigelektronensystemen, die jeweils einen großen Teilchenbeschleuniger benötigen, wurde auch eine Untersuchung des 2E1-Zerfalles einer Innerschalenvakanz in Silber untersucht, die durch K-Elektroneneinfang in den Kern entsteht. Hierfür konnte eine kommerziell erhältliche radioaktive Quelle eingesetzt werden, so daß dieses Experiment auf kleinstem Raume durchgeführt werden konnte ('table top'). Die experimentell bestimmten Werte für die differentielle Zerfallswahrscheinlichkeit der Übergänge  $2s, 3s, 3d \rightarrow 1s$  mit dem Winkel  $180^\circ$  und  $90^\circ$  zwischen den emittierten Photonen stimmen relativ gut mit den theoretischen Vorhersagen überein. Hierbei konnte erstmals die von der Theorie vorhergesagte Resonanzstruktur von  $3s \rightarrow 1s$  Übergängen beobachtet werden, siehe Abbildung 5.7. Diese 'Zwischenzustandsresonanzen' treten auf, da bei der Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit über alle, auch die besetzten Zustände summiert werden muß. Wie eine theoretische Untersuchung zeigt, stellt diese Berücksichtigung der besetzten Zustände keineswegs eine Verletzung des Pauliprinzips dar. Insbesondere durch die Messung unter zwei verschiedenen Winkeln läßt sich eine erste Aussage über die Winkelverteilung der zwei Photonen in diesen Systemen machen. Im Rahmen der (relativ großen statistischen) Fehler konnte das theoretische vorhergesagte Intensitätsverhältnis  $I(180^\circ)/I(90^\circ)$  von 2,00 (für  $s \rightarrow s$ ) und 1,08 ( $d \rightarrow s$ ) bestätigt werden.

**Ergebnis:**

Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluß von Elektronenkorrelationen und von relativistischen Effekten auf die Struktur des untersuchten Atom- bzw. Ionensystems zu ergründen. Hierzu wurde der Zweiphotonenzerfall in drei verschiedenen Systemen beobachtet. Obwohl sich diese recht unterschiedlich darstellen, decken sich die experimentellen Beobachtungen recht gut mit den theoretischen Vorhersagen. Da bisher keine großen Abweichungen selbst bei starken Zentralfeldern (hohes  $Z!$ ) gefunden wurden, läßt dies den Schluß zu, daß auf der Theorieseite gute Methoden zur Berechnung der Atomstruktur der beobachteten Systeme vorliegen. Dies Ergebnis läßt natürlich auch auf die Verlässlichkeit der verwendeten Methoden bei der Anwendung auf andere Fragestellungen in der Physik schließen. Wie erwähnt basieren diese theoretischen Vorhersagen auf Modellen der Natur, die (notwendigerweise) gewisse Vereinfachungen beinhalten. Die (relativ) gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment bedeutet somit aber auch, daß die verschiedenen Modelle die Natur gut beschreiben. In diese Sinne kann man von einem tieferen Verständnis der Struktur der beobachteten Ionen bzw. Atomen sprechen.