

Kernspektroskopie mit γ -Strahlung in Freiburg

Im Jahr 1955 wurde nach zehnjähriger Unterbrechung wieder Kernphysik in Deutschland möglich. Von Seiten der Bundesregierung, besonders von F. J. Strauß, bestand ein großes Interesse an Grundlagenforschung auf diesem Gebiet. Folglich gab es genügend finanzielle Mittel. In Freiburg gab es zwei Kernphysiker der Vorkriegszeit, den Ordinarius W. Gentner und seinen späteren Nachfolger Th. Schmidt. Sie beantragten erfolgreich die Anschaffung eines elektrostatischen Beschleunigers vom Van-de-Graaff'schen Typ. Dieser erlaubt die Erzeugung kontinuierlicher Teilchenstrahlen der Nuklide p, d, ^3He und α . Dabei kann die Energie auf das KeV genau eingestellt und durch einen Rückkopplungseffekt (Koronaentladung) gehalten werden. Van-de-Graaff Generatoren wurden bereits industriell gefertigt bei der High-Voltage Engineering Company in den USA. In ausländischen Labors war der KN Typ mit 3 MV Höchstspannung weit verbreitet. Verbesserungen führten zum Nachfolgetyp CN mit 5.5 MV Höchstspannung. Das erste in Europa ausgelieferte Exemplar ging nach Freiburg. G. Busch leitete die Installationsarbeiten und die baulichen Maßnahmen. Mit großem zeitlichen Vorsprung vor anderen CN Beschleunigern (Straßburg, Frankfurt, Berlin) starteten die ersten Experimente im Jahr 1959. Kurze Zeit später wurden jedoch die Tandembeschleuniger serienreif. (Man beschleunigt negativ geladene Ionen, streift dann die Elektronen ab und beschleunigt ein zweites Mal unter Ausnutzung der gleichen Hochspannung. Für α -Teilchen bringt dies insgesamt eine Verdreifachung der Energie). Der CN Typ wurde dadurch so etwas wie ein Stiefkind, und es stellte sich die Frage nach seinen Einsatzmöglichkeiten.

Th. Schmidt (Jahrgang 1908), der die Nachfolge von W. Gentner (Jahrgang 1906), angetreten hatte, sagte: „die junge Generation muss ihren Weg finden, ich bin kriegsbedingt aus der Bahn geworfen und sehe meine Aufgabe in der Herstellung guter Arbeitsbedingungen“.

Es bildeten sich drei Arbeitsgebiete. Diese und ihre Initiatoren waren

1) β -Zerfall (V. Soergel)

2) Nukleare Festkörperphysik (H. Spehl)

3) Kernspektroskopie mit γ -Strahlung

(H. J. Rose und später mit zeitlichem Überlapp B. Povh)

Um 1966 wurde ein zweites Ordinariat eingerichtet und mit E. Rössle besetzt. Er brachte eine etablierte Mannschaft mit, welche sich der **Teilchenspektroskopie** widmete.

An dieser Stelle wird über die **γ -Spektroskopie** berichtet, welche erst 1995/96 ein natürliches Ende fand.

Ziel der γ -Spektroskopie ist es, die angeregten Zustände eines Kerns über ihre γ -Zerfälle zu finden. Danach sollen die Erhaltungsgrößen Spin, Parität und Isospin bestimmt werden. Hinzu kommen elektromagnetische Übergangswahrscheinlichkeiten. Es gibt zwei Standardverfahren, die um 1960 neu waren und deren Kunde von H. J. Rose und B. Povh aus den USA nach Freiburg gebracht wurden. Bei der ersten handelt es sich um den resonanten Einfang eines Teilchens, meistens Proton oder Neutron, in einen quasistationären Kontinuums-Zustand des Restkerns. Dieser Zustand hat eine sehr kleine partielle Breite Γ_γ für γ -Zerfall, der über meistens zahlreiche Zwischenzustände zum Grundzustand führt. Γ_γ ist über die „Resonanzstärke“ erhältlich. Quantenzahlen von Kontinuum-Zustand und Zwischenzuständen folgen aus den Winkelverteilungen der γ -Strahlungen relativ zum Beschleunigerstrahl. Der Freiburger Beschleuniger war von Beginn an hervorragend für „radiative Capture“ geeignet. Jedoch setzten γ -Detektoren (NaJ(Tl) Szintillationskristalle) und Nachweiselektronik (256-Kanal Impulshöhenanalysator) Grenzen. Die frühen „radiative capture“ Experimente wurden daher an Kernen der p-Schale mit ihren geringen Niveaudichten durchgeführt. H. J. Rose veröffentlichte 1967, als er schon in Oxford war, zusammen mit D. M. Brink ein umfangreiches

Tabellenwerk zur Analyse von γ -Winkelverteilungen und auch der gleich zu besprechenden Winkelkorrelationen.

B. Povh führte ein Messverfahren ein, welches kurz vorher als Methode II von Litherland und Ferguson in Chalk River/Kanada entwickelt worden war. Man arbeitet mit einer binären Reaktion $A + a \rightarrow B^* + b \rightarrow B + b + \gamma$ und misst die Winkelkorrelation zwischen b und γ , wobei b unter dem Winkel 0° oder 180° zum Beschleunigerstrahl nachgewiesen wird, aus experimentellen Gründen ersteres bei Neutronen, letzteres bei geladenen Teilchen. Der Anwendungsbereich dieser Methode war zu Zeiten von B. Povh sehr beschränkt durch Beschleunigerspannung und Detektoren. Auch mangelte es bei der Datenaufnahme. Für jedes Teilchen- γ Koinzidenzereignis müssen zwei Informationen, Teilchen- und γ -Energie, abgespeichert werden. Das war damals noch nicht möglich und führte zu Behelfslösungen durch Fenstersetzen im Teilchenspektrum.

Im Jahr 1965 hatten sowohl H. J. Rose als auch B. Povh Freiburg verlassen. Es war aber eine Grundlage für γ -Spektroskopie geschaffen. Die Ausschöpfung des Potentials beanspruchte noch 20 Jahre und sie wurde befeuert durch enorme Fortschritte in der Theorie des Atomkerns. Zunächst war aber die Personaldecke ausgedünnt. Die Doktoranden von H. J. Rose waren fertig und auf dem Absprung in die USA. B. Povh hatte gleich seine ganze Mannschaft mit nach Heidelberg genommen und hinterließ nur K. P. Lieb, der noch promovieren musste. Auf Vorschlag von G. Busch gründeten K. P. Lieb und H. Röpke eine neue, gemeinsame Arbeitsgruppe. Letzterer war ein Quereinsteiger, der soeben in der Nuklearen Festkörperphysik promoviert hatte.

In diese Zeit fällt die Beschaffung des ersten hochauflösenden γ -Detektors mit $\Delta E \sim 2$ KeV. Es war ein winziger Germaniumkristall von RCA mit einem Volumen von 2 cm^3 . K. P. Lieb führte damit Lebensdauermessungen von Kernzuständen nach der Methode der abgeschwächten Dopplerverschiebung von γ -Strahlungen durch. Die Abschwächung entsteht durch Abbremsung des γ -emittierenden Restkerns in Target und Targetbacking. Dieser Prozess muss gut verstanden sein. Lieb setzte H. Grawe auf das Problem an, der zu einem Experten wurde. Wann immer es Kontroversen mit

auswärtigen Arbeitsgruppen gab, behielt H. Grawe recht. So wurden Lebensdauermessungen fester Bestandteil des Freiburger Arbeitsspektrums.

H. Röpke, der über „gestörte γ - γ Winkelkorrelationen“ promoviert hatte, widmete sich jetzt Teilchen- γ Winkelkorrelationen zu und kam einem Phänomen nahe, welches ihn sein ganzes Berufsleben lang verfolgte. Atomkerne, die ja durchaus eine Form haben, können diese durch geringe Energiezufuhr (etwa 1% der totalen Bindungsenergie) drastisch ändern.

Im Herbst 1967 begannen K.P. Lieb und H. Röpke ihren damals obligatorischen Nordamerika Aufenthalt, K.P. Lieb ging nach Texas, H. Röpke nach Toronto in Kanada. Kanada war damals durch die Chalk River Laboratorien führend in der Entwicklung großvolumiger (100 cm³) Germanium Detektoren für γ -Strahlung. Damit ergaben sich ganz neue Perspektiven für „radiative capture“ Reaktionen. H. Röpke hielt im Jahr 1969 nach seiner Rückkehr nach Freiburg seinen Habilitationsvortrag zu diesem Thema. Dank der Vorarbeiten von H. Grawe waren großvolumige Detektoren auch bald in Freiburg verfügbar.

Eine weitere Detektorentwicklung jener Tage war der Nachweis von Neutronen mit Flüssigkeitsszintillatoren. Dabei müssen Neutronenereignisse von den normalerweise viel häufigeren γ -Ereignissen mit Hilfe verschiedener Abklingzeiten des induzierten Fluoreszenzlichts getrennt werden. C. Rolfs, ehemaliger Diplomand von H. J. Rose konnte erstmals (^3He , n) Reaktionen wie $^{24}\text{Mg}(^3\text{He}, \text{n})^{26}\text{Si}$ untersuchen und damit einen protonenreichen Kern erreichen. C. Rolfs und H. Grawe gingen bald darauf unter Vermittlung von H. Röpke nach Kanada.

Die Jahre ab 1970 wurden sehr ereignisreich. G. Busch hatte ein Aufrüstungsprogramm für den Beschleuniger auf den Weg gebracht. Die Terminalspannung wurde auf nominell 7 MV erhöht; wenn G. Busch abwesend war, konnten es auch 8 MV sein. Mit einer neuen Ionenquelle konnten doppelt geladene ^4He -Ionen in das Beschleunigerrohr geleitet werden, ohne von den viel häufigeren einfach geladenen Ionen begleitet zu sein. So konnten mit α -Teilchen von 14-16 MeV gearbeitet werden, was nahe an die Möglichkeiten eines Tandem-Beschleunigers herankommt. Eine weitere Verbesserung ermöglichte das Arbeiten mit dem Deuteriumstrahl. Trifft ein 6-7 MeV Deuteron auf Materie, so entsteht wegen seiner

geringen Bindungsenergie ein Neutron. Dies ist schädlich für Mensch und γ -Detektoren. Eine neue Elektronik gestattete die Regelung der Beschleunigerenergie mit den geringsten Strahlintensitäten, welche das Experiment erfordert. Insgesamt wurden Experimente mit $(\alpha, n \gamma)$, $(\alpha, p \gamma)$, $(d, p \gamma)$ sowie den radiative capture Reaktionen (p, γ) und (α, γ) möglich.

Für den Neutronennachweis entwickelte P. Betz ein Flugzeitspektrometer bestehend aus 19 Flüssigkeitsszintillatoren. Jeder Detektor war autonom. Die Elektronik dazu wurde im Haus entwickelt und gebaut. Geladene Teilchen wurden mit Si ΔE -E Teleskopen registriert, welche keine Streustrahlung vom Strahlstopper sehen konnten. Auch die Datenaufnahme wurde neu gestaltet. E. Rössle konnte ein Nuclear-Data-System beschaffen, welches aus mehreren Analog-Digital-Konvertern, einem Prozessrechner PDP-8 und einer Magnetbandeinheit bestand. Damit konnten ab 1971 Zweifachkoinzidenzen im Listmode Verfahren gespeichert werden. Mit Hilfe eines ebenfalls beschafften PDP-15 Rechners konnten große Teile der Datenanalyse vom Universitätsrechenzentrum in das Beschleunigerlabor verlegt werden.

Auf der politischen Ebene geschah Bedeutendes. Ein neuer Forschungsminister (Leussink) strich die Förderung der Kernphysik durch den Bund komplett zusammen. Die „kleinen“ Forschungseinheiten, und dazu zählte Freiburg, wurden an die DFG verwiesen. Als Konsequenz wurde die Nachfolge Th. Schmidt mit einem Elementarteilchenphysiker besetzt. E. Rössle ließ seine Aktivität in Freiburg auslaufen und wandte sich der sogenannten Mittelenergiephysik am schweizerischen SIN zu.

Angesichts der in Zukunft reichlich zu Verfügung stehenden Messzeiten stellte H. Röpke 1972 einen erfolgreichen Antrag bei der DFG, der auf dieser Tatsache beruhte. Kernphysik an Beschleunigern hat häufig den Charakter von Rosinenpickerei wegen des Messzeitproblems. In Freiburg ergab sich die Möglichkeit von systematischem Arbeiten. Als Ziel wurden die Kenntnis und Klassifizierung sämtlicher $E_x < 10$ MeV Zustände in $A = 20-40$ Nukliden genannt. Dies erwies sich als experimentell möglich.

So wurde das Nuklid ^{28}Si von J. Siefert mit der $^{25}\text{Mg}(\alpha, n \gamma)$ und von J. Brenneisen mit den $^{27}\text{Al}(d, n \gamma)$, $^{27}\text{Al}(p, \gamma)$ und $^{24}\text{Mg}(\alpha, \gamma)$ Reaktionen in etwa 100 Tagen Beschleunigerzeit untersucht. Als Resultat kennt man die ersten 300 angeregten Zustände bis 14.6 MeV. Das klingt nach Beschäftigungstherapie, hat aber bemerkenswerte Konsequenzen. Um 1975 kündigten sich große Fortschritte in der theoretischen Behandlung von Kernstruktur an. Whitehead et al. in Glasgow führten die ersten uneingeschränkten Schalenmodellrechnungen für die Nuklide zwischen den Schalenabschlüssen bei ^{16}O und ^{40}Ca durch. Sechzehn Nukleonen formen einen ^{16}O Rumpf durch Besetzen aller Zustände mit Hauptquantenzahlen $N=0$ und $N=1$. A-16 Nukleonen verteilen sich ohne Einschränkungen auf die Zustände mit $N=2$. Für die Rechnungen muss man 63 Matrixelemente der Restwechselwirkung empirisch optimieren und Matrizen bis zum Rang 10^4 diagonalisieren. Das letztere Problem wurde 1975 von Whitehead, das Problem der Matrixelemente wurde 10 Jahre später durch B. H. Wildenthal von der Michigan State University gelöst. Bindungsenergien von Kernzuständen wurden vorhersagbar mit einer Genauigkeit $\Delta E/E$ von rund $2 \cdot 10^{-3}$. In der Plage der Verifizierung kamen die Freiburger Messergebnisse zur rechten Zeit, und ihre Lückenlosigkeit wurde essentiell für die Prüfung der Theorie. Es entstand eine enge Kooperation zwischen Freiburg und Wildenthal. Am Ende stand die korrekte Vorhersage von 1300 experimentellen Kernniveaus mit Hilfe von nur 63 empirisch optimierten Matrixelementen. Offensichtlich war der Übergang von Kernmodellen zu einer Theorie des Atomkerns geschafft.

In Freiburg stellte sich daher im Jahr 1995 die Frage: „What next?“

Mannigfache Probleme sprachen gegen ein neues experimentelles Projekt (Woher die Targets nach Schließung der Isotopenlabors in den USA und England, woher die Studenten bei Desinteresse an Kernphysik, etc.?).

So fand die γ -Spektroskopie ein logisches Ende, welches aber mit Stolz und tiefer Befriedigung über die erzielten Resultate verbunden war. Von etwa 100000 Betriebsstunden des CN Van-de-Graaff's waren etwa die Hälfte für die γ -Spektroskopie aufgewendet worden. Damit war die γ -Spektroskopie wohl das nachhaltigste Projekt an einem Van-de-Graaff Beschleuniger des CN Typs.

Diese Notizen haben sich dem Thema gewidmet:

Was war experimentell machbar am Freiburger Beschleuniger. Für physikalische Erkenntnisse sei verwiesen auf H. Röpke und F. Glatz:

Towards a full accounting and understanding of the energy levels in $A = 16-44$ nuclides (June 2019)