

## Literatur

- [1] *Haefner, K.*, Strategien des Lehrens I, data report **6**, 1971, Heft 2
- [2] *Freibichler, H.*, Aspekte des Computerunterstützten Unterrichts (CUU). Vortragsmanuskript für Fachtagung CUU am 25. 7. 72 in FfM (Control Data Institut)
- [3] *Keil, K.*, Lernen mit LIDIA in der Schule, erscheint 1974 in: *Freibichler, H.*, Hrsg., „Probleme und Perspektiven des RUU“, Schroedel-Verlag
- [4] *Nebendahl, Stobbe*, LIDIA, eine Autorensprache für Rechenunterstützte Unterweisung, data praxis, Siemens Druckschrift D 14/4339
- [5] *N. N.*, LIDIA, Autorensprache für Rechenunterstützte Unterweisung, Beschreibung, Siemens Druckschrift D 14/4005
- [6] *Keidel, K.*, Computerunterstützter Physikunterricht, in: „Physik und Didaktik“ **3**, 1973, Bayer. Schulbuch-Verlag, München
- [7] *Schmidt, H.*, Ergebnisse des 1. BTZ-Symposiums, BTZ-Reihe, Band 2

# FORSCHUNG TECHNIK

## *Ionendichteverteilung in dem Querschnitt eines Elektronenstrahls*

Zur Ermittlung der Ionendichteverteilung wurden bisher zwei Fälle entsprechend den vorliegenden Gegebenheiten unterschieden: a) schlechtes Vakuum, b) gutes Vakuum. Beim Vorliegen eines schlechten Vakuums ermittelte man die Ionendichteverteilung durch die Gleichgewichtsbeziehung für das Verhalten von Teilchen, welche durch eine Ionisation erzeugt werden, und derjenigen, die an den Wänden der Apparatur verloren gehen; im Falle des Vorliegens eines guten Vakuums jedoch wurde angenommen, daß die Ionendichte in dem Querschnitt eines Elektronenstrahls entsprechend der Boltzmann-Gleichung variiert.

In der vorliegenden Arbeit der beiden sowjetischen Physiker *I. A. Mankin* und *J. u. F. Kontorin* wird ein allgemeiner Ausdruck für die Ionendichteverteilung in dem Querschnitt eines Elektronenstrahls abgeleitet, ohne daß die beiden oben angegebenen Vakuumfälle unterschieden werden müssen. Hierzu werden folgende 5 grundlegenden Annahmen gemacht: 1. Die Parameter des Elektronenstrahls liegen fest, sie sind unabhängig von der Ionenverteilung. 2. Das System wird gebildet durch einen unendlich langen, achsensymmetrischen Elektronenstrahl, der von einem koaxialen, ideal leitenden Zylinder umgeben ist. 3. Die Ionen werden bei einem einzelnen, ionisierenden Zusammenstoß zwischen einem Restgasmolekül und einem schnellen Elektron gebildet; die Ionen rekombinieren an den Wänden der Apparatur. 4. Sogenannte „Volumen“-Ionen-Zusammenstöße und entsprechende Rekombinationen werden vernachlässigt. 5. Die durch eine Ionisation oder die an den Apparaturwänden durch Ionenbeschuß herausgeschlagenen Sekundärelektronen werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Unter Annahme dieser Voraussetzungen werden die Ladungs- und die Stromdichte eines ringförmigen, achsensymmetrischen Elektronenstrahls mit ideal leitendem Mantel und unter Annahme der Richtigkeit der „kinetischen Gleichung“ von *Wlasow* ermittelt.

Anschließend gehen die Autoren über zu der Behandlung eines voll ausgefüllten Elektronenstrahls, um mit den hierbei erhaltenen Ergebnissen die Poisson-Gleichung für die stationäre Potentialverteilung in dem Querschnitt eines zylindrischen Elektronenstrahls anzugeben. Die Poisson-Gleichung wird auf einem Computer mit Hilfe der Methode der endlichen Differenzen gelöst. In graphischer Form werden die Ergebnisse wiedergegeben. Für ein spezielles Beispiel geben die beiden Autoren Zahlenwerte an.

Soviet Physics-Technical Physics **18**, 64 (1973) Ri/36

## *Die Energieabhängigkeit der Wirkungsquerschnitte von Neutrinos und Antineutrinos*

Dreizehn Physiker der Universitäten Harvard, Pennsylvanien, Wisconsin und des NAL haben mit dem 400-GeV-Synchrotron in Batavia die Wirkungsquerschnitte  $\sigma_\nu$ ,  $\sigma_{\bar{\nu}}$  von Myonenneutrinos und -antineutrinos bis zu Energien von 160 GeV sowie das Verhältnis  $\sigma_\nu/\sigma_{\bar{\nu}}$  bis zu 70 GeV untersucht. Die Neutrinoereaktionen ereigneten sich teilweise in einem Ionisationskalorimeter mit flüssigem Szintillator, teilweise im Anfangsabschnitt eines dem Kalorimeter nachgeordneten Eisenmagnetspektrometers.

Gegenstand der Versuche waren die Reaktionen

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \text{Hadronen}, \quad \bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^+ + \text{Hadronen}.$$

Gemessen wurden a) die Energie  $E_\mu$  der Myonen, b) die Energie  $E_H$  der sekundären Hadronen. Aus  $E_\mu$  konnte auf die Neutrinoenergie  $E_\nu$  geschlossen werden. (Die primären Protonen verließen das Synchrotron mit 300 bis 400 GeV.)

Die beobachtete Verteilung der Impulse und Streuwinkel bei den Myonen entsprach durchaus den theoretischen Erwartungen, die den Erfahrungen mit Neutrinos von geringerer Energie entsprangen. Deshalb darf der Zuverlässigkeit der am NAL gewonnenen Daten vertraut werden. Der Fehlerbereich dürfte  $\pm 20\%$  betragen.

Den Impuls- und Streuwinkelbestimmungen lagen 538 Neutrino- und 112 Antineutrinoereignisse zugrunde. Nach Berücksichtigung etlicher Korrekturen ergaben  $\alpha_\nu = (0,74 \pm 0,02) \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}$ , also einen Wert, mit dem das schnitt

$$\sigma_\nu = \alpha_\nu \cdot E_\nu, \quad \sigma_{\bar{\nu}} = \alpha_{\bar{\nu}} \cdot E_{\bar{\nu}}$$

mit den Koeffizienten

$$\alpha_\nu = (0,58 \pm 0,25) \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV},$$

$$\alpha_{\bar{\nu}} = (0,20 \pm 0,08) \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}.$$

Frühere Messungen im Bereich niedrigerer Energien zwischen 1 und 10 GeV ergaben  $\alpha_\nu = (0,74 \pm 0,02) \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}$ , also einen Wert, mit dem das neuere Ergebnis nicht in Widerspruch steht. Das Verhältnis

$$\sigma_{\bar{\nu}}/\sigma_\nu = \alpha_{\bar{\nu}}/\alpha_\nu = 0,34 \pm 0,03 \approx 1/3$$

für die *mittlere* Neutrinoenergie 27 GeV bleibt nahezu konstant bis 70 GeV und deckt sich mit früheren CERN-Ergebnissen für Energien unterhalb 10 GeV.

Zu bemerken wäre noch, daß sich die beobachteten Verhaltensweisen durchaus in den Rahmen des Partonenmodells des Nukleons einfügen, wenn die Partonen vorwiegend Fermionen mit Spin  $1/2$ , aber keine Antifermionen sind und überdies ihre Energie im relativistischen Bereich liegt.

Phys. Rev. Lett. **32**, 125 (1974) Kr/149

## Neutrale Ströme bei schwachen Wechselwirkungen nachgewiesen

Die bisherigen Beobachtungen von schwachen Wechselwirkungen haben stets gezeigt, daß solche Reaktionen mit Ladungsübergängen verbunden waren (wie dies etwa bei Prozessen wie

$$\nu_e + n \rightarrow e + p \quad \text{oder} \quad \nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \text{Hadronen}$$

zutrifft), die durch den Namen „geladene Ströme“ gekennzeichnet werden. Zwar gibt es keinen Grund, weshalb nicht auch „neutrale Ströme“ im Verlaufe schwacher Wechselwirkungen auftreten könnten, aber solche waren eben noch nie bemerkt worden. Ebenso betraf die vor mehr als 40 Jahren von *E. Fermi* entwickelte Theorie die geladenen Ströme und bewährte sich gut für die Interpretation der einschlägigen Vorgänge. Als Beispiel für neutrale Ströme wären Reaktionen der Art

$$\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \text{Hadronen}, \quad \bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \text{Hadronen}$$

anzuführen.

Wachsen allerdings die Kollisionsenergien so sehr an, daß sie Größenordnungen von mehreren TeV erreichen, dann gerät die Fermitheorie in Schwierigkeiten. Sie fordert nämlich den linearen Anstieg des Wirkungsquerschnittes bei Elektron-Neutrino-Prozessen, während andererseits aufgrund des Wellencharakters der beiden Objekte (die Wellenlänge hängt von der Partikelenergie ab) der Bereich der stärksten gegenseitigen Beeinflussung hinter dem theoriekonformen Wert zurückbleibt. Als trügerischer Ausweg bot sich die Einbeziehung des hypothetischen W-Bosons (als Quant der schwachen Wechselwirkung) an. Trügerisch, weil dadurch die Divergenzen keineswegs verschwinden, sie erscheinen lediglich erst bei noch höheren Energien.

Dem Auftreten von Divergenzen (gewisser Integrale) in der Quantenelektrodynamik wurde durch „Renormalisieren“ begegnet. Mittels Verallgemeinerungen konnten vor kurzem die schwachen Wechselwirkungen in das Schema einbezogen werden. Das ist außerordentlich bedeutungsvoll, weil auf diese Weise eine Verbindung zwischen den beiden fundamentalen Naturkräften Elektromagnetismus und Schwachen Wechselwirkungen hergestellt wird, welche letztere u. a. am radioaktiven Zerfall beteiligt sind. Die umfassendere Theorie fordert die Existenz neutraler Ströme. Sie ist in dieser Hinsicht experimentell überprüfbar.

Im europäischen Forschungszentrum CERN beschäftigt man sich schon seit einigen Jahren mit Neutrinoexperimenten. Dabei wurden bereits reiche Erfahrungen gesammelt und die Versuchstechnik in einem Maße verfeinert, wie man es vor 10 Jahren noch nicht zu denken gewagt hätte. Seit der Installation der 5 m langen Blasenkammer Gargamelle (gefüllt mit schweren Flüssigkeiten wie Freon  $\text{CF}_3\text{Br}$ ) als überdimensionalem Teilchendetektor haben sich die Versuchsbedingungen noch weiter verbessert.

CERN hat nun tatsächlich neutrale Ströme festgestellt. Sie wurden überdies durch Versuche am NAL in Batavia (USA) bestätigt. Das CERN-Team umfaßt neben den institutseigenen noch Forscher aus Aachen, Brüssel, London, Mailand, Orsay und Paris. Dem NAL-Team gehörten Physiker des NAL sowie der Universitäten Harvard, Pennsylvania und Wisconsin an.

## Das CERN-Experiment

Der Protonenstrahl aus dem 28-GeV-Synchrotron erzeugt im Target Pionen und Kaonen. Aus ihnen wurden die positiven oder die negativen Komponenten separiert, je nachdem, ob ein Neutrino- oder ein Antineutrinostrahl erzeugt werden sollte. Die fokussierten Teilchen gelangten in die Blasenkammer Gargamelle. Deren große Länge stellte sicher, daß der weitere Zerfall der Pionen und Kaonen noch im Inneren der Kammer erfolgte, denn dabei sollte erst der  $\nu$ - bzw.  $\bar{\nu}$ -Strahl für das eigentliche Experiment entstehen (z. B. bei der Reaktion  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ). Ein der Kammer nachgeordneter Eisenschild absorbierte sämtliche von Neutrinos oder Antineutrinos verschiedenen Teilchen.

Im ersten Gang fotografierte man 375 000mal neutrinoinduzierte Spuren, 360 000mal antineutrinoinduzierte. Da beim Zerfall der Sekundärteilchen zu 99 % Myonen-Neutrinos entstanden und Umwandlungen zwischen ihnen und Elektronen unmöglich sind, kommt es zu Stößen ohne Ladungsaustausch, also zu neutralen Strömen. Die Auswertung erbrachte zunächst einen Fall der Streuung von  $\bar{\nu}_\mu$  an einem Elektron. Als danach auch die Streuung an Nukleonen Beachtung fand, studierte man 83 000 Fotos von  $\nu_\mu$ -Ereignissen und 207 000 mit  $\bar{\nu}_\mu$ -Ereignissen. Zur Elimination von Reaktionen der Art



die von (relativ langsamen) Hintergrundneutronen ausgelöst werden und neutrale Ströme vortäuschen, berücksichtigte man lediglich Ereignisse, bei denen die neutralen Objekte mindestens 1 GeV Energie besaßen. Gefunden wurden

102 Ereignisse  $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \text{Hadronen}$ ,

64 Ereignisse  $\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \text{Hadronen}$ .

Neben diesen neutralen Strömen gab es noch 428 „geladene“ Ereignisse  $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + \text{Hadronen}$ , 148 „geladene“ Ereignisse  $\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu + \text{Hadronen}$ . Fehldeutungen hätten nur Hochenergie-Neutronen veranlassen können, die aus Neutrinoreaktionen in der Umgebung hervorgehen; Vergleichsmessungen erwiesen diesen Störanteil als relativ niedrig.

Nach Vornahme aller Korrekturen blieben 90 neutrinoinduzierte neutrale Ereignisse und 50 antineutrinoinduzierte übrig. Die analogen Zahlen für geladene Ereignisse sind 400 bzw. 100. Das Ergebnis bedeutet den Durchbruch zu neuen Ebenen des Verstehens der Mikrowelt.

## Das NAL-Experiment

Am NAL verfügte man über primäre Protonen von 300 und 400 GeV. Die Zerfallsstrecke für die sekundären Pionen und Kaonen betrug 400 m, die darauffolgende Absorptionsstrecke (Absorbens: Erde) war 1 km lang. Der Nachweis der interessierenden Ereignisse erfolgte im  $9 \times 4 \times 4$  m<sup>3</sup> großen Flüssigszintillator, in den außerdem Funkenkammern eingeschaltet waren. Den Abschluß der Anordnung bildete ein Myonenspektrometer (5 m lang, magnetisierter Stahl) mit Zählgerät am Ausgang.

Die Anordnung des NAL unterscheidet sich wesentlich von der bei CERN gewählten. Unter 1100 Ereignissen nach 300 GeV-Pulsen und 400 Ereignissen nach 400 GeV-Pulsen waren — nach schärfster Prüfung — 50, die neutrale Ströme verrieten. Das stellt eine eindrucksvolle Bestätigung der CERN-Resultate dar.

CERN Courier, 13, 291 (1973) Kr/147