

# Paritätsverletzung: Das Wu-Experiment

Niels Benedikter  
AG 2 – Elementarteilchenphysik

4. April 2008

Die Beschreibung der schwachen Wechselwirkung im Standardmodell sagt paritätsverletzende Prozesse voraus. Die Paritätsverletzung ist jedoch explizit „von Hand“ in das Modell eingebaut und ergibt sich nicht aus einem grundlegeneren Prinzip. Daher wollen wir im folgenden das Auftreten einer Paritätsverletzung im Experiment darstellen; wir betrachten dazu das sogenannte Wu-Experiment (Chien-Shiung Wu, 1956).

Im Wu-Experiment wird ein  $\beta$ -Zerfall als typischer Prozess der schwachen Wechselwirkung untersucht: Ein Kobaltkern zerfällt zu einem Nickelkern (in einem angeregten Zustand), wobei ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino emittiert werden:



Bringen wir eine Kobaltprobe in ein homogenes Magnetfeld (parallel zur z-Achse), so richten sich die Kobaltkerne im Magnetfeld aus (Spin antiparallel zum Magnetfeld) und der Operator der entsprechenden Drehimpulskomponente hat diskrete Eigenwerte. Im folgenden geben wir diese als z-Komponente  $S_z$  des Spins in Einheiten von  $\hbar$  an.

Für Kobalt ist  $S_z = +5$ , für die Nickelkerne  $S_z = +4$  bekannt. Da das System symmetrisch ist bezüglich Rotation um die z-Achse ist die z-Komponente des Drehimpulses eine Erhaltungsgröße; folglich müssen für das Elektron und für das Neutrino gelten:  $S_z = +1/2$ , parallel zum Spin der Kobaltkerne, antiparallel zum Magnetfeld.

Durch Vorgabe der Magnetfeldes haben wir also die Ausrichtung der Kobalt- und Nickelkerne und damit den Spin des Elektrons festgelegt.

Wir betrachten nun das eigentliche Wu-Experiment. Der Aufbau besteht aus einer Kobaltprobe, die im Magnetfeld zwischen einem oberhalb und einem unterhalb angebrachten Detektor für Elektronen positioniert ist (siehe Abb. 1). Die Probe wird stark gekühlt, um eine Störung der Kernspinausrichtung durch thermische Bewegung zu vermeiden. Man beobachtet nun, dass (im Rahmen der erreichten Ausrichtung der Kernspins im Magnetfeld) Elektronen nur nach unten emittiert werden; da der Spin der Elektronen durch das Magnetfeld festgelegt ist, handelt es sich also um linkshändige Elektronen (die Händigkeit oder Helizität berechnet sich als  $H = \vec{p} \cdot \vec{s} / |\vec{p}| |\vec{s}|$ ). Offenbar scheint der

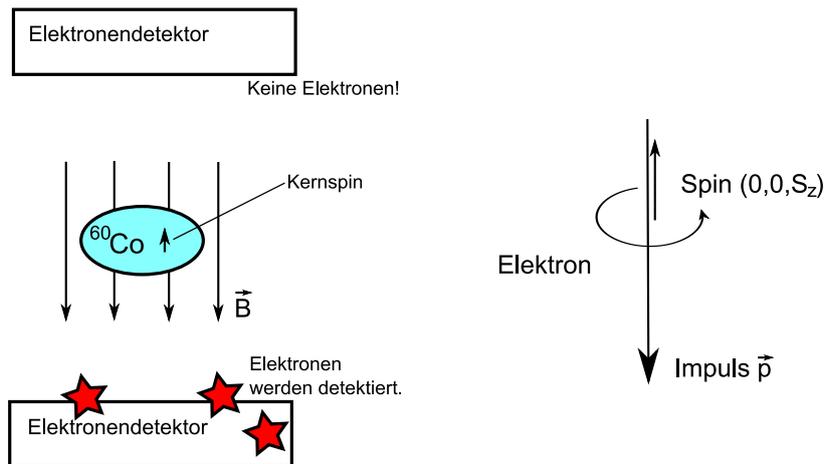


Abbildung 1: Links: Aufbau des Wu-Experiments. Elektronen werden nur am unteren Detektor detektiert. Rechts: Die emittierten Elektronen sind linkshändig.

$\beta$ -Zerfall nur linkshändige Elektronen zu erzeugen.

Wir wollen nun noch explizit untersuchen, inwiefern das eine Paritätsverletzung bedeutet. Als Parität wird die Punktspiegelung des Raumes am Ursprung bezeichnet:

$$P : \vec{x} \mapsto \vec{x}' = -\vec{x}.$$

Für den Impuls gilt dann:

$$\vec{p} = m \frac{d\vec{x}}{dt} \mapsto m \frac{d(-\vec{x})}{dt} = -\vec{p};$$

für eine Stromdichte ebenfalls  $\vec{j} \mapsto -\vec{j}$ , da es sich hierbei um das Produkt einer Ladungsdichte mit einer Geschwindigkeit handelt. Außerdem gilt für den Nabla-Operator:  $\nabla \mapsto -\nabla$ . Mit diesem Wissen können wir das Verhalten eines Magnetfeldes unter der Paritätsabbildung untersuchen: Nach Maxwell gilt (für  $\partial \vec{E} / \partial t = 0$ , entsprechend einer zeitunabhängigen Spannung):

$$\nabla \times \vec{B} = \vec{j} \mapsto -\nabla \times \vec{B}' = -\vec{j},$$

demnach ist das transformierte magnetische Feld<sup>1</sup>  $\vec{B}' = \vec{B}$ .

In der Realität können wir keine Paritätsoperation durchführen; wir können jedoch leicht das Vorzeichen des Magnetfeldes ändern und reproduzieren damit die relative Vorzeichenänderung die durch die Parität hervorgerufen wird:  $\vec{x} \mapsto \vec{x}$ ,  $\vec{B} \mapsto -\vec{B}$ , wobei nun

<sup>1</sup>bis auf eine Integrationskonstante  $\vec{C}$ ; da jedoch  $\vec{B}(\vec{x}) \rightarrow 0$  ( $|\vec{x}| \rightarrow \infty$ ) für reale stationäre Felder (vgl. Gesetz von Biot-Savart) und damit  $\vec{B}'(-\vec{x}) = \vec{B}(\vec{x}) \rightarrow 0$  muss gelten:  $\vec{C} = 0$

insbesondere gelten sollte  $\vec{p} \mapsto \vec{p}$ .

Wir kehren nun zum Experiment zurück: Wenn wir das Vorzeichen des B-Feldes ändern, werden erwartungsgemäß weiter nur linkshändige Elektronen erzeugt und damit nur am oberen Detektor Elektronen gemessen; aus dem Impuls  $\vec{p}$  wurde ein Impuls  $-\vec{p}$  im Widerspruch zur Forderung  $\vec{p} \mapsto \vec{p}$ ; das System ist also nicht invariant unter Paritätsoperationen; dadurch, dass im Zerfallsprozess nur linkshändige Elektronen entstehen, liegt Paritätsverletzung vor.

Damit motiviert das Wu-Experiment den Einbau der Paritätsverletzung in das Standardmodell; dieses geht jedoch noch weiter und behauptet, dass rechtshändige Neutrinos prinzipiell nicht existieren. Die Messung der Helizität der Neutrinos ist im Wu-Experiment nicht direkt möglich, da das Neutrino auf Grund seiner geringen Wechselwirkung schwer nachweisbar ist. Weitere Experimente, z.B. das Goldhaber-Experiment bestätigen jedoch diese Behauptung des Standardmodells. Allerdings ist heute bekannt, dass Neutrinos (entgegen des Standardmodells) doch eine kleine Masse besitzen; damit bewegen sie sich mit einer Geschwindigkeit  $v < c$  und es lässt sich ein Bezugssystem wählen, in welchem sich die Helizität umkehrt. Es sollten also doch rechtshändige Neutrinos existieren.

## 1 Literaturverzeichnis

### Literatur

- [1] Vorlesung Kern- und Elementarteilchenphysik SS07, Prof. Dr. Gert Denninger, Uni Stuttgart. [http://www.pi2.uni-stuttgart.de/official/g.denninger/KERN\\_2007/PASSWORT/index.html](http://www.pi2.uni-stuttgart.de/official/g.denninger/KERN_2007/PASSWORT/index.html) (Benutzername: Kern07, Passwort: Nucleus)
- [2] Wikipedia-Artikel: Wu-Experiment und Wikipedia-Artikel: Chien-Shiung Wu. <http://de.wikipedia.org> April 2008.