

Die Polarisation eines Müonenstrahles beim Pionenzerfall im Fluge

VON

J. H. D. JENSEN und H. ØVERÅS

(Innsendt til Generalsekretæren 30te januar 1958 av herr Wergeland)

Bei Diskussionen experimenteller Möglichkeiten bei CERN entstand die Frage nach der Polarisation des Müonenstrahles als Funktion des Winkels zwischen Pionen- und Müonenstrahl. Da sich der übliche, unten bei Gleichung (1) angegebene, «Polarisationsvektor» bei Lorentztransformationen nicht wie der Raumanteil eines Vierervektors transformiert, hielten wir es für zweckmässig, ihn direkt im Laborsystem auszurechnen.

Die Polarisation eines Strahles gegebenen Impulses und Energie ist eindeutig durch die Dichtematrix ϱ des Strahles bestimmt, welche so definiert ist, dass der Erwartungswert jedes Diracshen Operators A gegeben ist durch

$$\langle A \rangle = \text{Spur} \{ \varrho A \} / \text{Spur} \{ \varrho \}.$$

Wenn das Müon der Diracgleichung genügt und die Energie positiv ist, hat die Dichtematrix die Gestalt (vgl. Anhang I)

$$(1) \quad \varrho = \left(1 + \frac{\vec{a} \cdot \vec{p}}{\varepsilon + m} \right) \frac{1 + \beta}{2} (1 + \vec{\sigma} \cdot \vec{\pi}) \left(1 + \frac{\vec{a} \cdot \vec{p}}{\varepsilon + m} \right)$$

worin ε und \vec{p} Energie und Impuls des Müons sind. Der auftretende Vektor $\vec{\pi}$, der «Polarisation» genannt wird, ist für einen reinen Fall ein Einheitsvektor. Wenn der Strahl ein statistisches Gemisch ist, so kann $\vec{\pi}$ jeden Betrag zwischen 0 und 1 haben. Transformiert man die Dichtematrix ϱ auf ein mit dem Strahl bewegtes Lorentzsystem, $\varrho_0 = T \varrho T$, worin T die selbstadjungierte Transformationsmatrix (vgl. W. Pauli, Handbuch der Physik **XXIV**, 1, Seite 224) $T = (\varepsilon + m - \vec{a} \cdot \vec{p})$ ist, so ergibt sich bis auf einen willkürlichen Faktor:

$$\varrho_0 = \frac{1 + \beta}{2} (1 + \vec{\sigma} \cdot \vec{\pi}),$$



Det Kongelige Norske
Videnskabs Selskabs Skrifter
(Kgl. Norske Vidensk. Selsk. Skr. 2011 (4), 173-181)

J. H. D. Jensen og H. Øverås
*Die Polarisation eines Müonenstrahles beim
Pionzerfall im Fluge*
DKNVS Forhandlinger 1958¹

Kjell Mork

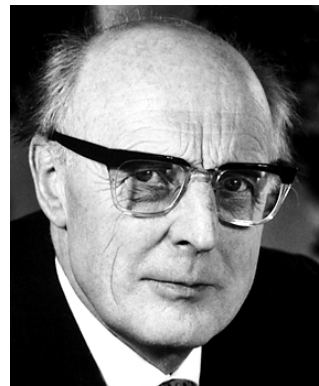
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Artikkelen *Die Polarisation eines Müonenstrahles beim Pionzerfall im Fluge* inneholder en beregning av polarisasjonen til en stråle av myoner som skapes når pioner i flukt desintegrerer.

I dag klassifiseres elementærpartiklene i tre grupper. Det er en gruppe med 6 kvarker, en gruppe med 6 leptoner, og en gruppe med partikler som er ansvarlig for de 4 typer kraftvirkninger mellom partikler. Myonet er et av leptonene og det har nesten identiske egenskaper som det velkjente elektronet, bare med mye større masse og kort levetid, ca 10^{-6} s.

Myonet ble først sett i 1936 da det dannet spor i fotografiske plater etter å ha blitt produsert av kosmisk stråling. Partikkelen ble raskt gjenstand for intense studier både eksperimentelt og teoretisk.

Pionet ble identifisert som en elementærpartikkel i 1947, også fra kosmisk stråling. Høyenergetisk stråling av en eller annen type kommer fra verdensrommet og treffer atomer i vår øvre atmosfære. Ved kollisjonen produseres



Johannes Hans Daniel
Jensen. Foto: Nobelprize.org.

¹ DKNVS Forhandlinger Bd. 31, 1958, nr. 6, s. 34-38.

ladede pioner med levetid ca 10^{-8} s, og de desintegrerer i et myon og et nøytrino som også er et lepton. Merk at om partikler har hastighet nær lyshastigheten og tilsvarende høy energi kan den relativistiske forlengelse av levetiden gjøre at de kan bevege seg over store distanser, f. eks. kan myonet leve til det når jordoverflaten og kan observeres av oss.

Elementærpartikler har en sentral egenskap som kalles spinn. Det er et kvantemekanisk fenomen som ikke har noe godt klassisk bilde, men det virker som om partiklene roterer om sin egen akse. Når partiklene er ladet blir de også små magneter. Spinnet er kvantisert slik at det for en gitt partikkel bare kan ha en størrelse. Når rotasjonsaksen har en veldefinert retning sies partikkelen å være polarisert i den retningen. Polarisasjonen er en viktig detalj i en partikkels tilstand, og den er et mye brukt middel til å undersøke egenskaper til partikler og partikkelprosesser. Måling av polarisasjon er komplisert og kan f. eks. basere seg på at resultatet av partikkelkollisjoner avhenger av polarisasjonen. Da trengs både avansert utstyr og en pålitelig teori.

Arbeidet

Den fysiske prosessen som er aktuell i dette arbeidet av Jensen og Øverås er at et pion kommer i fart og desintegrerer i et myon og et nøytrino. Myonet vil være polarisert, det vil si at spinnet oftest vil ligge i en bestemt retning i forhold til myonets bevegelsesretning, og dette er målbart. I arbeidet gjøres en teoretisk beregning av denne polarisasjonen.

Kraften som genererer desintegrasjonen av pionet, er den såkalte svake kjernekraften. I dag er teorien for denne vel etablert og forent med de elektromagnetiske kreftene i den beste teorien som finnes i fysikken, altså den som kan gi de mest nøyaktige forutsigelsene. Den er kjernen i det som nå kalles «Standardmodellen» i partikkelfysikken. I 1958 hadde en nettopp fått de sentrale elementene i den svake vekselvirkningen på plass. I 1957 ble det definitivt påvist at svake krefter ikke oppfyller symmetri ved speiling, noe alle andre krefter gjør. Det betyr at speilbildet av en virkelig fysisk prosess ikke behøver å være en mulig fysisk prosess. B. Stech og J. H. D. Jensen ga i 1955 et viktig bidrag til hvordan dette skal inkorporeres i teorien for den svake vekselvirkningen. For øvrig ligner teorien for svake krefter mye på teorien for de elektromagnetiske kreftene, kvanteelektrodynamikken.

Jensen og Øverås hadde fått med de viktigste ingrediensene i teorien da de gjorde sine beregninger av myonpolarisasjonen. De fant et presist uttrykk for vinkelen mellom myonets bevegelsesretning og polarisasjonsretningen. Vinkelen

avhenger av energiene til pionet og myonet. De så på prosessen også fra koordinatsystemer der pionet eller myonet er ro.

Beregningens svakhet sett fra moderne teori er at pionet regnes som en elementærpartikkel, et meson med spinn lik 0. Etter at kvarkmodellen ble utviklet i 1960-årene antar vi at det positivt ladede pionet er et bundet system av en u-kvark og en d-antikvark, og kvarkene er elementærpartikler med spinn lik $\frac{1}{2}$. Dette vil endre en del på beregninger og resultat. Som konklusjon kan en si at arbeidet ikke var banebrytende, men det var et solid produkt i sin tid.

Forfatterne

J. H. D Jensen (1907-1973) ble født i Hamburg. Han studerte realfag ved universitetene i Hamburg og Freiburg og ble først assistent i teoretisk fysikk i Hamburg i 1932. Han fikk doktorgrad der i 1936 og ble dosent i 1937. Han arbeidet i værtjenesten 1939-1940 før han ble professor i teoretisk fysikk ved den tekniske høyskolen i Hannover, 1941-1948. Etter det ble han professor i Heidelberg til han ble professor emeritus der, 1969-1973. Han var en aktiv og dyktig leder, moderne og internasjonal. Jensen fikk Nobelprisen i fysikk i 1963, og som berømt vitenskapsmann fikk han æresdoktorat, ble invitert gjesteprofessor ved flere av de beste amerikanske universitetene, og ble medlem i vitenskapelige selskaper.

Jensen var en god venn av Harald Wergeland, tidligere professor ved NTH og preses ved DKNVS, og brevvekslingen mellom dem finnes i Wergelands etterlatte papirer. Det kan synes overraskende at Jensen ikke var medlem av DKNVS, men kanskje hadde dette forbindelse med nærheten til krigen, og at Jensen hadde vært medlem av naziorganisasjoner. Men Heisenberg gikk god for at dette ikke var et uttrykk for politiske oppfatninger, men at slike medlemskap på den tiden var en absolutt nødvendighet for å gjøre akademisk karriere ved Universitetet i Hamburg som tidlig var sterkt nazifisert. Jensen hadde da også et utmerket forhold til jødiske fysikere både før, under og etter krigen.

Jensen hadde faglig et vidt spektrum. Han arbeidet først med atomfysikk og bidro senere som nevnt også til teorien for svake krefter. En periode arbeidet han med separasjon av uranisotoper, noe som ledet til en bok om gassentrifuger. Men hans hovedområde ble snart kjernefysikk, og det var for sine arbeider med den såkalte skallmodellen at han fikk Nobelprisen. Han delte den ene halvdel med Maria Goeppert Mayer som hadde parallelle ideer.

Etter oppdagelsen av nøytronet i 1932 ble det klart at atomkjernen består av protoner og nøytroner som begge kalles nukleoner. Nukleonene vekselvirker med sterke kjernekrefter som binder dem sammen. Det ble en oppgave å forstå og

beskrive hvordan stabile kjerner med protontall opp til 92 og nøytrontall opp til 238 kunne eksistere med sine respektive masser og spinn, som etter hvert ble målt med økende nøyaktighet.

Det var jo kjent at atomene besto av atomkjerner og elektroner som befant seg i en skallstruktur om kjernen, og det var naturlig å forsøke noe tilsvarende for kjernestrukturane. Heisenberg foreslo dette tidlig. Men det ble fort kjent at de sterke kreftene hadde svært kort rekkevidde, av samme størrelsesorden som en atomkjerne, og dette ledet Bohr tidlig i trettiårene til en vanddråpemodel og en «compound nucleus», en tett kjerne der nukleonene påvirket hverandre i stadige kollisjoner, og der det var liten mening i å tenke seg et nukleon i en stabil bane. Denne modellen dominerte lenge kjernefysikken.

Etter hvert kom det stadig bedre målinger av kjernenes egenskaper. Sammen med Haxel og Suess studerte Jensen dataene, og de konsentrerte seg om det fenomenet at det fantes visse tall for antall protoner og nøytroner som ga spesielt sterke bindinger for nukleonene. Det var spesielt vanskelig å rive løs nukleoner fra slike kjerner. Disse tallene hadde Wigner kalt «magiske tall», og de er 2,8,20,28,50,82 og 126. Likheten med atomfysikken som også har tilsvarende tall, 2,8,18,32,50 ..., for protontallene til atomet, gjorde at skallmodellen ble tatt i bruk igjen. En tenkte seg at et nukleon beveger seg i et midlere «effektivt» felt fra alle andre nukleoner, og det viste seg at med et passende sentralsymmetrisk felt og en betydelig vekselvirkning mellom nukleonets spinn og banebevegelse kunne en forklare både de magiske tall og flere andre egenskaper ved kjernene. Teorien gjorde et stort fremskritt med skallmodellen. Jensen publiserte arbeidet om denne fra 1949.

Maria Goeppert Mayer hadde i Chicago også studert de magiske tallene og publiserte omtrent samtidig med Jensen. I 1955 gikk hun og Jensen sammen om en bok om skallmodellen.

Medforfatteren Helge Øverås (1928-) var da arbeidet ble gjort, en forholdsvis nyutdannet sivilingeniør fra NTH, og han var ansatt ved CERN. Han arbeidet først med teoretisk partikkelfysikk, men gikk snart over til mer tekniske oppgaver ved akseleratorene på CERN, særlig anvendelse av datateknikk. Han ble hele sin karriere på CERN. Øverås er medlem av DKNVS.

Summary

The paper presents a calculation of the polarization of a muon which is created by the disintegration of a pion in flight. The muon is an elementary particle, similar to the electron, but heavier and short lived. The pion is a particle that is created in cosmic rays and it disintegrates into a muon and a neutrino. Elementary

particles have spin. It is a nonclassical property but it appears as if the particle rotates. The direction of the rotation axis is called the direction of polarization. When a pion in flight disintegrates in a muon and a neutrino the muon will be polarized. The polarization is calculated by theory in the paper.

The disintegration of the pion is generated by the weak nuclear force. In 1958 the main features of the theory had just been established and B. Stech and Jensen had in 1955 given an important contribution to the theory. In the paper of 1958 Jensen and Øverås calculated the angle between the muon spin and the direction of the motion of the muon.

J. H. D. Jensen (1907-1973) was born in Hamburg. He studied science at the universities in Hamburg and Freiburg and started work as an assistant in theoretical physics in Hamburg in 1932. He got his doctorate there in 1936 and became docent in 1937. He worked for the weather service 1939-1940 before he got a professorship at the Technische Hochschule in Hannover, 1941-1948. Later he became professor in Heidelberg and he also was professor emeritus there, 1969-1973. Jensen got the Nobel Prize in 1963.

Jensen had wide interests but his main activity soon was nuclear physics, and it was for his work on the so called shell model that he got the Nobel Prize. He shared the one half with Maria Goeppert Mayer who developed similar ideas in Chicago.

After the discovery of the neutron in 1932 it became clear that the atomic nucleus is a bound state of protons and neutrons, caused by the strong nuclear force. Since the strong forces have short range the liquid drop model or the «compound nucleus» of Bohr was the dominant model for a long time. As the measurements of nuclear properties improved Haxel, Suess and Jensen studied the so called «magic numbers», numbers of protons and neutrons that led to very stable nuclei. In analogy with atomic physics the idea of nucleons moving on shells became promoted again. This shell model was a great step forward for the understanding of nuclei. Jensen published papers about this model from 1949.

Helge Øverås (1928-) the coauthor of the 1958 paper was at that time a young technical physicist from NTH employed at CERN. He worked first with theoretical particle physics but soon changed to more technical problems concerning accelerators at CERN, in particular applications of computers. He stayed at CERN until he retired.