

HET PRINCIPE VAN BEHOUD VAN ENERGIE

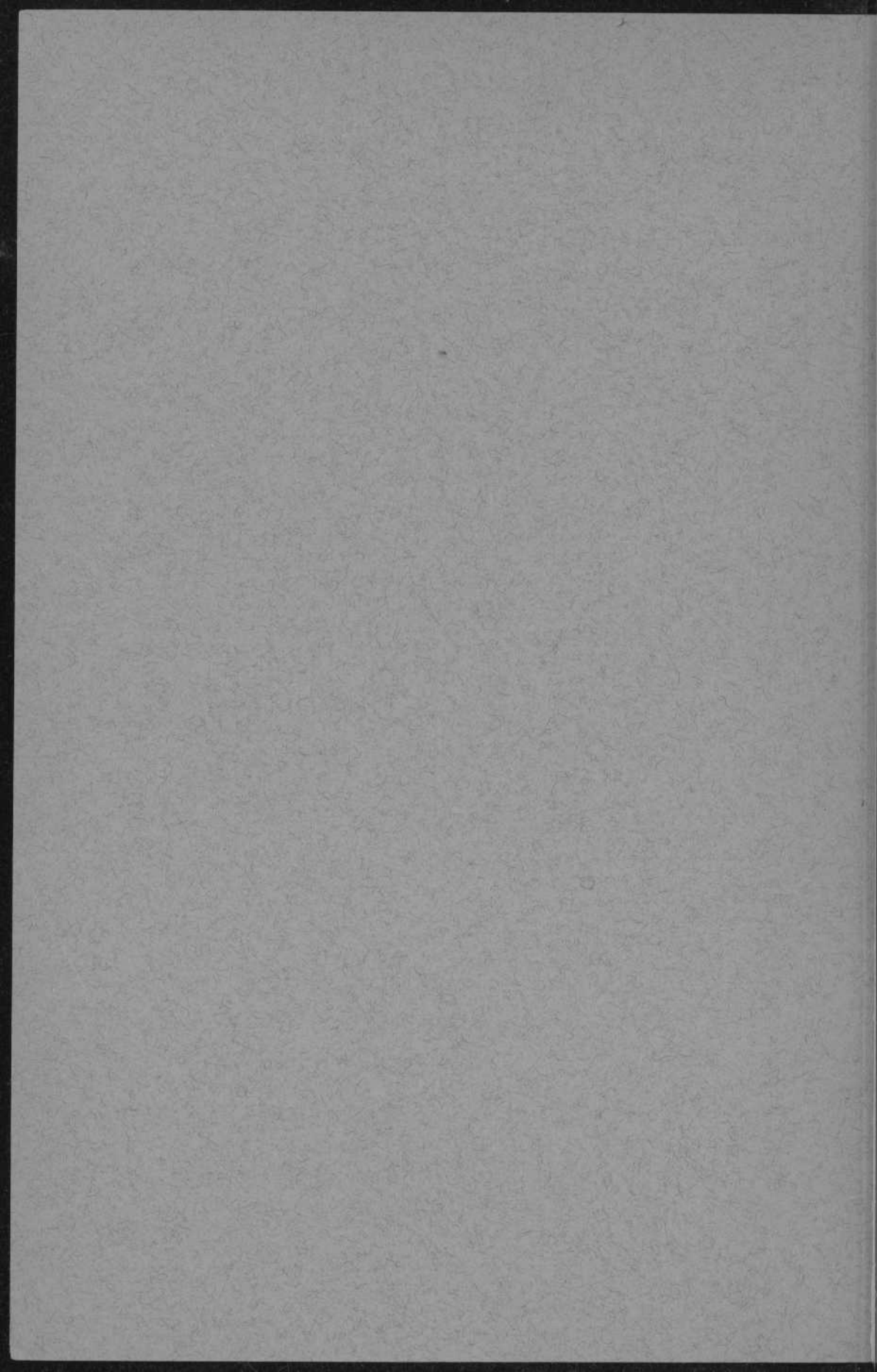
REDE, UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING VAN
HET AMBT VAN HOOGLEERAAR AAN DE RIJKS-UNI-
VERSITEIT TE UTRECHT OP 23 MAART 1936

DOOR

G. E. UHLENBECK



'S-GRAVENHAGE
MARTINUS NIJHOFF
1936



1936

HET PRINCIPE VAN BEHOUD VAN ENERGIE



(Overdruk uit Nederl. Tijdschrift voor Natuurkunde III, Afl. 2.)

HET PRINCIPE VAN BEHOUD VAN ENERGIE

REDE, UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING VAN
HET AMBT VAN HOOGLEERAAR AAN DE RIJKS-UNI-
VERSITEIT TE UTRECHT OP 23 MAART 1936

DOOR

G. E. UHLENBECK



'S-GRAVENHAGE
MARTINUS NIJHOFF
1936

Copyright 1936 by Martinus Nijhoff, The Hague, Holland
All rights reserved, including the right to translate or to reproduce this
book or parts thereof in any form



PRINTED IN THE NETHERLANDS

Mijne Heeren Curatoren, Dames en Heeren Professoren, Lectoren, Privaat-docenten, Studenten en voorts Gij allen die deze plichtigheid met Uw aanwezigheid vereert!

Zeer geachte Toehoorders!

Kracht en stof; deze woorden mag men wel karakteristiek noemen voor de opvatting der natuur- en scheikunde in de tweede helft der negentiende eeuw. De twee groote principes van behoud van energie en van materie schenen het fundament te vormen van de exacte natuurwetenschappen; zij waren beide voor iedereen *het* voorbeeld van een algemeen geldige „natuurwet”. Zij bepaalden wel is waar niet al het natuurgebeuren maar beperkten toch de mogelijkheden, en gaven een schema, waarin de wetten van elk speciaal gebied der natuurkunde moesten passen.

Het leek mij interessant om te trachten U hedenmiddag te beschrijven hoe de tegenwoordige natuurkunde tegenover deze principes staat. Als titel heb ik gekozen: het principe van behoud van energie. En om direct de vraag te beantwoorden, waarom ik hierbij het behoud van materie niet genoemd heb, wil ik U het voornaamste punt, de „clou” maar onmiddellijk zeggen. Dit is omdat men thans wel zeker is slechts met één principe te doen te hebben. De omzetting van stralende, electromagnetische energie in materie en omgekeerd het verdwijnen van materie in de vorm van straling is in het laboratorium waargenomen. Het is wel een van de belangrijkste resultaten van de laatste vier jaren, die aan zoovele verrassende ontdekkingen rijk waren. Helaas staat hier tegenover dat in de laatste tijd door eenige belangwekkende experimenteele onderzoekingen ook twijfel gerezen is over de algemeene geldigheid van dit principe van behoud van energie en massa.

Voordat ik hierop nader inga, vergun mij eerst in groote trekken U de ontwikkeling van het energieprincipe te schetsen. Zooals U weet werd het principe voor het eerst in haar volle algemeenheid uitgesproken door Mayer in 1842, ongeveer gelijktijdig met Joule, die door tal van experimenten er steun aan gaf. Meer algemeene aanvaarding vond het principe echter eerst omstreeks

1850, vooral ook door een beroemde verhandeling van Helmholtz in 1847. Spoedig hierop volgde de verdere opbouw van de thermodynamica door de formuleering van de z.g. tweede hoofdwet der warmteleer door Clausius en Thomson. Dit zou men de eerste periode in de ontwikkeling van het energieprincipe kunnen noemen. Het draagt een eenigszins metaphysisch karakter, dat door de tijdgenooten ook scherp werd gevoeld en geïlaakt! Daardoor ondervonden de denkbeelden van Mayer en zelfs die van Helmholtz in den beginne zooveel tegenstand. En later toen de energiewet naast de wet van behoud van materie als een der belangrijkste ontdekkingen der negentiende eeuw algemeen erkend werd, had deze philosophische geur die om het principe hing, een stroom van half populaire en half wijsgeerige geschriften ten gevolge. Het is er eenigszins analoog mee gegaan als wij met het relativiteitsprincipe hebben meegemaakt. Beide schenen eenige tijd na de ontdekking vanzelfsprekend. Gedeeltelijk kwam dit misschien omdat bij beide de ervaring, die eraan ten grondslag lag, van negatieve aard was, n.l. bij de een de onmogelijkheid om een perpetuum mobile te construeeren, en bij de ander de onmogelijkheid om de beweging ten opzichte van de aether, de z.g. aetherwind, waar te nemen. Voor het energieprincipe kwam erbij dat het een onmiddellijk gevolg was van de mechanische natuuropvatting. Hoe het ook zij, al reeds bij Mayer en Joule zelf scheen het a priori evident dat energie net als materie onvernieligbaar was. Heel duidelijk blijkt dit wel uit het bewijs dat Mayer voor het energieprincipe gaf. Het leek bij hem alsof het slechts een andere vorm was van de wet van oorzaak en gevolg. En toch was hij zich wel bewust van de physische, experimenteele kern, wat wel blijkt uit zijn bekende geniale berekening van het mechanisch warmte-equivalent! Ook Helmholtz in de inleiding van zijn groote verhandeling „Ueber die Erhaltung der Kraft”, hoewel hij er nog als ondertitel aan toevoegde „Eine physikalische Abhandlung”, tracht op philosophische gronden de noodzakelijkheid van het mechanische wereldbeeld aan te toonen, waaruit hij dan het behoud van energie afleidt.

Ik hoop dat ik met deze opmerkingen niet de indruk gemaakt heb, alsof ik zulke philosophische beschouwingen over de fundamenteele resultaten der natuurkunde gering schat. Het tegendeel is het geval. Maar de physicus heeft naar mijn meening de plicht

om zoo goed mogelijk de experimenteele grondslag van zijn begripsvormingen in het bewustzijn te houden. Nu is dit voor het begrip energie niet eenvoudig. De moeilijkheden waarop men stuit zijn geestig beschreven door Poincaré in de inleiding van zijn „Leçons sur la Thermodynamique”. Heel duidelijk laat hij voelen hoe het begrip energie als het ware vervluchtigt als men er een algemeene definitie voor tracht te geven. En het energieprincipe zelf dreigt dan steeds een tautologie, een nietszeggende vanzelfsprekendheid te worden. Bijvoorbeeld is dit het geval als men in de verlegenheid gebracht zegt: energie is „iets” dat constant blijft, en dat geen materie is. Want door haar eigenschap van constant zijn kan men de energie niet definieeren. In een gedetermineerde wereld zijn er zeer veel grootheden die constant zijn, zoodat de uitspraak dat er iets constant is niet veel bijzonders is! Ook een definitie van de energie door opsomming van de verschillende soorten van energie is, hoewel beter, niet voldoende. Want men weet dan nooit of de lijst van energievormen wel volledig is; het principe van behoud van energie wordt triviaal, omdat het schijnt dat voor het geval het niet uitkomt men altijd wel weer een nieuwe energievorm kan vinden, zoodat, als men deze meerekent, de som der energieën weer constant is.

Een werkelijk rationeele physische definitie kan men naar mijn meening slechts krijgen, als men bedenkt dat dit eigenlijk een recept moet zijn om voor elk geval de energie of energieverandering experimenteel te bepalen. Daarom schijnt mij de definitie die Thomson gegeven heeft en die nauwkeurig door Planck geanalyseerd is, nog steeds het meest bevredigend. Men moet veronderstellen, en hierop moet de nadruk gelegd worden, dat *alle* veranderingen van een systeem door verbruik van *mechanische* arbeid te weeg te brengen zijn. Dan kan men n.l. de energiedefinitie terugvoeren op het bekende begrip van de mechanische arbeid en de bepaling der energie wordt een betrekkelijk duidelijk experimenteel program. Het energieprincipe zegt dan dat de energieverandering van een systeem, indien het overgaat van een toestand *A* naar een toestand *B*, onafhankelijk is van de wijze waarop deze overgang geschiedt. De rechtvaardiging hiervoor is dan in de allereerste plaats de blijkbare onmogelijkheid van een perpetuum mobile, van de machine die voortdurend uit niets arbeid zou leveren. Maar voldoende is dit niet, want het energieprincipe zegt ook dat het

niet mogelijk is om een machine te construeeren, die voortdurend mechanische arbeid zou kosten en er niets voor in de plaats zou geven. Niemand heeft dit ooit trachten te doen, — en volkomen terecht —, zoodat men zich hiervoor niet op de ervaring kan beroepen. De eigenlijke toetsing van het energieprincipe is dan ook meest zeer indirect, en is geheel vervlochten met het experimenteel onderzoek van elk speciaal gebied der natuurkunde.

Bij deze opvatting heeft het geen zin over totale hoeveelheid energie te spreken, aangezien enkel energiever verschillen te meten zijn en het nulpunt der energie dus geheel willekeurig is. Ook is de beschouwing van de energie als een soort stof onnoodig. Het is zelfs gevaarlijk en leidt vaak tot moeilijkheden, omdat men dan onwillekeurig ook andere attributen van de materie er aan gaat hechten, zooals de mogelijkheid om de plaats in de ruimte en tijd te bepalen. Natuurlijk is de opvatting van de energie als een substantie een zeer belangrijke factor geweest bij de ontdekking van het energieprincipe. Men ziet dit vooral duidelijk in de geschriften van Mayer. Het is daarom ook erg gelukkig dat het door Black ingevoerde begrip van hoeveelheid warmte evenredig bleek te zijn met de energie der warmte. Zooals Mach heeft opgemerkt moet men dit eigenlijk een historisch toeval noemen. Het had ook wel kunnen zijn dat de warmte-energie evenredig was met het product van de hoeveelheid warmte en de temperatuur, net als de elektrische energie evenredig is met het product van de hoeveelheid electriciteit en de elektrische potentiaal. Men doet daarom ook mijns inziens goed om wel onderscheid te maken tusschen de wet van behoud van energie en de meer speciale wet van de evenredigheid van de hoeveelheid warmte met de warmte-energie. Deze laatste zou men dan met Mach het principe van Mayer—Joule kunnen noemen.

De volgende periode in de ontwikkeling van het energieprincipe begint omstreeks 1900. De mechanische natuuropvatting had toen plaats gemaakt voor het electromagnetische wereldbeeld van Faraday, Maxwell en Lorentz, dat spoedig bekroond zou worden door de speciale relativiteitstheorie van Einstein. Men mag dit thans misschien als volgt beschrijven. De materie bestaat uit electrisch geladen deeltjes, de lichte negatief geladen electronen en de zware positief geladen atoomkernen, die zich be-

wegen onder invloed van uitwendige krachten volgens de bewegingsvergelijkingen van Newton. Deze krachten worden op de deeltjes uitgeoefend door het electromagnetische veld dat zich tusschen hen bevindt en dat beschreven wordt door de vergelijkingen van Maxwell. Het veld kan op de deeltjes werken vanwege hun lading en de grootte van de kracht wordt gegeven door de formule van Lorentz. Dit beeld, of beter de beschrijvingswijze ervan, is ongeveer dat wat de tegenwoordige generatie de „klassieke” natuurkunde pleegt te noemen. De energie bestaat bij deze opvatting essentieel slechts uit twee vormen, n.l. de mechanische energie der materiedeeltjes en de electromagnetische energie van het veld. De een kan in de ander overgaan en omgekeerd, zooals bijvoorbeeld het geval is bij de uitstraling en absorptie van licht door een atoom. Op de rechtvaardiging en de successen en moeilijkheden van deze theoretische voorstellingen kan ik hier moeilijk ingaan. Slechts wil ik nog op een belangrijke gevolgtrekking wijzen. Het was noodzakelijk om aan te nemen dat een materieel deeltje behalve zijn aangeboren massa nog door zijn lading een extra massa of traagheid had. Men kan dit beschrijven door te zeggen dat het deeltje door zijn lading met het veld gekoppeld is en dat bij zijn beweging het een gedeelte van het veld mee moet sleuren net als een schip een gedeelte van het omgevende water in zijn beweging meeneemt. Deze electromagnetische massa hing af van de snelheid van het deeltje in tegenstelling met de gewone massa. Het scheen dus mogelijk, door de verandering van de massa met de snelheid te bepalen, de twee soorten massa van elkaar te onderscheiden.

Door de relativiteitstheorie werd dit beeld tot een schoon harmonisch geheel gemaakt, dat werkelijk klassiek genoemd mag worden. Voor het energieprincipe was het meest verrassende resultaat dat alle energie ook traagheid moest hebben. De electromagnetische massa waar wij zoo juist over spraken, is hiervan een voorbeeld; het is de massa van de electromagnetische energie van het veld rondom het geladen deeltje. Te scheiden van de gewone massa is dit echter niet meer, omdat volgens Einstein ook de gewone massa van de snelheid moet afhangen en wel op *dezelfde* wijze als de electromagnetische massa.

Het lag daarom voor de hand om de betrekking tusschen energie en massa ook om te draaien en te zeggen dat omgekeerd ook

elke massa met een zekere hoeveelheid energie equivalent was. En zoo kwam men tot de samensmelting van de twee principes van behoud van energie en van massa. Quantitatief luidt de beroemde betrekking van Einstein tusschen energie en massa als volgt: de massa van een hoeveelheid energie E is gelijk aan E gedeeld door het kwadraat der lichtsnelheid. Omgekeerd is de energie die een massa M vertegenwoordigt gelijk aan M vermenigvuldigd met het kwadraat der lichtsnelheid. Het is misschien niet overbodig erop te wijzen hoe gering volgens deze relatie de massa van voor ons groote hoeveelheden energie is. De warmte-energie, noodig om 10^6 L water van 0° tot 100° te verhitten komt overeen met een massa van ongeveer 4 mgr; de kinetische energie van een trein met een snelheid van 100 km per uur zou een massa hebben van nauwelijks 10^{-6} gr. Omgekeerd is natuurlijk de energie, die zelfs zeer kleine hoeveelheden materie vertegenwoordigt, buitengewoon groot.

Dit alles zal U ongetwijfeld zeer speculatief toeschijnen en U zult misschien meer geneigd zijn om deze moderne ontwikkeling van het energieprincipe metaphysisch te noemen, inplaats van de oorspronkelijke beschouwingen van Mayer en Joule. En toegegeven moet worden dat een vaste experimenteele grondslag voor de gelijkwaardigheid van massa en energie nog ontbrak. De veronderstelling ervan was theoretisch bevredigend door de groote eenheid en eenvoud die erdoor verkregen werd. De experimenteele toetsing is, zooals ik reeds zei, pas in de laatste jaren gelukt.

De equivalentie van massa en energie heeft ook eenige merkwaardige gevolgen voor het begrip energie zelf. Veronderstelt men dat werkelijk materie in electromagnetische energie en dus in mechanisch arbeidsvermogen kan worden omgezet en omgekeerd, dan kan de oorspronkelijke definitie der energie gehandhaafd blijven. Einstein's relatie $E = Mc^2$ staat dan in dezelfde betrekking tot het algemeene energieprincipe als wat ik noemde de wet van Mayer—Joule. Zooals deze zegt met hoeveel energie één calorie equivalent is, zoo leert de wet van Einstein ons met hoeveel energie één grammasa gelijkwaardig is. Terloops zij nog opgemerkt dat deze analogie nog verder gaat; ook de definitie van het begrip hoeveelheid warmte vertoont groote gelijkenis met de invoering van het begrip massa. Zoover lijkt het alsof er principieel niets nieuws is. Toch is dit het geval. Doordat

aan alle energie massa moet worden toegeschreven, heeft het begrip energie, in tegenstelling met vroeger, absolute beteekenis gekregen. Aangezien men de totale hoeveelheid massa kan bepalen, hebben niet alleen energiever verschillen beteekenis, maar heeft het ook zin om van de totale hoeveelheid energie te spreken. Er is nu een natuurlijk nulpunt. Veronderstelt men met Einstein dat de energie ook evenals de materie een gewicht heeft, dat evenredig is met de massa, dan kan men in principe het behoud van de energie van een systeem door weging aantonen, geheel analoog aan de wijze waarop Lavoisier het principe van behoud van massa bewees. Ook de vraag of men de plaats van de energie in ruimte en tijd kan bepalen komt nu in een nieuw licht. Bij de behandeling hiervan komt essentieel de quantentheorie te pas en ik kan er hier niet op ingaan. Slechts zij vermeld dat volgens de moderne theorie de localisatie van de electromagnetische energie of beter van het lichtquantum alleen binnen zekere grenzen mogelijk is. Daar staat dan echter tegenover dat ook de strenge localizeerbaarheid van het electron opgegeven moet worden, zoodat ook in dit opzicht energie en materie analoog worden.

De toetsing van Einstein's relatie tusschen energie en massa is mogelijk geworden door het experimenteele onderzoek van de structuur der atoomkernen en van de natuur der doordringende straling, de problemen die thans in zoo sterke mate in het middelpunt van de belangstelling der physici staan.

Alreeds in 1913 heeft Langevin erop gewezen dat in de atoomkern de bindingsenergie waarschijnlijk wel zoo groot zal zijn dat de massa ervan waarneembaar zou kunnen zijn. Hij hoopte op deze wijze de afwijkingen van de chemische atoomgewichten van geheele getallen te verklaren. Later is wel gebleken, vooral door de onderzoekingen van Aston, dat de voornaamste oorzaak van deze niet-geheel talligheid ligt in het feit dat de meeste chemische elementen bestaan uit een mengsel van isotopen, d. w. z. van elementen met dezelfde chemische eigenschappen, dus met dezelfde kernlading, maar met verschillend atoomgewicht. Maar toch zijn ook de atoomgewichten der gescheiden isotopen *niet* geheele veelvouden van het gewicht van het waterstofatoom, en het verschil moet men werkelijk opvatten, Langevin volgend, als de massa van de bindingsenergie der kernbestanddeelen. Sinds

Chadwick's ontdekking van het neutron, een electrisch neutraal deeltje ongeveer zoo zwaar als het proton, de kern van het waterstofatoom, is het het eenvoudigst gebleken om de atoomkern opgebouwd te denken uit protonen en neutronen, die door sterke aantrekkende krachten van nog onbekende aard aan elkaar gebonden en dicht op elkaar gepakt worden. De massa van een samengestelde kern is dan niet gelijk aan de som van de massa's van de protonen en neutronen waaruit het bestaat, maar is iets kleiner. Het verschil is de massa van de bindingsenergie, die op deze wijze, d. i. dus werkelijk door weging, bepaald kan worden.

Het eigenlijke bewijs hiervoor is geleverd door de experimenten over de transmutatie der chemische elementen. Deze oude droom der menschheid is, zooals U bekend zal zijn, in 1919 door Rutherford verwezenlijkt. Rutherford beschoot stikstofgas met de snelbewegende α -deeltjes, d. w. z. Heliumkernen, die door de radioactieve stoffen worden uitgezonden. Hij vond dat zeer snelle protonen werden gevormd. Door allerlei contrôle-proeven kon hij aantoonen, dat men moest aannemen dat deze protonen van de stikstof afkomstig waren, en de natuurlijke interpretatie was dat men hier werkelijk met een desintegratie van de stikstofkern te doen had. Het kleine aantal protonen dat gevormd werd, bewees verder dat dit desintegratieproces een zeer geringe waarschijnlijkheid had en blijkbaar slechts optrad als de stikstofkern door het α -deeltje in het hart geraakt werd. Sindsdien en vooral in de laatste jaren zijn deze experimenten op groote schaal voortgezet. Door de installatie van hoogspanningsapparaten heeft men ook kunstmatig deeltjes met groote snelheid kunnen maken en op deze wijze ook met andere projectielen de atoomkernen kunnen beschieten. Het neutron zelf bleek door zijn groot doordringend vermogen ook een zeer effectief projectiel te zijn, zooals vooral door Fermi is aangetoond. Op deze wijze is het gelukt om niet alleen een groot aantal elementen in andere om te zetten, maar ook om tal van nieuwe, in de natuur niet voorkomende, radioactieve isotopen der bekende elementen en zelfs om eenige geheel nieuwe (ook radioactieve) chemische elementen te maken. Er begint zich een kernchemie, of misschien moet ik zeggen alchemie, te ontwikkelen en de lijst van de reeds onderzochte kernreacties is al zeer respectabel.

Maar keeren we terug tot het experimenteele bewijs van de betrekking tusschen energie en massa. Een voorbeeld waarbij dit zeer

nauwkeurig mogelijk is, treft men aan bij de desintegratie van Lithium. Beschiet men dit element met protonen, die niet eens veel energie behoeven te hebben, dan ontstaan er twee α -deeltjes met een zeer groote kinetische energie, die precies bepaald kan worden. Men vindt nu dat de som van de massa's van de Lithiumkern en van het proton *groter* is dan de massa van de twee α -deeltjes en het verschil komt prachtig overeen volgens de betrekking van Einstein met de massa der kinetische energie van deze deeltjes. Een toetsing zooals deze is thans reeds voor een groot aantal kernreacties verricht. Het succes ervan heeft zelfs er toe geleid om door gebruikmaking van de Einstein relatie en door nauwkeurige meting van de kinetische energieën omgekeerd de massa's van atoomkernen te bepalen. Het is nog opmerkelijk dat het meerendeel der onderzochte kernreacties, om een chemische uitdrukking te gebruiken, exotherm zijn. Een gedeelte der bindingsenergie van de kernbestanddeelen, die eerst slechts in de massa van de kern tot uiting komt, wordt bij de reactie omgezet in kinetische energie. Men *wint* dus aan mechanisch arbeidsvermogen. Men moet echter niet denken dat het dus spoedig mogelijk zal zijn om de kernenergie practisch te benutten, zooals in toekomstfantasieën gaarne wordt verondersteld. Helaas ziet het er naar uit, zooals Bohr onlangs opmerkte, dat hoe meer wij van de structuur der atoomkernen beginnen te begrijpen, hoe onmogelijker de practische toepassing van de kern-energie lijkt. De moeilijkheid is steeds de geringe waarschijnlijkheid van het desintegratieproces, waar ik reeds op wees. Al wint men bij elken treffer een factor honderd aan kinetische energie, zooals vaak het geval is, de treffers zijn zoo zeldzaam dat per slot van rekening toch nog veel mechanische energie verloren gaat.

Een tweede toetsing van Einstein's relatie is mogelijk geworden door de ontdekking van het positron in 1932 door Anderson in Pasadena en door Blackett in Cambridge. Het bestaan van een deeltje met dezelfde massa als het electron en met gelijke doch tegengestelde lading was in 1931 door Dirac op theoretische gronden reeds voorspeld. De experimenteele ontdekking ervan is als het ware een bijproduct geweest van de studie van de z.g. cosmische straling. Het bleek dat als deze straling op een plaatje, zeg van lood, viel, er aan de andere kant vaak vele

deeltjes uitgeschoten werden, waaronder dan behalve gewone electronen ook positronen voorkwamen, zooals door de afbuiging in een magnetisch veld kon worden aargetoond. Later heeft men hetzelfde verschijnsel gevonden als men de doordringende electromagnetische straling of γ -straling, die door radioactieve stoffen worden uitgezonden, op materie liet vallen. Het verdere onderzoek leerde dat men zich dit proces als volgt moet voorstellen. Als de γ -straal dicht langs een atoomkern heenschiet, dan kan het gebeuren dat hij geabsorbeerd wordt, en de energie ervan wordt in de eerste plaats gebruikt voor de vorming van een positief en een negatief (dus gewoon) electron, een z.g. electronpaar. Wat er van de energie van de γ -straal nog overblijft, wordt dan in de vorm van kinetische energie over de twee ontstane deeltjes verdeeld. Men heeft hier dus werkelijk te doen met de materialisatie van electromagnetische energie! Hetzelfde proces bleek ook voor te komen in de buurt van de radioactieve kern zelf, die de γ -straal uitzendt, zij het dan ook met een geringe waarschijnlijkheid. Dit heeft tengevolge dat ook van de gewone radioactieve stoffen voortdurend positronen uitgaan. Ook onder de kunstmatig gemaakte radioactieve elementen heeft men er gevonden die positronen uitzenden. Deze zijn echter van andere oorsprong, wat vooral blijkt uit het feit, dat elk positron niet meer vergezeld wordt door een gewoon electron. Bij het materialisatieproces moet n.l. een electronpaar ontstaan vanwege het principe van behoud van lading, dat van een even universeele geldigheid schijnt te zijn als het algemeene energie-principe.

Men heeft zodoende positronenbronnen tot zijn beschikking gekregen en daardoor is het gelukt om ook het omgekeerde van de materialisatie der energie, namelijk het verdwijnen van massa in de vorm van straling, experimenteel waar te nemen. Op de mooiste en meest directe wijze is dit gedaan in Parijs door Thibaud en Joliot. Zij zetten een positronenbron van bekende sterkte in een vacuum; door een geschikt gekozen magnetisch veld konden de positronen van de electronen gescheiden en dan in een bundel vereenigd worden. Lieten zij dit op lood vallen, dan ontstond er electromagnetische straling. Men moet zich voorstellen dat een positron als het in lood dringt een zeer groote kans heeft om een electron te ontmoeten; het kan zich dan hiermee vereenigen en hierbij verdwijnt hun gezamenlijke massa in de vorm van straling.

Door meting van de electromagnetische energie die per positron ontstond, kon dit werkelijk vrij nauwkeurig worden aangetoond. Ook op meer indirecte wijze is deze z.g. annihilatie-straling sindsdien vaak waargenomen. De waarschijnlijkheid van al deze processen kan met behulp van de theorie van Dirac berekend worden en tot dusver schijnt het alsof ook in dit opzicht er een tenminste kwalitatieve overeenstemming bestaat tusschen theorie en experiment.

Helaas kan ik op deze optimistische toon niet eindigen! Om niet bij U het denkbeeld achter te laten dat in de natuurkunde dus blijkbaar principieel alles in orde is, moet ik nog een fundamentele moeilijkheid bespreken. Deze heeft zich voorgedaan bij de studie van de z.g. β -spectra der radioactieve elementen en zij is van zulk een ernstige aard dat men wel mag zeggen dat daardoor een crisis voor het energieprincipe is ontstaan.

Zooals welbekend zenden de radioactieve stoffen behalve de α -deeltjes en de γ -stralen ook electronen of β -deeltjes. uit. Het groote wonder is nu dat zelfs bij één bepaald radioactief element deze electronen *niet* allen dezelfde snelheid hebben, maar blijkbaar verschillende kernen electronen met *verschillende* kinetische energie uitzenden. De energieverdeeling der electronen is *continu* en strekt zich uit van nul tot vaak een zeer hooge energie. Dit is in tegenstelling met de α -deeltjes en de γ -stralen, die steeds bij een bepaalde radioactieve kern een scherp bepaalde energie hebben. U ziet dat, als het energieprincipe geldig is, men bij die elementen die electronen uitzenden, de z.g. β -radioactieve stoffen, aannemen moet dat hetzij vóór of na de emissie van een electron de kernen verschillende energie zouden moeten hebben. Men zou verwachten dit te merken doordat zij dan ook niet allen precies dezelfde verdere eigenschappen zouden hebben. Bijvoorbeeld zou men kunnen denken, dat als de ontstane kernen verschillende energie hadden en deze op hun beurt uiteen vielen met uitzending van α -deeltjes, deze dan ook verschil in energie zouden vertoonen. Of misschien zou het verschil in energie zich kunnen uiten doordat de verschillende atomen een verschillende kans hebben om uiteen te vallen. Welnu, dit alles is *niet* het geval. Voor zoover men kan nagaan, en juist door het onderzoek der radioactieve eigenschappen kan men dit zeer nauwkeurig doen, zijn de atoomkernen zoowel voor als na een

β -emissie allen in precies dezelfde toestand. En toch hebben de β -deeltjes niet allen dezelfde energie! Ik hoop dat ik hiermee het conflict met het energieprincipe voldoende duidelijk gemaakt heb. U begrijpt dat men langen tijd de experimenteele resultaten gewantrouwd heeft. Men heeft bijvoorbeeld gedacht dat de continue energieverdeeling der electronen misschien een secundair effect was. De β -radioactieve kernen zouden *wel* electronen allen met gelijke energie uitzenden; deze zouden dan echter bij het doordringen van de electronenwolk om de kern door botsingen of door uitstraling in verschillende mate energie kunnen verliezen en op deze wijze zou de continue verdeeling ontstaan. Door zeer delicate experimenten, uitgevoerd door Ellis in Cambridge en Lise Meitner in Berlijn, is wel met zekerheid aangetoond dat deze verklaring onhoudbaar is. De proeven bestonden uit de nauwkeurige bepaling van de hoeveelheid warmte ontwikkeld in een bepaalden tijd door een zeker β -radioactief element (waarvoor gekozen werd *RaE*), als men het omsloot door voldoende lood, zoodat alle straling volledig geabsorbeerd en in warmte omgezet kon worden. Omdat men de levensduur van het element kent, weet men hoeveel atomen in de gekozen tijd uiteen zijn gevallen. Door deeling van de gevonden hoeveelheid warmte door dit aantal atomen vindt men de gemiddelde hoeveelheid energie die elk *RaE* atoom bij het desintegratieproces verliest. Indien nu de continue energieverdeeling der electronen van secundaire oorsprong was, dan zou men voor deze gemiddelde energie moeten vinden de maximum energie die in de verdeeling voorkomt. Immers dit zou de energie zijn die bij deze verklaring elk atoom verliest en door bepaling van de warmteontwikkeling meet men werkelijk de totale hoeveelheid energie, die ontstaat. Men moet hierbij wel bedenken dat elke bekende vorm van energie, of het nu kinetische energie is van de electronen die hetzij door de kernen worden uitgezonden of door botsingen zijn ontstaan, of dat het electromagnetische stralingsenergie is, tenslotte toch door voldoende lood zeker geabsorbeerd en in warmte omgezet wordt. Ellis en Meitner vonden nu voor de door hen gemeten gemiddelde energie *niet* de maximum energie maar een veel kleinere waarde. Deze kwam in grootte goed overeen met de gemiddelde energie die men uit de waargenomen continue energieverdeeling kon berekenen. Hiermee was dus wel overtuigend aangetoond dat dit continue energie-

spectrum van primairen aard was, dat werkelijk de verschillende *RaE* kernen electronen van verschillende energie uitzenden.

Ik heb deze proeven zoo uitvoerig voor U beschreven, omdat ze naar mijn meening zeer fundamenteel zijn, en het energieprincipe ernstig in gevaar brengen. De eenige oplossing die nog mogelijk schijnt werd door *Pauli* voorgesteld. Hij maakte de hypothese dat elke *RaE* kern bij het uiteenvallen behalve het electron nog een tweede deeltje uitzendt. Al de kernen zouden dan toch nog *dezelfde* hoeveelheid energie kunnen verliezen, maar deze energie zou zich bij de verschillende kernen op verschillende wijze over de twee deeltjes verdeelen. Dit tweede deeltje moet dan echter zeer bijzondere eigenschappen hebben indien men al de feiten verklaren wil. Het mag geen elektrische lading bezitten en de massa ervan moet klein zijn, van de zelfde orde van grootte als de electron-massa. Het moet een zeer groot doordringend vermogen hebben, zoodat bij de experimenten van *Ellis* en *Meitner* het niet door het lood geabsorbeerd werd en dus de energie ervan *niet* gemeten kon worden. Dit hypothetische deeltje werd later door *Fermi* het *neutrino* genoemd. Men ziet dat de eigenschappen ervan zoo gekozen zijn dat het voorloopig experimenteel wel niet gevonden zal worden! De pogingen dit te doen hebben dan ook alle een negatief resultaat gehad. Men mag zich daarom ook wel afvragen of door de neutrino-hypothese werkelijk een oplossing van de energiemoeilijkheid verkregen is. Wat men eigenlijk gedaan heeft is de invoering van een nieuwe vorm van energie, die door haar natuur buitengewoon moeilijk in andere, reeds bekende, energievormen omgezet kan worden, waardoor ze aan de waarneming ontsnapt. Maar, zal men vragen, is het dan zoo niet mogelijk om altijd aan het behoud van energie te voldoen en wordt op deze wijze het energieprincipe niet triviaal? Men moet toegeven dat de critiek, in deze vraag gelegen, volkomen gerechtvaardigd is. Wil het energieprincipe een echte physische zin behouden, dan mag men niet afzien van de transformeerbaarheid van de eene energievorm in de andere. Als men aanneemt, dat het neutrino onwaarneembaar is, dan kan men net zoo goed zeggen dat het energieprincipe niet meer geldt.

Ziet men echter af van deze principieele vraag of het neutrino waarneembaar is of niet, dan kan men wel eenige indirecte argumenten ten gunste van het neutrino aanvoeren. Allereerst spreekt

eigenlijk het bestaan van een bovenste grens bij de continue energieverdeeling der electronen van β -radioactieve stoffen reeds voor het neutrino. Men heeft verder eenige redenen om te veronderstellen dat deze maximum energie werkelijk het verschil in energie aangeeft van de kern vóór en na de uitzending van het β -deeltje. Er bestaat ook een eenvoudige empirische samenhang tusschen de grootte van deze maximum energie en de levensduur van het β -radioactieve element, hetgeen er wel op wijst, dat deze energie voor de structuur van de kern van beteekenis is. Tenslotte, en dit is wel het voornaamste argument, is het F e r m i gelukt om op grond van de neutrino-hypothese een theorie voor het β -desintegratieproces te geven, die er naar mijn meening gezond uitziet. Deze theorie sluit zich aan bij de opvatting van de structuur der atoomkernen als bestaande uit protonen en neutronen, die ik al eerder beschreef. De uitzending van een electron en neutrino moet men zich dan gepaard denken aan de omzetting in de kern van een neutron in een proton. De energie die hierbij vrijkomt, wordt dan gedeeltelijk gebruikt voor de materializatie van het electron en het neutrino en de rest wordt in den vorm van kinetische energie weer over deze beide deeltjes verdeeld. Het is op deze wijze mogelijk tot bepaalde voorspellingen te komen over de vorm van het continue energiespectrum der electronen. Ook de betrekking tusschen de maximum energie der electronen en de levensduur van het element wordt nu begrijpelijk. Er is hoop, dat op grond van deze theorie ook de wisselwerking tusschen het proton en het neutron, d. w. z. de geheimzinnige kracht waardoor de deeltjes in de kern bij elkaar gehouden worden, beter begrepen zal kunnen worden.

Door zeer veel en m. i. vooral experimenteel onderzoek zal moeten blijken of de theorie van F e r m i werkelijk houdbaar is. Als dit het geval is, dan mag men het wel als een triomf beschouwen voor de vruchtbaarheid van het universeele principe van behoud van massa en energie.

Mijne Heeren Curatoren! In de eerste plaats wil ik tegenover U van mijn dankbaarheid getuigen, dat Hare Majesteit de Koningin mij tot hoogleeraar aan deze Universiteit heeft willen benoemen. Ik waardeer in hooge mate het blijk van vertrouwen dat Gij mij gegeven hebt door mij bij Hare Majesteit voor benoeming te willen voordragen. Ik kan U slechts verzekeren, dat ik sterk de

verantwoordelijkheid gevoel, die aan mijn ambt verbonden is, en dat ik met mijn beste krachten mijn taak aan de Utrechtsche Universiteit zal trachten te vervullen.

Mijne Heeren Professoren, en in het bijzonder Gij, hooggeachte ambtgenooten der Philosophische Faculteit! Heel dankbaar ben ik U voor de vriendelijke welwillendheid waarmee Gij mij zijt tegemoet gekomen. Ik voel mij in Uw midden nog zeer onervaren, maar hoop mettertijd een waardig lid van Uw kring te worden. Vooral geldt mijn dank U, waarde Ornstein! Voor de vriendschap en hartelijkheid waarmee Gij mij in Utrecht hebt ontvangen, ben ik U zeer erkentelijk. Onze samenwerking dateert reeds van het jaar 1929, toen ik bij mijn eerste verlof uit Amerika eenigen tijd bij Kramers en U heb mogen studeeren. Onze gemeenschapelijke liefde voor de statistische mechanica en ons beider overtuiging dat de experimenteele en theoretische natuurkunde eigenlijk nauwelijks te scheiden zijn, geven naar ik hoop een goede grondslag voor onze verdere samenwerking. Trouwens naar mijn gevoel is dit al wel gebleken in het halve jaar dat ik hier reeds werkzaam was. Ik ben ook zeer getroffen door Uw bereidwilligheid om onmiddellijk een gedeelte van het experimenteele onderzoek in Uw laboratorium te gaan wijden aan de problemen der kernphysica, het gebied dat mij thans zoo na aan het hart ligt.

Ook tegenover U, hooggeachte Moll, Burger, Minnaert en Van Cittert, wil ik van mijn vreugde getuigen dat ik gezamenlijk met U in dienst van de Natuurkunde hier werkzaam zal mogen zijn.

Waarde Kramers! Om Uw opvolger te zijn is een zware taak en Gij weet dat ik lang geaarzeld heb voordat ik besloot haar te aanvaarden. Ik weet maar al te goed dat ik niet Uw veelzijdigheid en mathematische kracht bezit. Ik hoop dan ook nog vele malen te mogen vragen om Uw hulp en oordeel, die Gij mij reeds zoo vaak verleend hebt. Dat de vriendschap, die ons reeds zoo langen tijd verbindt, tot onze geregelde samenwerking zal mogen voeren, is mijn innige wensch.

Waarde vriend Wiersma! Ook hier wil ik aan mijn blijdschap uiting geven dat wij elkaar thans weer vaak zullen zien en spreken

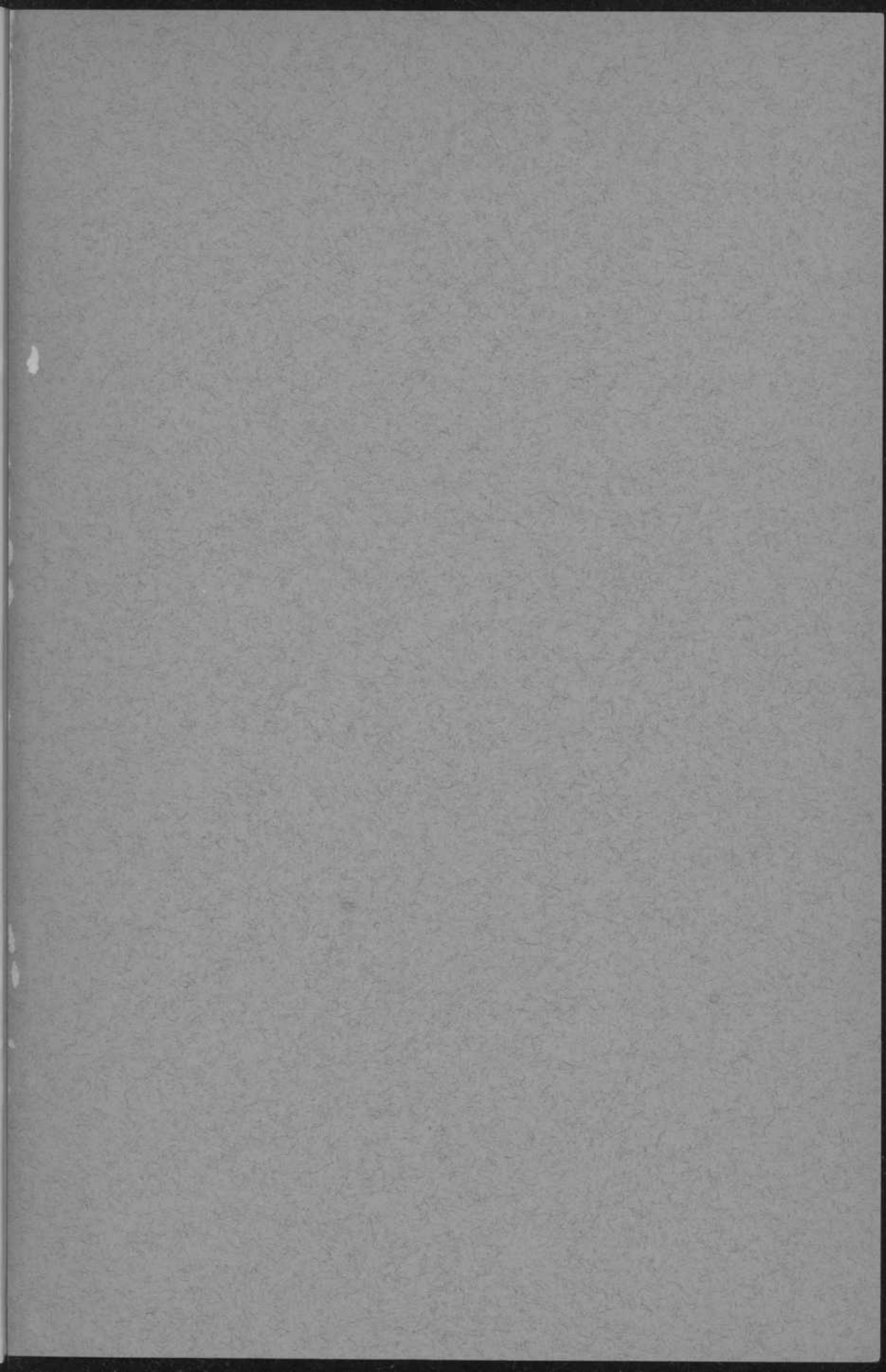
en dat ik daardoor geregeld contact zal hebben met het Leidsche Physische Laboratorium.

Helaas is het mij niet vergund geweest om op deze plaats mijn grooten leermeester en vriend *Ehrenfest* toe te spreken. Wat ik aan hem te danken heb, kan ik niet met eenige woorden zeggen. Ik wil daarom slechts opmerken, dat ik het gevoel heb dat hetgene wat ik in de natuurkunde en bij mijn onderwijs goed doe, dat is wat in zijn geest geschiedt. Ik zal gelukkig zijn als ik iets van deze geest op mijn studenten zal kunnen overbrengen.

Hooggeachte ambtgenooten en studenten der Universiteit van Michigan! Gij weet met welk een zwaar hart ik uit Uw midden ben weggegaan. De samenwerking met U, waarde *Goudsmit*, en met U, waarde *Dennison* en *Laporte*, zal ik ten zeerste missen. De groote vriendschap die mij in Ann Arbor bewezen is, zal steeds in mijn dankbare herinnering blijven. In het bijzonder wil ik nog U, hooggeachte *Randall*, danken voor het vertrouwen dat U steeds in mij gesteld hebt. Van harte wensch ik dat het Physics Department onder Uw leiding een gestadige bloei moge beleven, en ik hoop dat mijn contact ermee ook in de toekomst bewaard zal blijven.

Dames en Heeren Studenten der Utrechtsche Universiteit! Gij hebt reeds met mij kennis gemaakt en ik vermoed dat Gij al wel zult weten wat Gij aan mij hebt. Laat mij U enkel nog vertellen dat een zwakte van mij is, dat ik heel slecht alleen kan werken. Ik kan mij de studie der Natuurkunde eigenlijk slechts in samenwerking met anderen voorstellen, en Gij zult mij dan ook altijd bereid vinden om de vragen die U interesseeren met U te bespreken. De natuurkunde is weer in een periode van snelle ontwikkeling en de meeste physici zijn het er wel over eens, welke de belangrijkste problemen zijn. Ik hoop dat de bemoediging die deze zekerheid en eensgezindheid mij gegeven heeft, ook U voor Uw leven een steun zal zijn.

Ik heb gezegd.



BRINKMAN PROD. NR. B



0 344 335

DEPOT NED. PUBL.



4 220 282