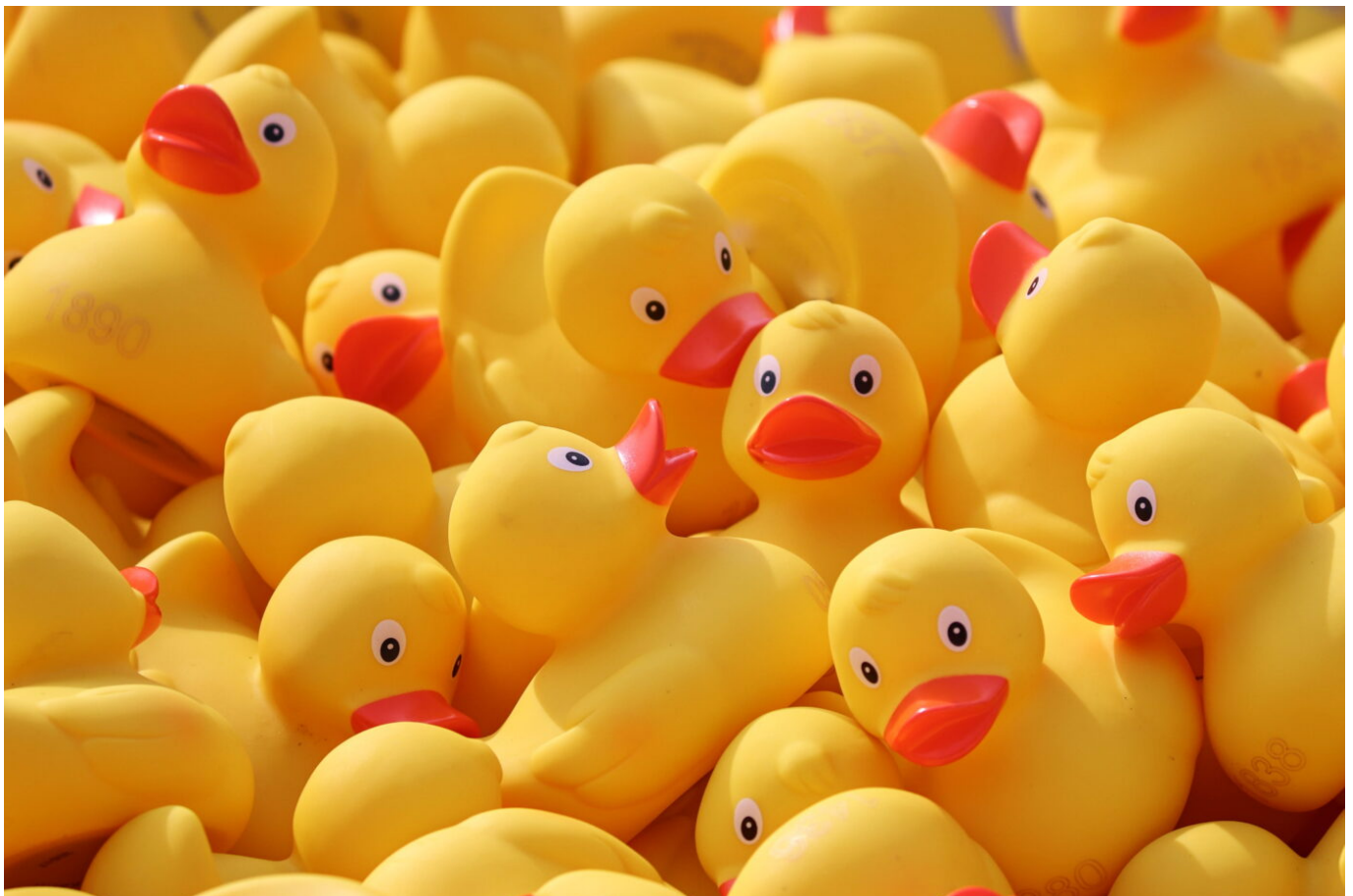


# Waarom zijn alle elektronen hetzelfde?

**In een telefoongesprek tussen Richard Feynman en John Wheeler - twee theoretisch natuurkundigen van wereldformaat - kwam de volgende vraag ter sprake: waarom zien alle elektronen er hetzelfde uit? In dit artikel bespreek ik hoe een opmerkelijk antwoord op deze vraag heeft geleid tot een nieuwe theorie voor antimaterie - een waarbij elektronen terugreizen in de tijd.**



**Afbeelding 1. Elektronen zijn als identieke badeendjes.** Waarom zien ze er allemaal hetzelfde uit? Foto via [Piqsels](#).

In de lente van 1940 ontving Richard Feynman een telefoontje van professor John Wheeler. Feynman was op dat moment begin twintig, en druk bezig met zijn promotieonderzoek aan

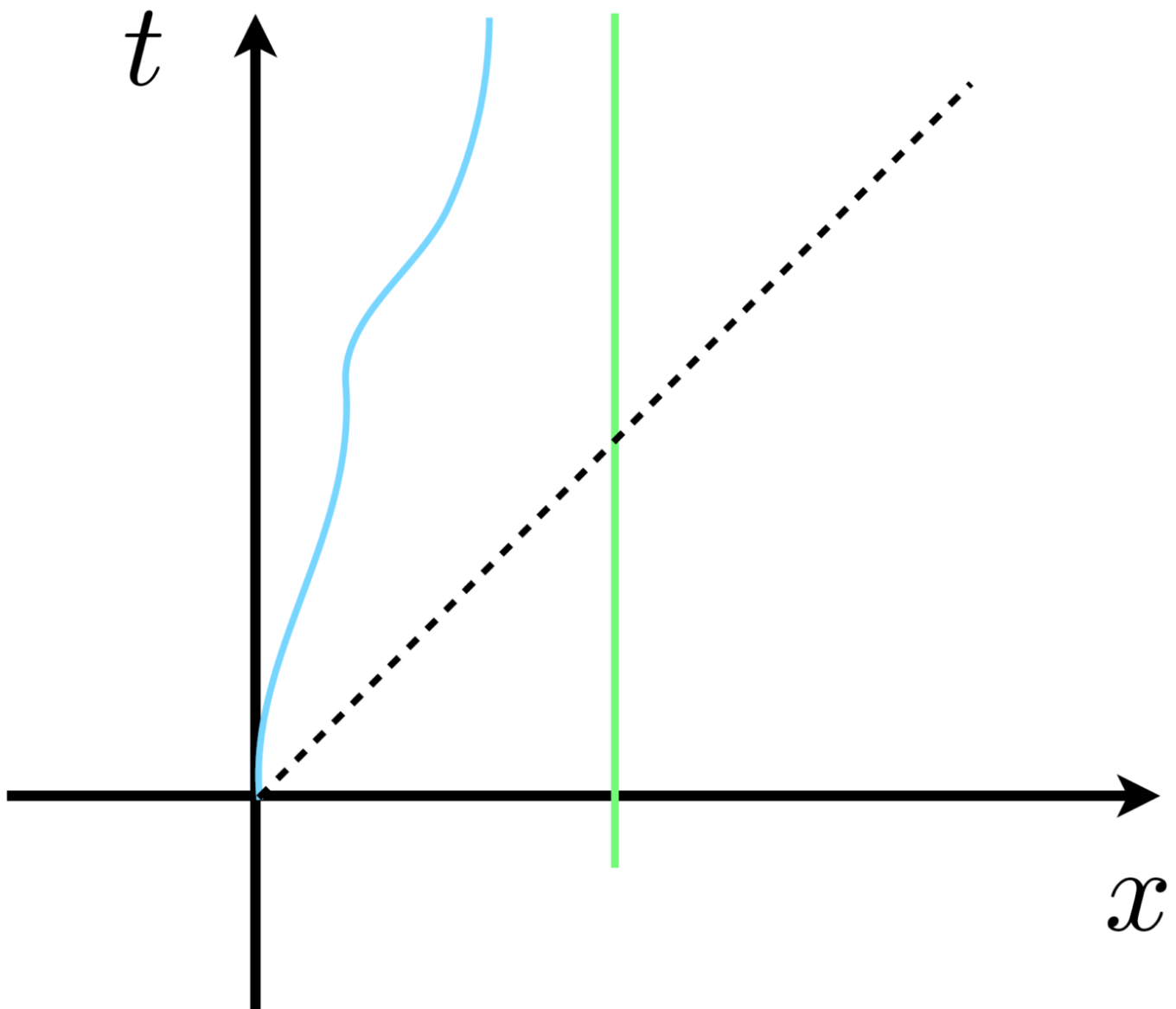
de Princeton Universiteit onder begeleiding van Wheeler. Zijn onderzoek was erop gericht de klassieke wetten van de elektrodynamica te *quantiseren*. Tot dan toe was de quantummechanica heel succesvol gebleken in het verklaren van een aantal specifieke eigenschappen van individuele systemen, bijvoorbeeld de spectraallijnen van het waterstofatoom. Het was echter nog niet gelukt om de volledige *elektrodynamica* – het geheel van de wetten voor de elektrische en magnetische krachten – in een consistente quantumtheorie te vatten. *Elektronen* zijn daarvoor erg nuttig: die zijn negatief geladen, dus worden beïnvloed door elektrische en magnetische krachten, maar tegelijkertijd zijn ze klein genoeg om ook *quantumeffecten* een belangrijke rol te laten spelen. Het betreffende telefoontje – zoals Feynman zelf beschrijft in zijn [speech](#) bij het ontvangen van de Nobelprijs in 1965 – betrof de volgende uitwisseling: “Feynman, ik weet waarom alle elektronen dezelfde massa en lading hebben.” “Waarom?” “Omdat ze allemaal hetzelfde elektron zijn!”

## Ruimtetime

Op het eerste gezicht klinkt het idee van Wheeler – dat tegenwoordig bekend staat als het ‘*één-elektron-universum*’ – als complete onzin: hoe kan hetzelfde deeltje op twee plekken tegelijk zijn? Toch bracht het telefoontje Feynman tot een belangrijk inzicht over de interpretatie van de *antideeltjes* die ik recent besprak in [dit artikel](#). Om beter te begrijpen hoe dit werkt moeten we eerst iets verder de *speciale relativiteitstheorie* induiken. Die relativiteitstheorie – ontwikkeld door Albert Einstein aan het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw – gaat over effecten die optreden wanneer objecten heel snel bewegen, met een snelheid die dicht in de buurt komt van de lichtsnelheid. Deze *relativistische* effecten treden op doordat het verloop van de tijd voor verschillende waarnemers anders is. (Voor meer detail over hoe deze effecten ontstaan kun je [deze achtergrondartikelen](#) raadplegen.) We zullen nu kijken naar een specifiek soort diagram waarin deze effecten vaak worden weergegeven.

[Ruimtetime diagrammen](#) geven een weergave van hoe waarnemers die met een verschillende constante snelheden bewegen, eenzelfde gebeurtenis observeren. Een voorbeeld van zo’n diagram is in afbeelding 2 weergegeven. Hier staat de horizontale as voor de positie (aangegeven met de letter  $x$ ) en de verticale as voor de tijd (aangegeven met de letter  $t$ ). In het diagram zijn gekleurde lijnen weergegeven die de paden van deeltjes – bijvoorbeeld elektronen – door de ruimtetime moeten voorstellen. Zo’n pad wordt ook wel de *wereldlijn* van het deeltje genoemd. Het simpelste voorbeeld is een deeltje dat stilstaat ten opzichte van de

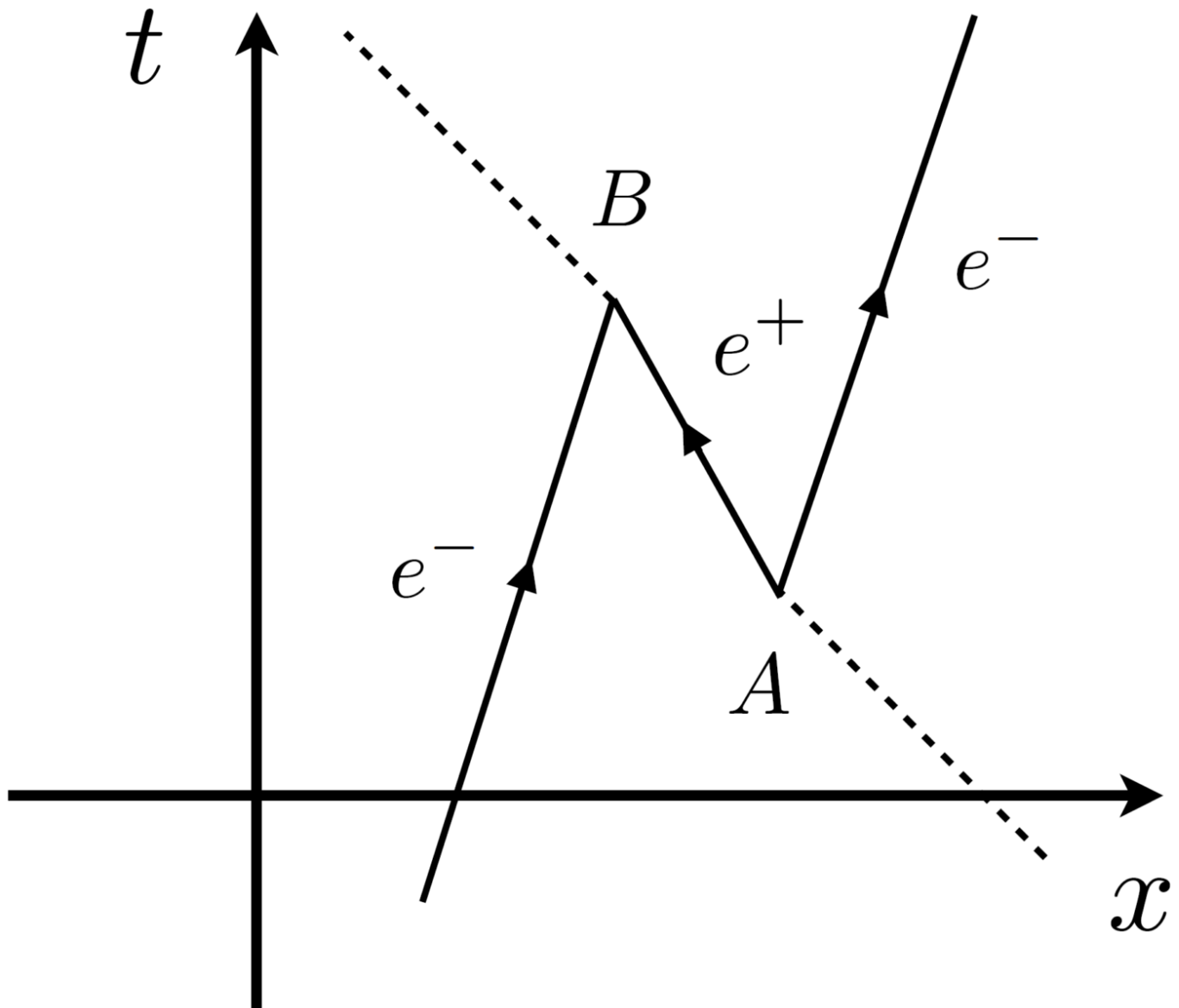
waarnemer - in de afbeelding aangegeven met groen. Zo'n deeltje heeft een verticale wereldlijn, omdat het alleen in de tijd - de verticale richting - vooruitgaat. De wereldlijn van een deeltje dat beweegt is weergegeven in het blauw. De helling wordt bepaald door de snelheid: hoe sneller het deeltje beweegt, hoe minder steil de lijn omhoog loopt. Deeltjes kunnen echter niet sneller gaan dan de lichtsnelheid, die in het ruimtetijd diagram met een helling van 45 graden overeenkomt. De helling van de wereldlijn kan dus (onder normale omstandigheden) niet minder steil worden dan deze hoek.



**Afbeelding 2. Een ruimtetijd diagram.** Twee wereldlijnen - paden van deeltjes in ruimtetijd - zijn weergegeven: die van een stilstaand object (groen) en die van een deeltje dat beweegt (blauw). De stippellijn stelt een lichtstraal voor die vanuit de oorsprong naar rechts vertrekt.

## Terug in de tijd?

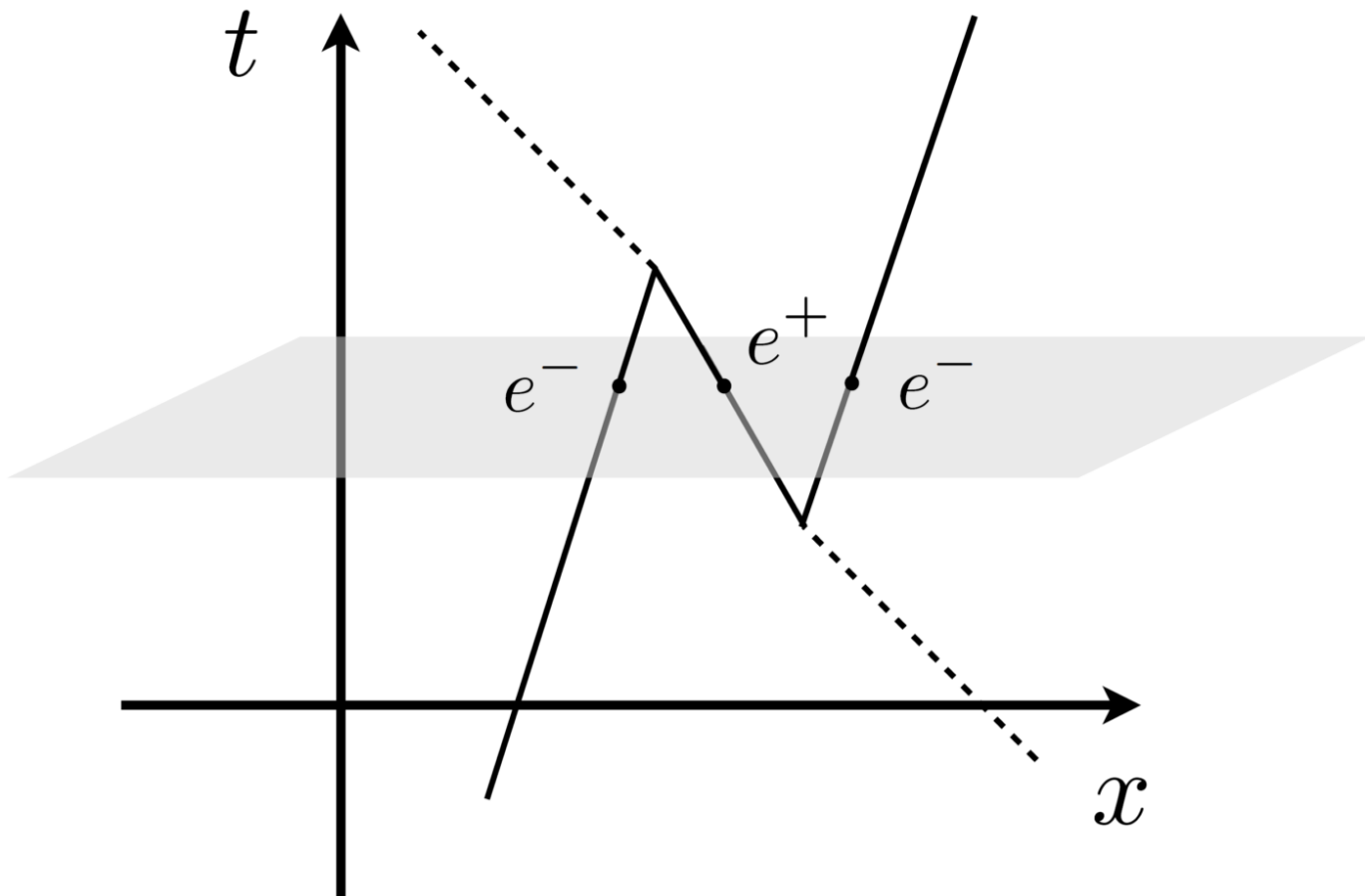
Laten we nu een iets interessanter ruimtetijd-diagram bekijken waar een natuurkundig proces met meerdere deeltjes plaatsvindt: een interactie tussen een elektron en een *positron*. Een positron is het antideeltje van het elektron – met precies dezelfde massa, maar tegengestelde lading – waarvan het bestaan, zoals ik recent in [dit artikel](#) heb besproken, al op puur wiskundige grond door de natuurkundige Paul Dirac werd voorspeld. In 1932 werd het positron ook daadwerkelijk waargenomen! Het blijkt dat positronen en elektronen elkaar bij contact volledig annihileren, waarbij energie vrijkomt in de vorm van straling. Het omgekeerde proces kan ook plaatsvinden: uit een hoogenergetische gammastraal kan plots een positron-elektronpaar ontstaan. Het gecombineerde proces, waarbij eerst spontaan een positron-elektronpaar ontstaat waarna het positrondeeltje een tijdje later door een tweede elektron wordt geannihileerd, is in afbeelding 3 weergegeven. In punt A creëert een hoogenergetische lichtstraal een elektron-positronpaar, en in punt B vindt vervolgens de annihilatie plaats.



**Afbeelding 3. Een elektron-positroninteractie.** In punt A ontstaat uit gammastraling (aangegeven met een stippellijn) een elektron-positronpaar aangegeven met de symbolen  $e^-$  en  $e^+$ . Het elektron beweegt weg naar rechts, en het positron beweegt naar links en komt in punt B een tweede elektron tegen, waarbij beide elkaar annihileren en een tweede gammastraal ontstaat.

Het bovenstaande proces is typerend voor het idee dat Wheeler had ontwikkeld. Laten we om dit te begrijpen het ruimtetijd-diagram in afbeelding 3 nog eens nader bekijken. Een vast tijdstip voor de waarnemer komt overeen met een horizontaal vlak (aangegeven in afbeelding 4). Op ieder tijdstip kunnen we nu het aantal deeltjes bepalen, door het aantal snijpunten van de verschillende wereldlijnen met dit vlak te tellen. In eerste instantie is dat er één (een elektron) vervolgens zijn dat er drie (twee elektronen en een positron) en

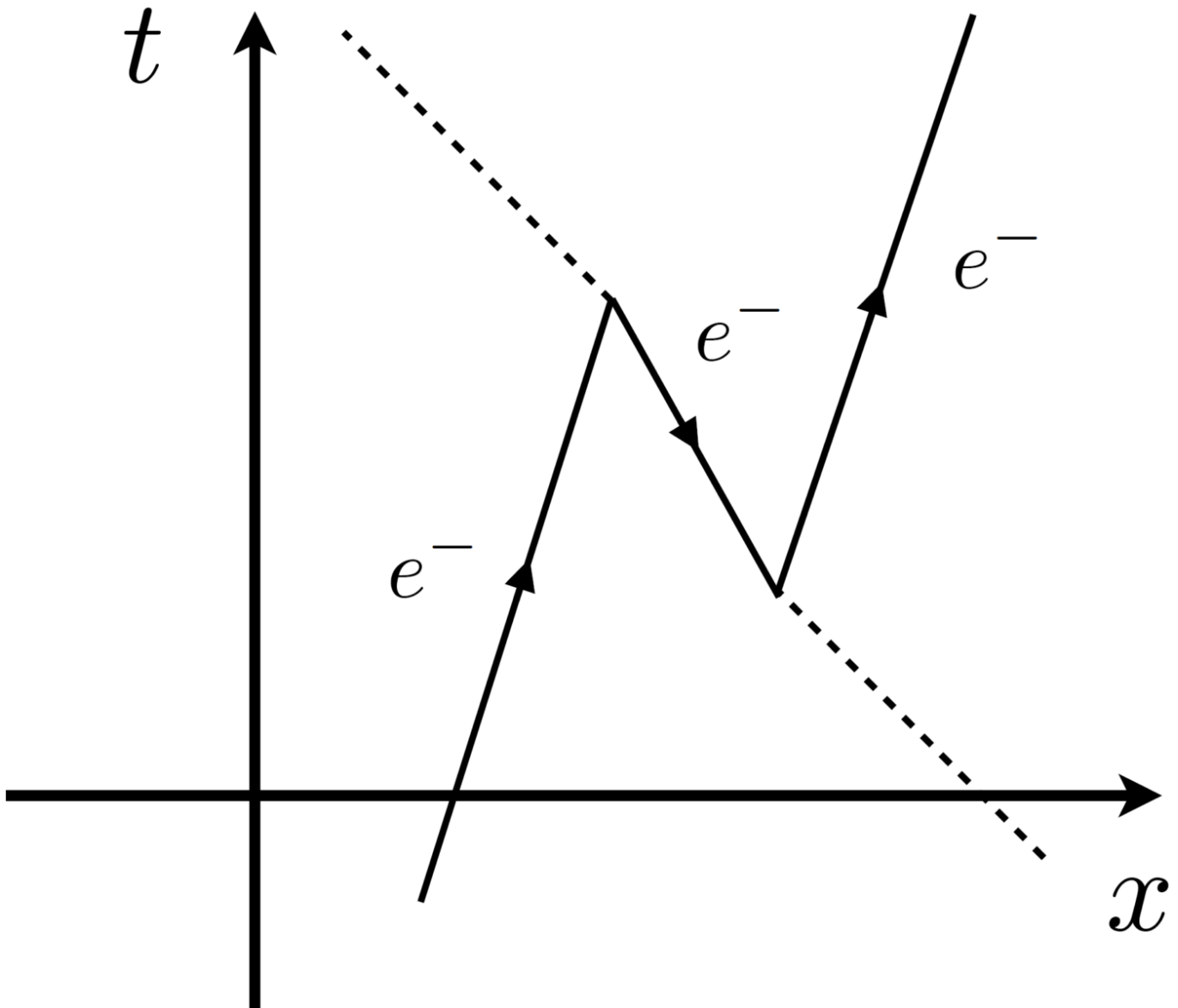
uiteindelijk weer één (een elektron). We denken normaal gesproken over dit proces na in termen van drie losse wereldlijnen - twee voor de elektronen en een voor het positron.



**Afbeelding 4. Deeltjes tellen.** Het grijze vlak geeft een vast tijdstip aan in het ruimtetijd diagram. De drie snijpunten komen overeen met de drie deeltjes die op dat moment tegelijk bestaan: twee elektronen en een positron.

Er is echter een tweede manier om tegen het bovenstaande ruimtetijd diagram aan te kijken, namelijk in termen van een enkele wereldlijn! De interpretatie van het diagram (zoals weergegeven in afbeelding 5) is dan als volgt: een elektron komt van links, beweegt vervolgens voor een korte periode terug in de tijd, en gaat tot slot weer verder als elektron. Het proces waarbij we op een bepaald moment drie verschillende deeltjes zien - twee verschillende elektronen en een positron - is dus eigenlijk onderdeel van de wereldlijn van een enkel elektron. Wheelers idee was nu om dit te generaliseren naar alle elektronen in het universum! In theorie zou je een heel ingewikkelde wereldlijn van een elektron kunnen construeren - met wel zo'n knikken - om het geschatte aantal elektronen in het zichtbare universum te verklaren. Dat deze elektronen allemaal precies dezelfde eigenschappen

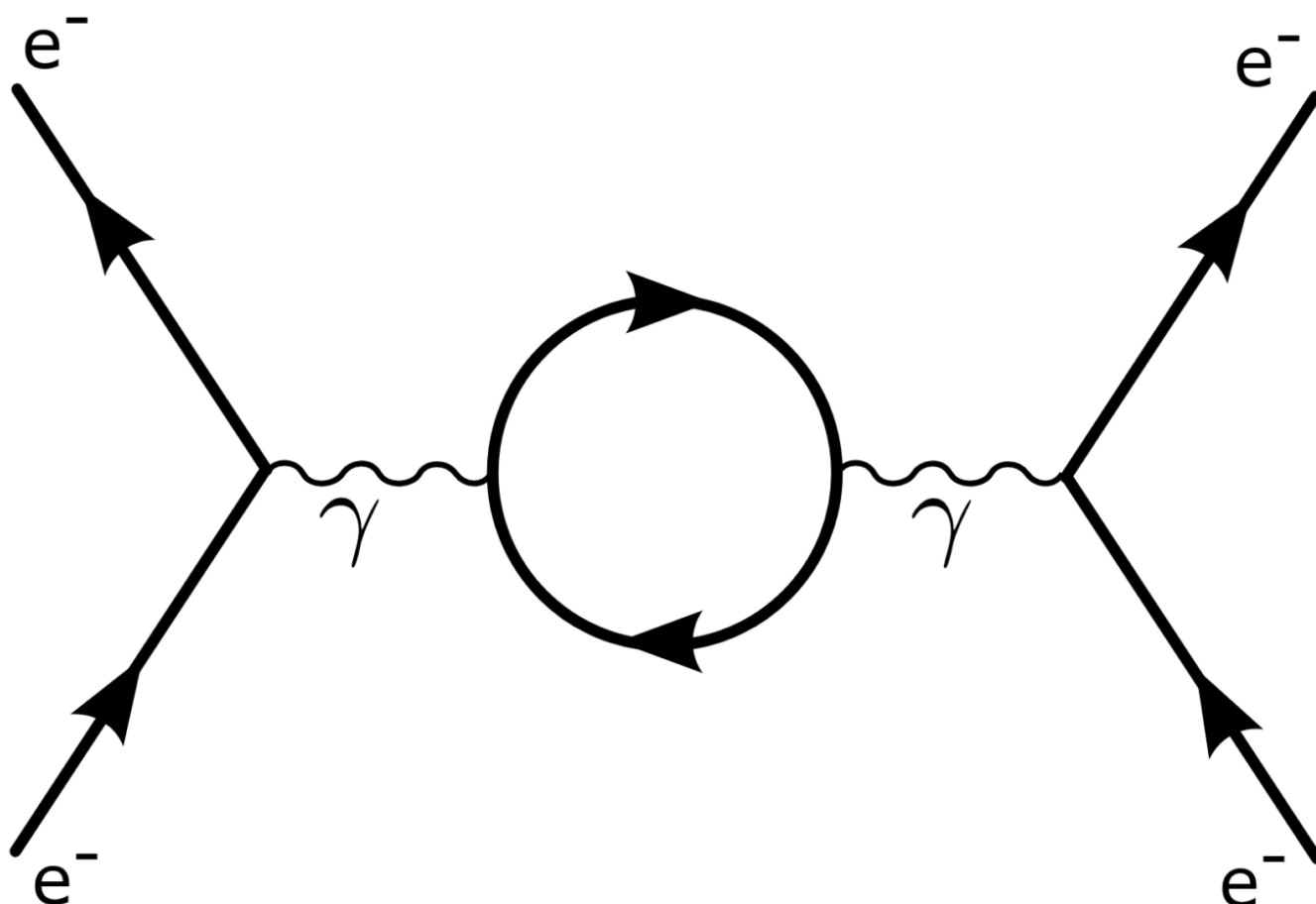
hebben is nu duidelijk: er is volgens deze logica namelijk maar één elektron in het heelal dat heen en weer in de tijd beweegt. Een direct probleem met Wheelers speculatieve idee is natuurlijk dat een dergelijke wereldlijn ook een even grote hoeveelheid positronen oplevert. Omdat we deze hoeveelheid positronen nog nergens hebben waargenomen, moeten ze ergens goed verstopt zitten: het idee creëert daarom grotere problemen dan dat het oplost.



**Afbeelding 5. De wereldlijn van één elektron.** Door de pijl op de wereldlijn van het positron om te draaien, kunnen we het hetzelfde proces begrijpen in termen van een enkel elektron, dat van links aankomt, vervolgens voor een korte periode terug in de tijd beweegt, en tot slot weer omkeert en verder gaat naar rechts.

Het was dan ook meer het feit dat je het positron kunt zien als een elektron dat teruggaat in de tijd dat Feynman daadwerkelijk aan het denken zette. In 1949 schreef hij hier zelfs een

artikel over, 'The theory of positrons', en het idee vormde een inspiratie voor het werk waar hij - samen met Julian Schwinger en Shin'ichiro Tomonaga - later de Nobelprijs in de Natuurkunde voor zou krijgen. *Feynmandiagrammen* zijn een manier om het gedrag van subatomaire deeltjes te bestuderen aan de hand van alle mogelijke interacties - ook die door allerlei 'virtuele deeltjes' die te kort bestaan om waar te nemen. De Feynmandiagrammen voor de interacties tussen elektronen, positronen en fotonen vormen een belangrijk onderdeel van wat we nu de *quantumelektrodynamica* noemen, of *QED* in het kort, de vereniging van de quantumtheorie met de klassieke elektrische en magnetische krachten. Feynman zei hier zelf over: "Ik nam het idee dat alle elektronen hetzelfde waren niet zo serieus als het idee dat je je een positron kunt voorstellen als een elektron dat van de toekomst naar het verleden [...] beweegt. Dat heb ik gestolen!"



**Afbeelding 6. Een Feynmandiagram.** Voorbeeld van een Feynmandiagram in QED: een techniek ontwikkeld door Feynman om ingewikkelde berekeningen in een plaatje te vatten.

Kortom: het idee van het 'elektron dat alle elektronen is' is misschien zelf niet heel nuttig gebleken, maar het telefoongesprek tussen Feynman en Wheeler laat wel zien dat



speculatieve ideeën soms als belangrijke inspiratiebron kunnen dienen. De interpretatie van het positron als een elektron dat terug in de tijd beweegt, en de beschrijving van de daarbij horende interacties in termen van diagrammen, leidde voor Feynman uiteindelijk zelfs tot de Nobelprijs! Iets om in je achterhoofd te houden wanneer je een vraag hoort die op het eerste gezicht waanzinnig lijkt - bijvoorbeeld waarom alle gele badeentjes er hetzelfde uitzien.