

Een digitale les over het foto-elektrisch effect¹

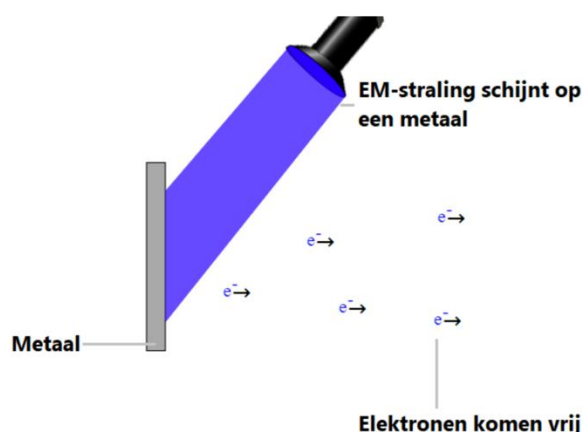
Ed van den Berg, Luiza Vilarta Rodriguez, Jan van der Veen

Universiteit Twente

Leerlingen komen binnen, vormen groepjes van twee of drie rond een laptop, en binnen een paar minuten regent het termen als fotonen, elektronen, intensiteit, golflengte, en frequentie. De discussies gaan door tot enkele minuten voor het einde van de 60-minuten les en dat is bijzonder, een les waarin continu geredeneerd wordt met de bedoelde begrippen.

Go-Lab/Graasp platform voor online lessen

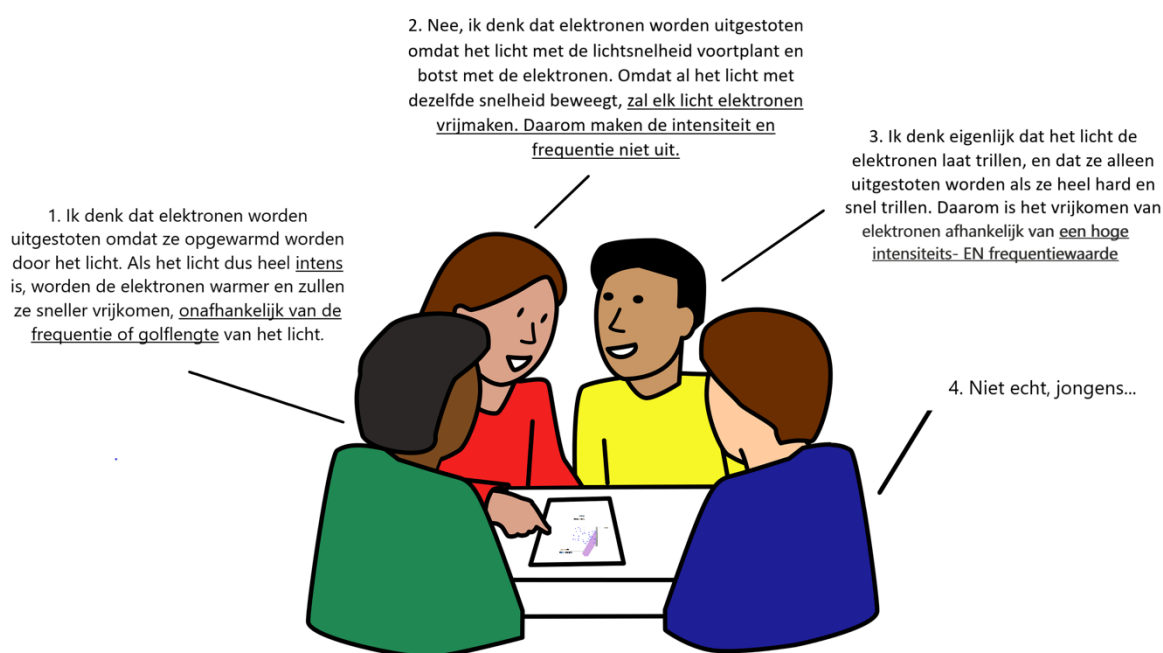
Een netwerk van organisaties onder leiding van Universiteit Twente ontwikkelde de Go-Lab (www.golabz.eu) omgeving waarin ontwikkelaars en docenten digitale lessen kunnen maken. In deze omgeving kun je tekst invoeren, multimedia en simulaties toevoegen, en “tools” om leerlingen aan het redeneren te krijgen. De docent kan feedback invoegen bij de foute antwoordopties. Bij simulaties kan de leerling variabelen manipuleren, data verzamelen en tabellen en grafieken produceren, dus echt onderzoeken. Leerlingen kunnen alleen werken, ideaal voor thuiswerk en tijdens de coronacrisis. De voorkeur is echter voor face-to-face werken in duo's en trio's of via een chatfunctie om redeneren te stimuleren. Het systeem produceert handige collecties van leerlingantwoorden waarop de docent in een volgende les kan reageren. In principe kan een docent met deze tools eigen lessen maken met veel variatie. In de praktijk is er een behoorlijk steile leercurve om het systeem onder de knie te krijgen. Leerlingen doen redelijk enthousiast mee met zo'n digitale les. In de bovengenoemde les was het redeneren zelfs uitzonderlijk. We beschrijven de les die op verzoek gratis beschikbaar is via deelname aan ons onderzoek en ook nuttige informatie opleverde over leerlingdenkenbeelden m.b.t. het foto-elektrisch effect. De beschreven les vond plaats voor de lockdown.



Figuur 1 Licht valt op een metaal en elektronen komen eruit (simulatie Anjo Anjewierden). Met opzet is gekozen voor een opstelling zonder schakeling met remspanning.

¹ Deze uitgebreide versie is geschreven voor het verslag van de 2020 WND conferentie en kwam tot stand door te starten met het NVOX-artikel van oktober 2020 en daar details aan toe te voegen. Deze versie kan dienen als een docentenhandleiding bij de ILS. Voor toegang tot de online les vraag: l.vilartarodriguez@utwente.nl Vanaf midden 2021 zal de les gratis beschikbaar zijn.

Figuur 2 Drie hypothesen die misschien toch fout zijn.



Lesopbouw

Voorkennis (tabblad herinneren) wordt opgehaald door ja-nee vragen over straling en eigenschappen, o.a. of rood licht een grotere frequentie (nee) en golflengte (ja) heeft dan paars licht en welke eigenschap(en) gekoppeld is aan de intensiteit van licht. In het **tabblad inleiding** volgt dan figuur 1 met een definitie van het foto-elektrisch effect dat EM-straling onder bepaalde omstandigheden elektronen kan vrijmaken uit een metaal. Er worden 3 mogelijke verklaringen/hypothesen gepresenteerd (figuur 2) waarbij de vraag wordt gesteld ‘Onder welke omstandigheden treedt het foto-elektrisch effect (FE) op? Vier leerlingen hebben een discussie over deze vraag, maar er is een probleem. De antwoorden van leerlingen 1, 2, en 3 zijn fout. Bespreek wat er fout kan zijn aan de voorspellingen en vul jouw voorspelling in over onder welke omstandigheden het FE-effect optreedt.’ Dat doen leerlingen en daar komen interessante antwoorden uit, bijvoorbeeld ‘het FE-effect treedt op wanneer de fotonen genoeg lading bevatten om de elektronen te bevrijden door ertegenaan te botsen’, of ‘als de EM-straling de juiste frequentie heeft om met de elektronen te resoneren’, of ‘als het licht heel fel is’, of ‘door het EM licht gaan elektronen naar een hogere schil en uiteindelijk naar een oneindige schil en ontsnappen’. Veel leerlingen denken in termen van excitatie en ionisatie, het is dus belangrijk om voor of tijdens de les de metaalbinding te herhalen.

Het **tabblad verkennen** begint met een simulatieopdracht: ‘Neem 5 minuten om het virtuele lab te verkennen door de verschillende parameters te variëren (zoals je zelf wilt). Zodra je klaar bent, rapporteer de belangrijkste waarnemingen.’ Dit is het eerste onderzoekende onderdeel van de les. Frequentie/golflengte en intensiteit kunnen worden gevarieerd door de leerlingen. Met de simulatie begint het proces van hypothese formuleren en uitproberen. Uit leerling samenvattingen blijkt dat:

- 67% door heeft dat meer intensiteit leidt tot meer elektronen;
- 46% denkt dat er een connectie is tussen verandering van frequentie/golflengte en verandering van elektronensnelheid, bijvoorbeeld *hoe dichterbij het ultraviolet, hoe meer E_{kin} de elektronen hebben*;

- 31% ziet dat er een grenswaarde is voor de frequentie of golflengte, bijvoorbeeld *vanaf een golflengte kleiner dan 535 nm komen er elektronen vrij*.

Tabel 1 Overzicht van online module Foto-elektrisch effect

Tabblad	Beschrijving van inhoud
Welkom	Welkom bij foto-elektrisch effect en leerlingen kiezen voor zichzelf een wetenschapper, Schrödinger of Heisenberg. Daarmee wordt de taakverdeling van een duo leerlingen geregeld. Bijvoorbeeld, Heisenberg meet in de simulatie en Schrödinger noteert en omgekeerd. Ook kan hiermee redeneren tussen 2 leerlingen worden gestimuleerd.
Herinneren	Doel is de vereiste voorkennis op te frissen. Enkele waar/onwaar uitspraken over elektromagnetische straling. Bv <i>puur roodlicht heeft een langere golflengte dan puur paars licht</i> en <i>rood licht heeft een hogere frequentie dan paars licht</i> .
Inleiding	Via figuur 1 wordt het verschijnsel foto-elektrisch effect geïntroduceerd met als hoofdvraag: <i>Onder welke omstandigheden treedt het foto-elektrisch effect op?</i> Figuur 2 geeft daarop 3 antwoorden die fout zijn en leerlingen worden uitgedaagd een beter antwoord te formuleren. Natuurlijk verwachten we nog geen correcte antwoorden. Leerlingen vinden het lastig dat ze een vraag krijgen en dat ze niet direct een correct antwoord kunnen zien, maar er wordt vermeld dat dit later in de les volgt.
Verkennen	Leerlingen verkennen de simulatie voor 5 minuten waarbij ze zelf de intensiteit en frequentie variëren maar misschien nog niet systematisch. Ze noteren de belangrijkste observaties. De antwoorden op dit punt zijn heel interessant en laten typisch leerlingdenken zien. Sommige leerling duo's werken bij dit verkennen al heel systematisch en komen al tot bijna correcte formuleringen van de rol van intensiteit en frequentie. Dan volgt een korte uitleg over onafhankelijke en afhankelijke variabelen met enkele waar/onwaar vragen om te toetsen of leerlingen het begrepen hebben.
Verkennen 2.0	Leerlingen gaan nu systematisch de intensiteit variëren om te zien wat het effect is. Maar eerst komt de vraag: <i>"Hoe denk je dat de intensiteit van de straling het foto-elektrisch effect beïnvloedt?"</i> <i>Voorbeelden van (niet perse juiste) antwoorden:</i> • <i>"Hoe hoger de intensiteit, hoe sneller de elektronen"</i> • <i>"Als de intensiteit zeer hoog is (nabij 100%) worden elektronen uitgezonden"</i> • <i>"Als de intensiteit toeneemt, worden meer elektronen uitgezonden"</i> Leerlingen worden dan gevraagd hun eigen antwoord op de vraag te formuleren. Vervolgens krijgen ze de opdracht een grafiek te maken van het aantal elektronen versus intensiteit. De simulatie experimenten produceren een tabel en een grafiek. Leerlingen krijgen hun waarnemingen uit het onderdeel 'verkennen' te zien en ze worden gevraagd om die aan te vullen. Tenslotte zijn er waar/onwaar vragen over de resultaten om echt duidelijkheid en overeenstemming te krijgen over de observaties.
Verkennen 3.0	Nu staat de frequentie centraal. Hier is dezelfde aanpak gevolgd als bij intensiteit. <i>Hoe denk je dat de frequentie van de straling het foto-elektrisch effect beïnvloedt?</i>

Tabblad	Beschrijving van inhoud
	Voorbeelden van (niet perse juiste) antwoorden: • “Hoe hoger de frequentie, hoe sneller de elektronen” • “Als de frequentie zeer hoog is, worden elektronen uitgezonden” • “Als de frequentie toeneemt worden meer elektronen uitgezonden” De opdracht is dan een Kinetische energie van elektronen versus frequentie grafiek te maken met de simulatie.
Conclusie	Dit onderdeel start met de oorspronkelijke cartoon en vraagt opnieuw waarom alle drie de antwoorden fout zijn. Met leuke cartoon plaatjes wordt de discussie gevoerd over de rol van intensiteit en de rol van frequentie uiteindelijk leidend naar een video uitleg.
Einstein's Nobelprijs	De uitleg wordt gedaan d.m.v. een video en die video blijkt fout te zijn want die gaat over ionisatie van atomaire elektronen terwijl het foto-elektrisch effect gaat over collectief gebonden elektronen in een metaalbinding. Zoiets als: N.B. bij het foto-elektrisch effect gaat het om emissie van valentie elektronen die vrij rondzwerven door het metaal en gebonden zijn aan het metaalrooster en niet aan individuele atomen in het metaal. Emissie van dergelijke elektronen (Uittree energie) kost minder energie dan bevrijding van individueel gebonden elektronen aan atomen. Er volgt nog een prachtige en korte posteruitleg van het FE effect. Daar moet nog een notitie bij dat het om collectief gebonden elektronen in een metaalbinding gaat. N.B. Video, hier moeten de oortjes of koptelefoon in anders stoort het geluid andere groepjes. Lang niet iedereen had oortjes bij zich.
Welkom	Hier kunnen leerlingen rollen wisselen, Heisenberg versus Schrödinger.
Einstein's hypothese	Hoofddoelen van deze 2^{de} les zijn 1) begrijpen dat de data verkregen zijn uit de simulatie en 2) waarom licht gequantiseerd is en wat dat betekent. Leerlingen bekijken opnieuw de video en dan volgt een vraag over welke grafiek je nodig hebt om $E_{kin} = hf - E_{uittree}$ te begrijpen.
De wet van Einstein	De formule wordt vergeleken met $E_{kin} = af + b$ om dichterbij de bekende wiskunde van lineaire grafieken te komen. Er volgen dan 4 verschillende uitspraken over de betekenis van hf , $E_{uittree}$, en E_{kin} . Leerlingen kiezen een alternatief. Dan volgt een simpele en heel acceptabele uitleg van wat kwantisatie betekent.
Uittree-energie	Tenslotte worden grafieken voor verschillende metalen gepresenteerd met verschillende Uittree energieën.
Na de online les	Het kwantisatie idee dringt in de online les nog onvoldoende door net als dat het door Nobelprijs winnende fysici als Bohr en Millikan lang niet geaccepteerd werd. Dus in een klas discussie de vragen: a) wat wordt met kwantisatie bedoeld? b) Wat is kwantisatie van EM straling? c) waarom kun je het foto-elektrisch effect zien als bewijs voor kwantisatie van straling? D) wat voor andere bewijzen zijn er voor kwantisatie van EM straling? (Compton en omgekeerd ook het golfkarakter van deeltjes zoals elektronen diffractie).

Na de verkenning **onderzoeken leerlingen systematisch (tabbladen verkennen 2.0 en 3.0)** de rol van intensiteit (I) en frequentie (f). Ze houden eerst de frequentie constant en meten bij verschillende

intensiteiten het aantal vrijgekomen elektronen (N_e). Vervolgens meten ze bij constante intensiteit en verschillende frequenties de kinetische energie van elektronen ($E_{kin,e}$). Dit resulteert in grafieken van N_e versus I en $E_{kin,e}$ versus f . Voordat ze gaan “meten” formuleren leerlingen hun verwachtingen met de volgende instructies:

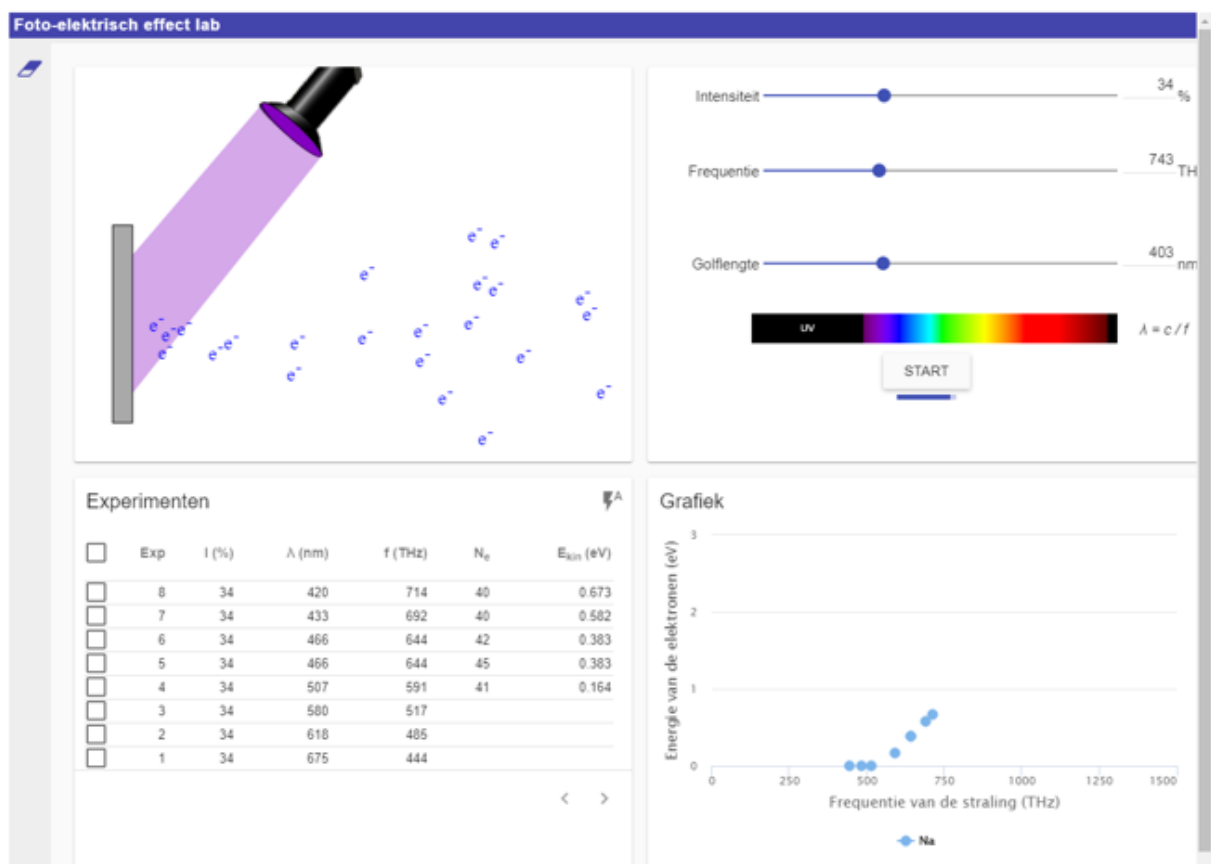
Hoe denk je dat de frequentie van de straling het foto-elektrisch effect beïnvloedt?

Voorbeelden van (niet per se juiste) antwoorden:

- “Hoe hoger de frequentie, hoe sneller de elektronen.”
- “Als de frequentie zeer hoog is, worden elektronen uitgezonden.”
- “Als de frequentie toeneemt, worden meer elektronen uitgezonden.”

Leerlingen zien bovenstaande voorbeelden en formuleren dan hun eigen verwachting. Ze doen de metingen en produceren de grafieken en formuleren de conclusies. Dan volgt een aantal ja/nee vragen om de leerlingen nu echt bewust te maken van wat ze wel en niet hebben gevonden in de simulatie. Bijvoorbeeld: *Voor elke frequentiewaarde worden elektronen uitgezonden (juist/onjuist) of Als de frequentie toeneemt, worden meer elektronen uitgezonden (juist/onjuist).*

Tenslotte gaan de leerlingen terug naar de hoofdvraag en de cartoon van figuur 2 met de vraag waarom de drie antwoorden fout zijn.



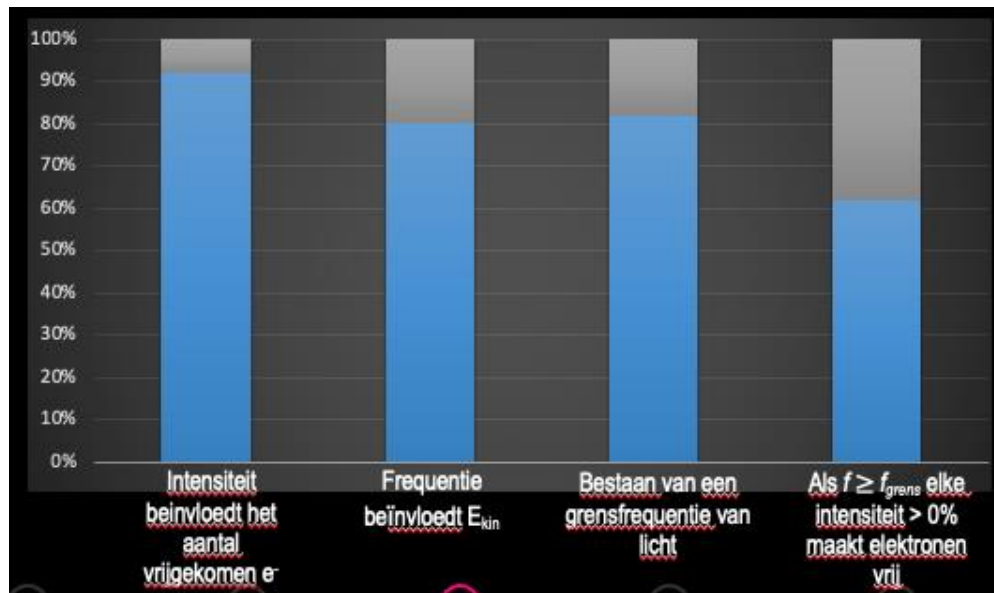
Figuur 3 Simpele bediening van de simulatie. In een andere versie kan het metaal gekozen worden. Na ‘start’ zie je al of niet elektronen verschijnen en aantallen en kinetische energie worden gemeten en verschijnen in tabel en grafiek.

De theorie wordt uitgelegd in een YouTube video en de vraag ‘*onder welke omstandigheden treedt het foto-elektrisch effect op?*’ wordt beantwoord in een poster. Vervolgens gaat de les dieper in op

het begrip uittree energie en de invloed van het soort metaal, o.a. met een stukje video. Tenslotte volgen uitleg en vragen over kwantisatie.

Het voordeel van onze digitale les over een practicum met de PhET simulatie is dat alle lescomponenten geïntegreerd zijn en dat het lesmateriaal discussie uitlokt in duo's en trio's. Onze simulatie bevat geen schakeling met remspanning, want dat leidt af van het basisverschijnsel en bovendien vereist de huidige syllabus het niet.

Resultaten



Figuur 4 Resultaten van meerkeuzevragen aan het eind van de les

Veel leerlingen (80% uit 4 klassen van verschillende scholen) komen dicht in de buurt van de wet van het foto-elektrisch effect met correcte formulering van een grenswaarde voor de frequentie, toenemende energie van vrijgekomen elektronen bij hogere frequentie en toenemend aantal vrijgekomen elektronen met hogere intensiteit mits de frequentie boven de grenswaarde is. Op een open vraag over *waarom verklaart het deeltjesmodel van licht het foto-elektrisch effect?* Wordt vaak oppervlakkig geantwoord:

- “Licht heeft andere eigenschappen dan golven”;
- “Als fotonen deeltjes zijn, dan kunnen ze elektronen vrij maken van de plaat”

Dat het foto-elektrisch effect bewijs is voor kwantisatie van stralingsenergie, dat ontgaat veel leerlingen en dat vinden wij nu net het belangrijkste. Maar ze zijn in goed gezelschap, want zelfs Bohr geloofde in 1923 nog niet in stralingspakketjes (Pais, 1993). Docenten pakken juist dit op in de discussie na de digitale les. Zie de literatuur hieronder voor een overzicht van de geschiedenis van het foto-elektrisch effect.

Noten

De auteurs danken de leden van het UTwente quantum docententeam Benno Berendsen, Patrick Diepenbroek, Renske Koning, Kim Krijtenburg-Lewerissa, Aernout van Rossum.

Literatuur

- Berg, E. van den (2020). De Geschiedenis van het foto-elektrisch effect is een kans voor onderwijs. *NVOX*, 45(7), 354-355.
- Niaz, M., Klassen, S., McMillan, B., Metz, D. (2010). Reconstruction of the History of the Photoelectric Effect and Its Implications for General Physics Textbooks. *Science Education*, 94(5), 903-931.
- Holton, G., Brush, S.G. (2001). *Physics the Human Adventure: from Copernicus to Einstein and Beyond*. Rutgers University Press.
- Klassen, S. (2011). The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom. *Science & Education*, 20 (7-8), 719-731.
- Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord. The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press.
- Pais, A. (1993). *Niels Bohr's times. In Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford University Press.