

Perspectieven op de quantumwereld

Keuzelezing WND 2019 Hans van Bemmelen

Schets van probleem en van oplossing

- Veel leerlingen hebben de vraag: *Waarom* moet ik dit leren?
(niet *alle* leerlingen, sommigen beginnen met *Wat* moet ik leren?)
- Verschillende antwoorden voor toekomstige journalisten, politici, artsen, ingenieurs, natuurkundigen.
- Parallel geschakelde ingangen leveren samen minder weerstand tegen leren op dan elk van die ingangen afzonderlijk.
- Differentiatie mogelijk, maar ik mik in dit geval lager: variatie.

Particles and Waves

$U^\dagger(\epsilon) U(\epsilon) = 1$
 $U(0) = 1$

$E_x = S_m(z - ct)$

More on Entanglement

$\psi(x) = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} (-i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial x})$

$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \frac{d}{dt} \langle x \rangle = \frac{\langle p \rangle}{m}$

$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{iEt} + e^{-iEt}) (e^{iE_1 t} + e^{iE_2 t})$

Combining Systems Entanglement

Quantum Mechanics
 The Theoretical Minimum

The writing is fresh and immediate, crisp and satisfying...
 A persuasive overview' *Nature*

certainty and Time Dependence

e^{-x^2}

$e^{ikx} f(x)$

$\frac{1}{\sqrt{2}} (e^{iEt} + e^{-iEt}) (e^{iE_1 t} + e^{iE_2 t})$

Leonard Susskind & Art Friedman

'His best book yet' John Gribbin

THE QUANTUM AGE

HOW THE PHYSICS OF THE VERY SMALL HAS TRANSFORMED OUR LIVES

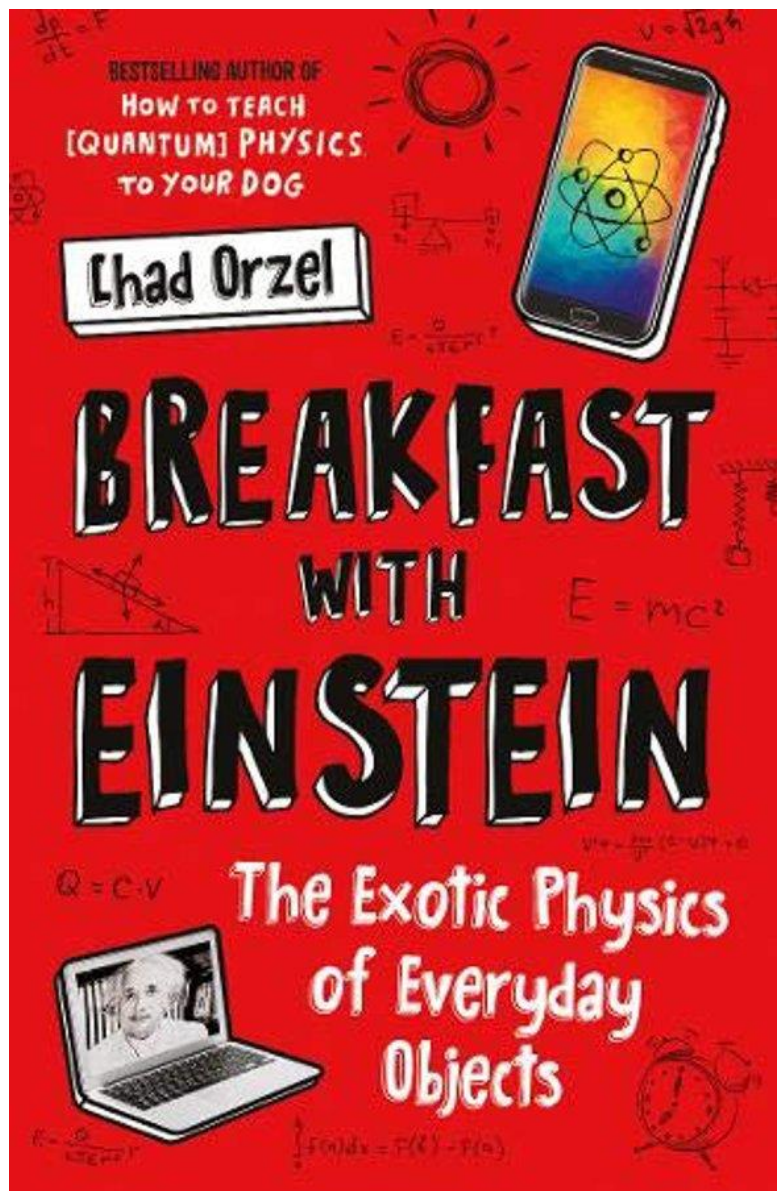
AUTHOR OF THE BESTSELLING *INFLIGHT SCIENCE*
BRIAN CLEGG

"Brilliantly captures the personalities and the science surrounding the most revolutionary principle in modern physics. ... Truly thrilling."
 -WALTER ISAACSON
 AUTHOR OF *Einstein*

UNCERTAINTY

EINSTEIN, HEISENBERG, BOHR, AND THE STRUGGLE FOR THE SOUL OF SCIENCE

DAVID LINDLEY



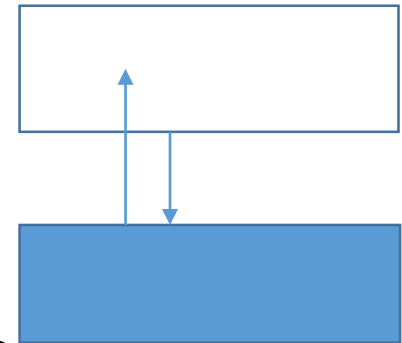
Stelling: De Quantumwereld kun je bekijken vanuit theorie, experiment, techniek, dagelijks leven, maatschappij, filosofie...

Misconcept: De quantumwereld is een heel wiskundige wereld die je alleen via de Schrödingervergelijking kunt benaderen

(Kwamen Lodewijk Koopman en ik tegen in nascholingscursussen die gaven)

Fluorescentie en banden

- Proefje
- Begrijpen van fotonen en energieniveaus
- Wel met blauw licht groene fluorescentie, niet andersom
- Grote quantumdots
- Experimentele vraag: welke wordt (meetbaar?) warmer?
- Blauwe leds
- Niet een curriculum.nu als een bad-eendje



Quantumlesje (2): licht oogsten met laagjes

Inzicht in fotonen

Een zonnecel met recordrendement is niet alleen technisch relevant, maar ook maatschappelijk. Dit lesje begint met een krantenbericht. Je kunt met je klas een model opstellen om te begrijpen wat in dat bericht wordt beweerd. Het draait in dit quantumlesje om redeneren en rekenen, inzicht in quanta en in de manier waarop natuurkundigen denken.

■ Hans van Bommel en Lodewijk Koopman / nascholingsdocenten *Quantumwereld*

Dit stond op 1 oktober 2013 in *de Volkskrant*:

Fraunhofer Institut - In het Duitse Fraunhofer Instituut is een nieuw wereldrecord gevestigd voor het rendement van zonnecellen: liefst 44,7% van het opvallende zonlicht werd daarbij omgezet in elektrische energie. Ter vergelijking: het rendement van 'gewone' moderne PV-cellen ligt rond 17%.

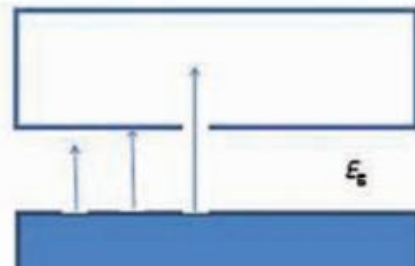
De gebruikte cel is slechts 5,2 mm² groot en bestaat uit vier lagen van verschillende halfgeleidercombinaties. Deze kunnen zonlicht over een breed spectrum van golflengtes omzetten, van UV t/m infrarood.

Waarom kun je met een gelaagde zonnecel een hoger rendement halen dan met een enkele laag?

Een natuurkundige wil eerst kwalitatief inzicht krijgen en daarna getallen produceren. Dat is de volgorde.

giewaarden wordt daarom de 'kloof' (Engels: 'gap') genoemd. De oorzaak van deze mogelijkheden en onmogelijkheden ligt in het opsluiten van quantumdeeltjes, die een golfkarakter hebben. Hoe dit werkt, komt in een lesje later in deze reeks. Op dit moment is de aanpak zoals in het oude programma: het energieniveauschema wordt beschouwd als een gegeven. Voor een halfgeleider staat het weergegeven in figuur 1.

- De energie van het elektromagnetisch veld wordt geabsorbeerd en geëmitteerd in pakketjes (quanta, lichtdeeltjes, fotonen) met energie $E = h \cdot f$. Dit lesje is vooral bedoeld ter verkrijging van inzicht in deze relatie.



Als een foton op dit materiaal valt, zijn er drie mogelijkheden, gevisualiseerd door drie pijlen in figuur 1:

$E_{\text{foton}} < E_g$ Het foton wordt niet geabsorbeerd.

$E_{\text{foton}} = E_g$ Het foton wordt geabsorbeerd door een elektron. Het elektron bevindt zich daarna aan de onderkant van de geleidingsband. De totale energie E_g van het oorspronkelijke foton is beschikbaar als elektrische energie, de zonnecel laat het elektron met deze energie wegstromen naar het systeem dat op deze energie moet werken.

$E_{\text{foton}} > E_g$ Het foton wordt geabsorbeerd en het elektron dat dit doet, komt hoger in de geleidingsband. Er zijn energieniveaus vlak onder waar het elektron is terechtgekomen. Het elektron gaat in kleine stapjes naar die lagere niveaus, er ontstaat warmte. Het elektron bevindt zich uiteindelijk aan de onderkant van de band, de hoeveelheid energie die beschikbaar is als elektrische energie, bedraagt ook nu E_g .

Quantumlesje (3): kleurstoffen en zonnebrandcrème

Opgesloten quantumdeeltjes

Empirische regels over moleculen van kleurstoffen kun je begrijpen in termen van opgesloten quantumdeeltjes. Zo kun je een les over het deeltje-in-een-doosmodel met een toepassingsgerichte kwestie beginnen.

■ **Hans van Bemmelen** en **Lodewijk Koopman** / nascholingsdocenten Quantumwereld

Op Wikipedia vind je informatie over chromoforen, dat zijn delen van moleculen die de kleur van een stof bepalen. In een bepaalde klasse van kleurstoffen

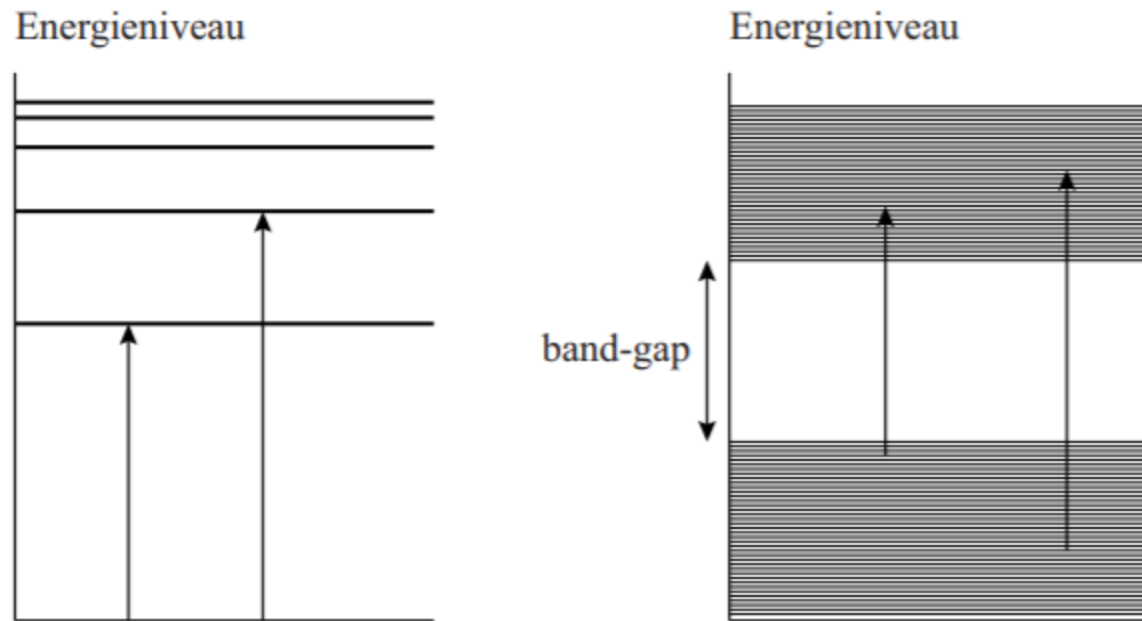
in een hogere energietoestand terecht komt. Kennelijk zorgt het verlengen van de keten in het kleurstofmolecuul ervoor dat de energiesprong die een elektron kan

nen bewegen, maar opgesloten zitten in dat molecuul. Ze bevinden zich dus in een ééndimensionaal doosje.

Om veilig gedurende een langere tijd in de zon te kunnen liggen, kan men zonnebrandcrème op de huid smeren. In zonnebrandcrème zit een stof die fotonen met een bepaalde energie kan absorberen. Deze energie moet overeenkomen met een sprong in het energieniveauschema van de stof.

In figuur 7 staan twee typen energieniveauschema's weergegeven. De linker figuur kent discrete niveaus. De rechterfiguur kent twee groepen met zeer veel energieniveaus dicht op elkaar met daartussen een sprong, de zogenaamde 'band-gap'.

figuur 7



Een stof met een band-gap is beter geschikt voor zonnebrandcrème dan

Uitgewerkte voorbeeldopgave

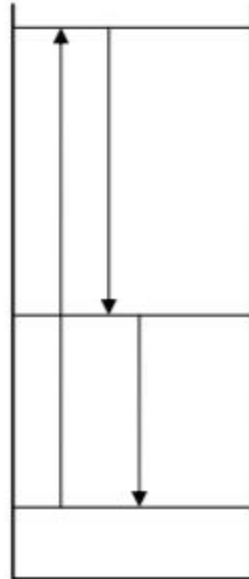
Mooier licht met Quantum Dots

Het Amerikaanse bedrijf QD Vision maakt een product dat het licht van een LED-lamp meer laat lijken op het licht van een gloeilamp. Dat ervaren mensen als prettiger, en het geheel is net zo energiezuinig als een LED-lamp. Het product is een plaatje met quantumdots, dat voor een LED-lamp wordt geplaatst. We bekijken in een eenvoudig model de manier waarop quantumdots het licht beïnvloeden.

Een quantumdot is een klein stukje geleidend materiaal op een isolerende achtergrond. Veel van de eigenschappen kun je beschrijven met het model van een elektron dat is opgesloten in een doosje. In figuur 4.9 zie je schematisch de energieniveaus van een elektron in een ééndimensionale quantumdot (die is in een richting heel smal en in de andere richting langer).

De witte stippelijijn in figuur 4.10 geeft aan hoeveel licht van elke golflengte in gewoon LED-licht zit. De hoeveelheid blauw licht is te groot, in natuurlijk licht zit minder blauw en meer rood. Een quantumdot moet blauw licht absorberen en het licht bij grotere golflengtes weer uitzenden.

We bekijken of het volgende scenario kan kloppen: De absorptie van blauw licht komt overeen met een overgang van de grondtoestand naar de tweede aangeslagen toestand, waarna de energie als twee fotonen weer wordt uitgezonden: één horend bij de overgang van de tweede aangeslagen toestand naar de eerste aangeslagen toestand, en één foton horend bij de overgang van de eerste aangeslagen toestand naar de grondtoestand.



Figuur 4.9 Energieniveaus en overgangen



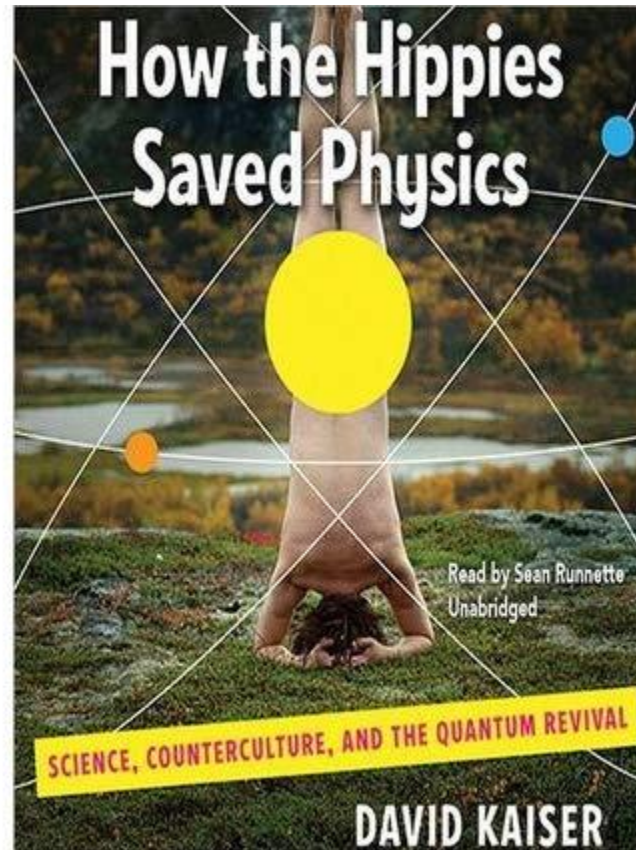
Quantumkwal



Nog een Nobelprijs

- aan Isamu Akasaki, Hiroshi Amano and Shuji Nakamura “for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources”.
- Quantumkleuren, NVOX

Leerling Manchu



Slot

- Fluorescentiechirurgie
- Boek *Wat is echt de moeite waard om te onderwijzen? Een perspectiefgerichte benadering*
- Ons vak is allesbehalve saai!
- Dank voor de aandacht.