

# Experimenten bij Quantumwereld

2e prijs DBK 2011



UNIVERSITEIT TWENTE <sup>50</sup>

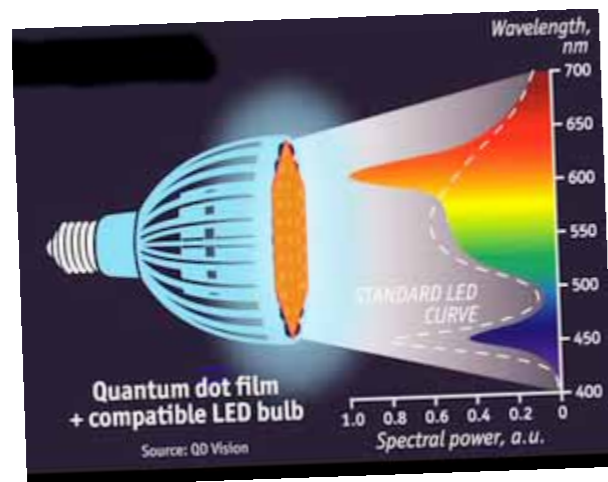
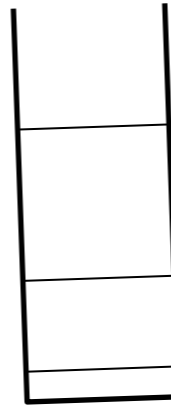
Woudschoten Natuurkunde Didactiek conferentie  
zaterdag 17 december 2011  
[aernout@voetenwerk.org](mailto:aernout@voetenwerk.org)

Aernout van Rossum

Universiteit Twente / De Driemark Winterswijk



# Quantumwereld



6 VWO



Onderwerpen:

1. foto-elektrisch effect
2. golf-deeltjesdualiteit
3. tunneling
4. deeltje in een doosje

# Foto-electrisch effect

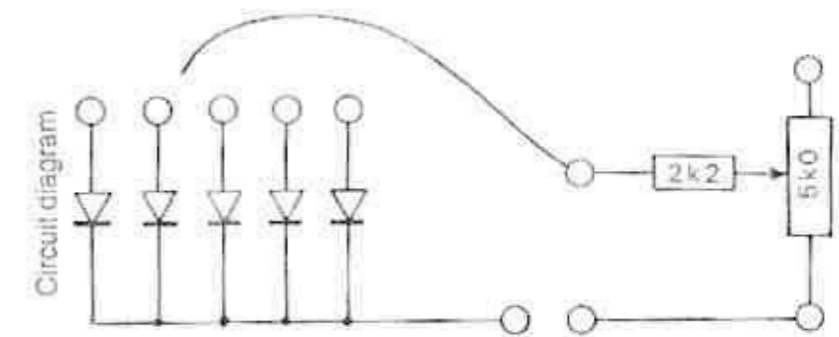
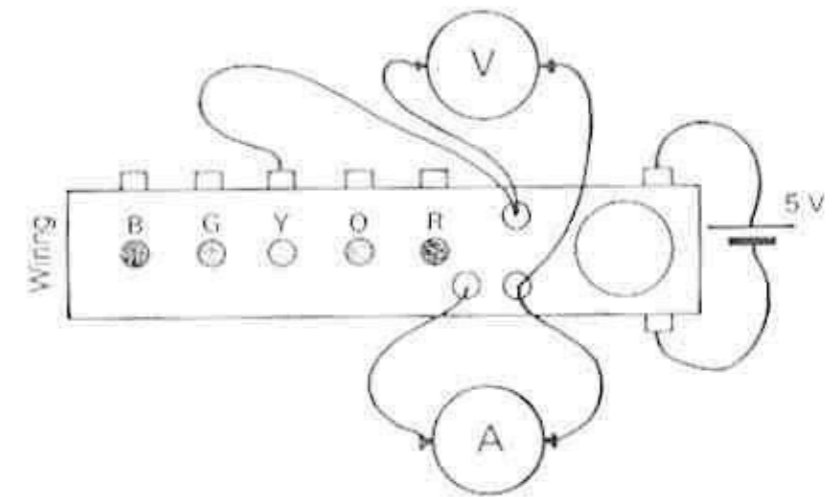
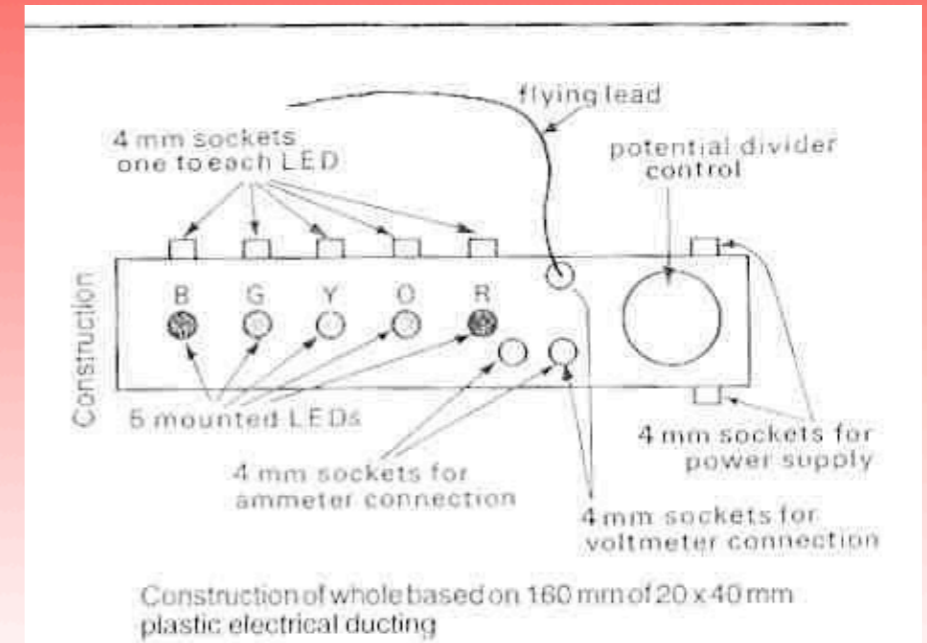
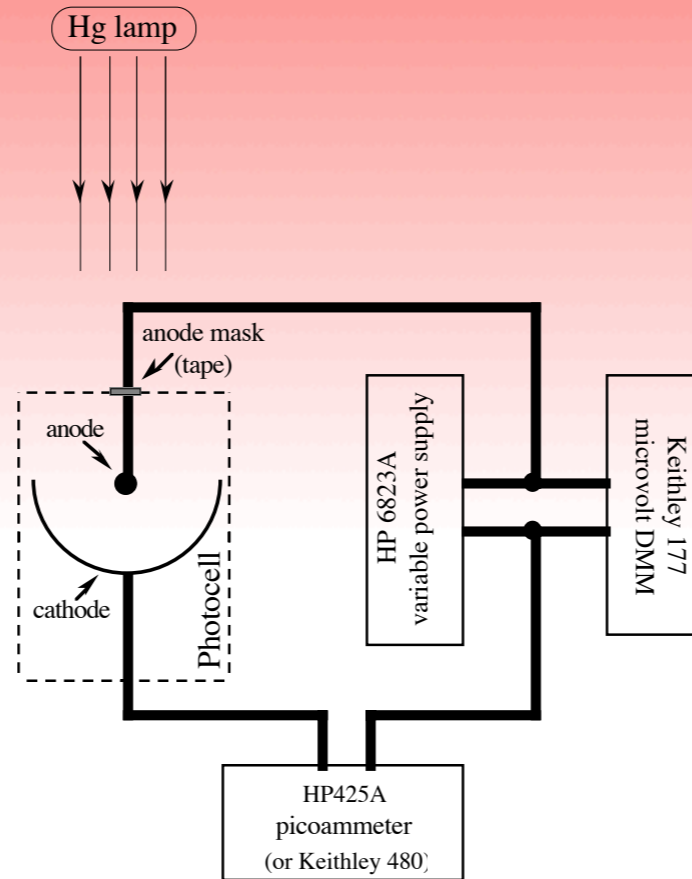
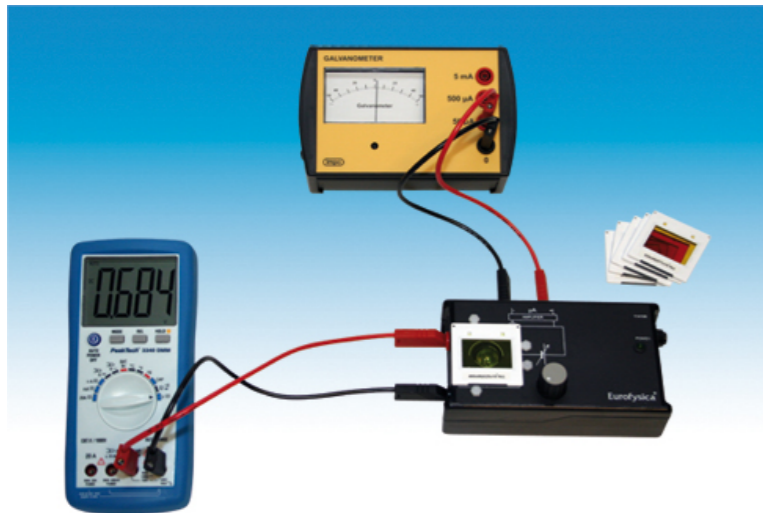


Figure 1 Multiple LEDs for  $h$



# tunneling

# Scanning Tunneling Microscope

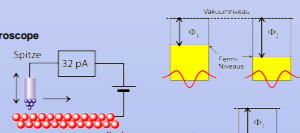
## Kann man Atome anfassen?

Das LEGO-Probiermikroskop als Modell eines Rastertunnelmikroskops

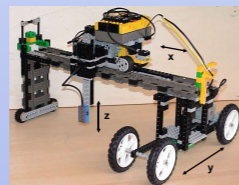
Prof. Dr. Michael Wülker

Fachhochschule Offenburg, Fachbereich Maschinenbau, Badstr. 24, 77652 Offenburg, Tel.: 0781/205-257, Fax: 0781/205-242 e-mail: wuelker@fh-offenburg.de, Internet: http://mv-sirius.m.fh-offenburg.de/Robotik

**Forscher:**  
"... mit dem Rastertunnelmikroskop"  
STM = Scanning Tunneling Microscope

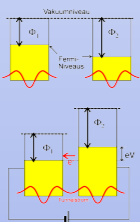


**Schüler:**  
"... mit dem LEGO-Probiermikroskop"  
LPM = LEGO Probe Microscope



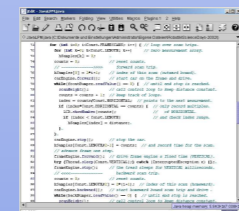
Aufnahme auf einer Erleuchtung bei Prof. Dr. R. Müller, Universität Essen  
www.fh-offenburg.de/robotik/robotik/lepmikroskop.html

**Forscher:**  
Legt man eine geringe Spannung (mV bis 3 V) zwischen einer Materialprobe und einer sehr kleinen Metallspitze, die sich ganz nahe an der Probe befindet, so fließt ein winziger Tunnelstrom (pA bis nA; 1 pA ist 1/1000000000000 Ampere). Der Tunnelstrom entsteht, da Elektronen die Energiebarriere zwischen Probe und Metallspitze mit einer geringen Wahrscheinlichkeit "untertunneln". Der Tunnelstrom I hängt dabei sehr stark vom Abstand d zwischen Probe und Metallspitze ab ( $I \propto \text{const.} \cdot \exp(-2 \cdot K \cdot d)$ ).



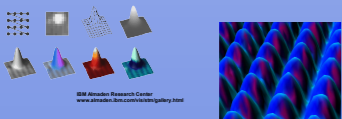
**Schüler:**  
Lässt man das Licht eines Lichtsensors des LEGO-MINDSTORMS™-Baukastens auf ein weißes Papier scheinen, so misst der Lichtsensor das zurückgeworfene Licht. Der Lichtstrom hängt dabei stark vom Abstand zwischen der Oberfläche und der Lichtsensortippe ab.

**Forscher und Schüler:**  
Man kann die Spitze in festem Abstand über der Oberfläche schweben lassen, indem man den Tunnelstrom/Lichtstrom durch ständige kleine Auf- und Abwärtsbewegungen der Spitze konstant einregelt. Bewegt man nun die Spitze langsam über die Oberfläche der Probe, so folgt sie dem Oberflächenrelief, was über das Regelsignal registriert werden kann.  
Mit einem systematischen Abstrahen (Scannen) in x- und y-Richtung kann die Struktur der Oberfläche abgebildet werden.

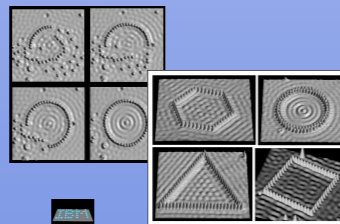
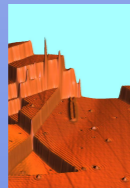


**Schüler:**  
Und die Programmierung war eigentlich gar nicht so schwierig. Das Java-Programm auf dem RCX, der als Firmware "lejos" geladen hat, übersendet die Messwerte an den PC, der mit einem Java-Programm den Abstand von der Oberfläche durch die Grauschattierung darstellt.

**Forscher:**  
... ihm das Programm muss noch dokumentiert werden - und außerdem ist es eigentlich mein Betriebsgeheimnis ...



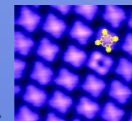
IBM Almaden Research Center  
www.almaden.ibm.com/technology/gallery.html



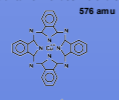
IBM Almaden Research Center  
www.almaden.ibm.com/technology/gallery.html

**Forscher nach Jahren:**  
Das Rastertunnelmikroskop hat die Oberflächenphysik vollkommen verändert. Es kann inzwischen an Luft, im Ultra-Hochvakuum oder auch fast am absoluten Nullpunkt betrieben werden. Die Abbildungen von Atomen, atomaren Kristallstufen, Molekülen sind heute Stand der Technik.  
Zum Rastertunnelmikroskop haben sich viele Varianten hinzugesellt: Das Rasterkraftmikroskop, das Magnetkraftmikroskop, das Rasterrastertunnelmikroskop, das scannende Lichtmikroskop (SNOM), ...  
Es ist z. B. auch gelungen Eisenatome über eine Kupferoberfläche zu "ziehen" und im Kreis anzuordnen. In dem Kreis entsteht dann eine "sichtbare" Elektronenwelle ähnlich einer Wasserwelle nach einem Steinwurf.

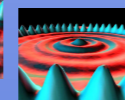
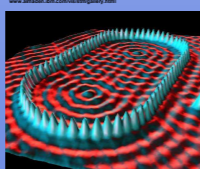
Kupfer-Phthalocyanin-Moleküle auf Ag(111)



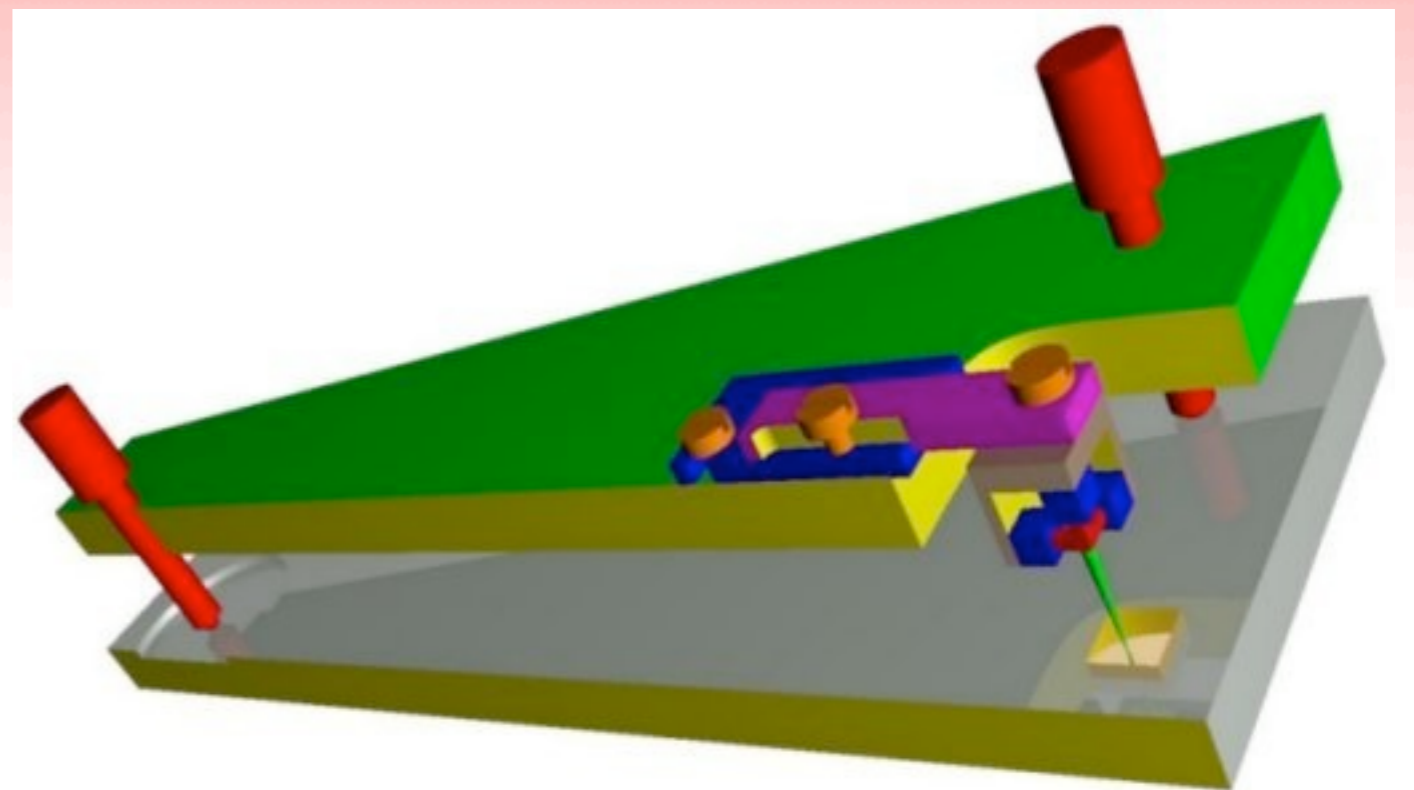
Strukturformel des Moleküls  
576 amu



12 Å



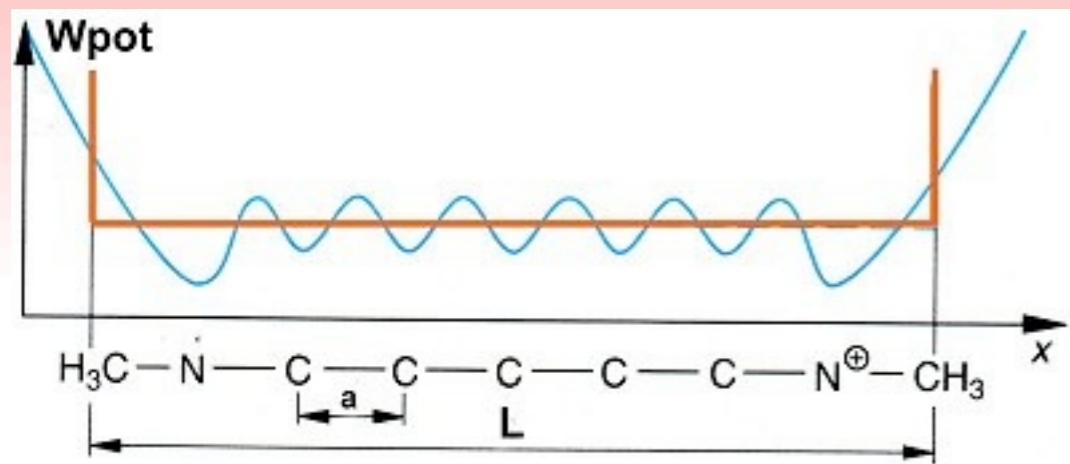
**Schüler:**  
Au ja, au zum Baggersee!



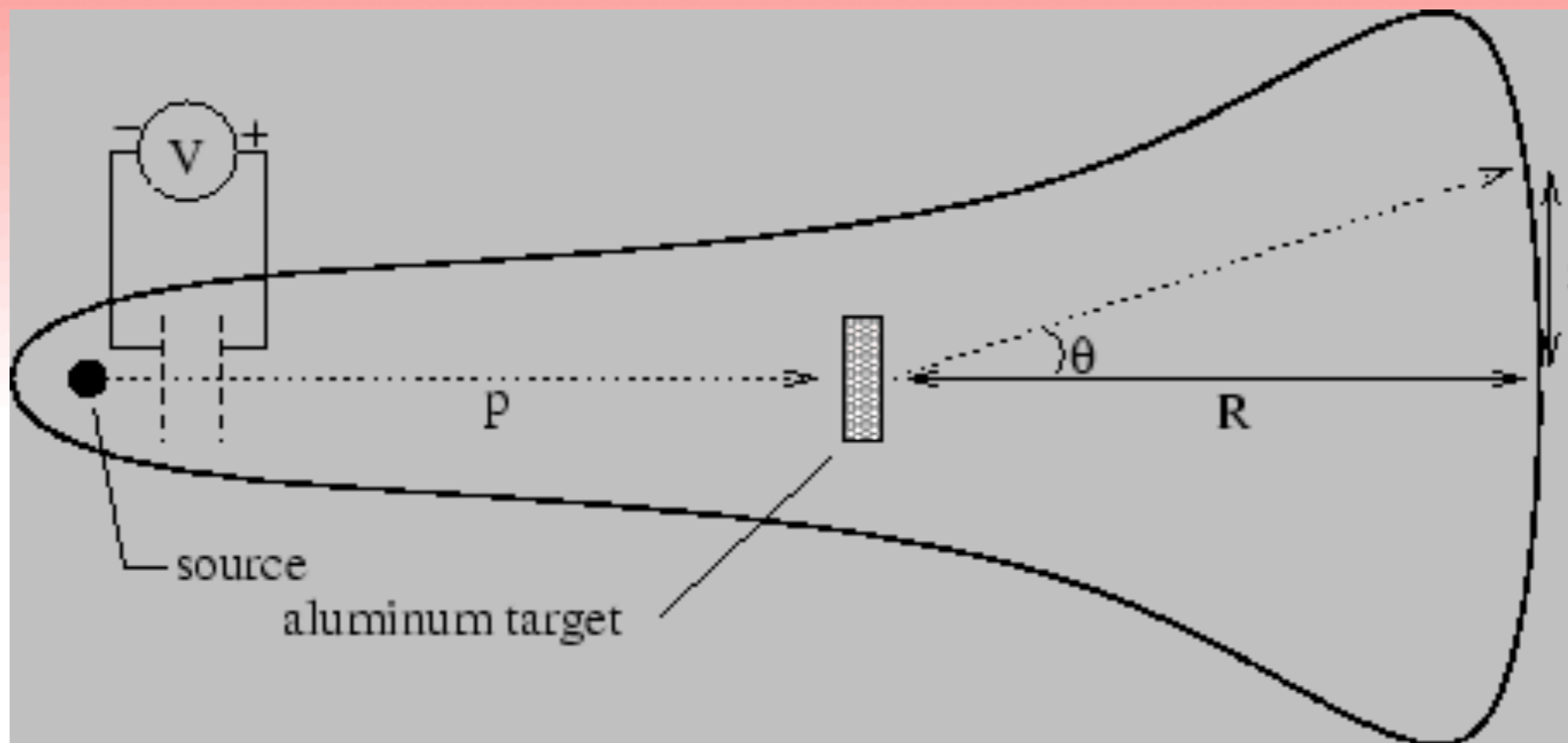
Nanotechnologie

Prof. Dr. R. Müller, Universität Essen  
www.fh-offenburg.de/robotik/robotik/lepmikroskop.html

# Deeltje in een doos Spectraallijnen

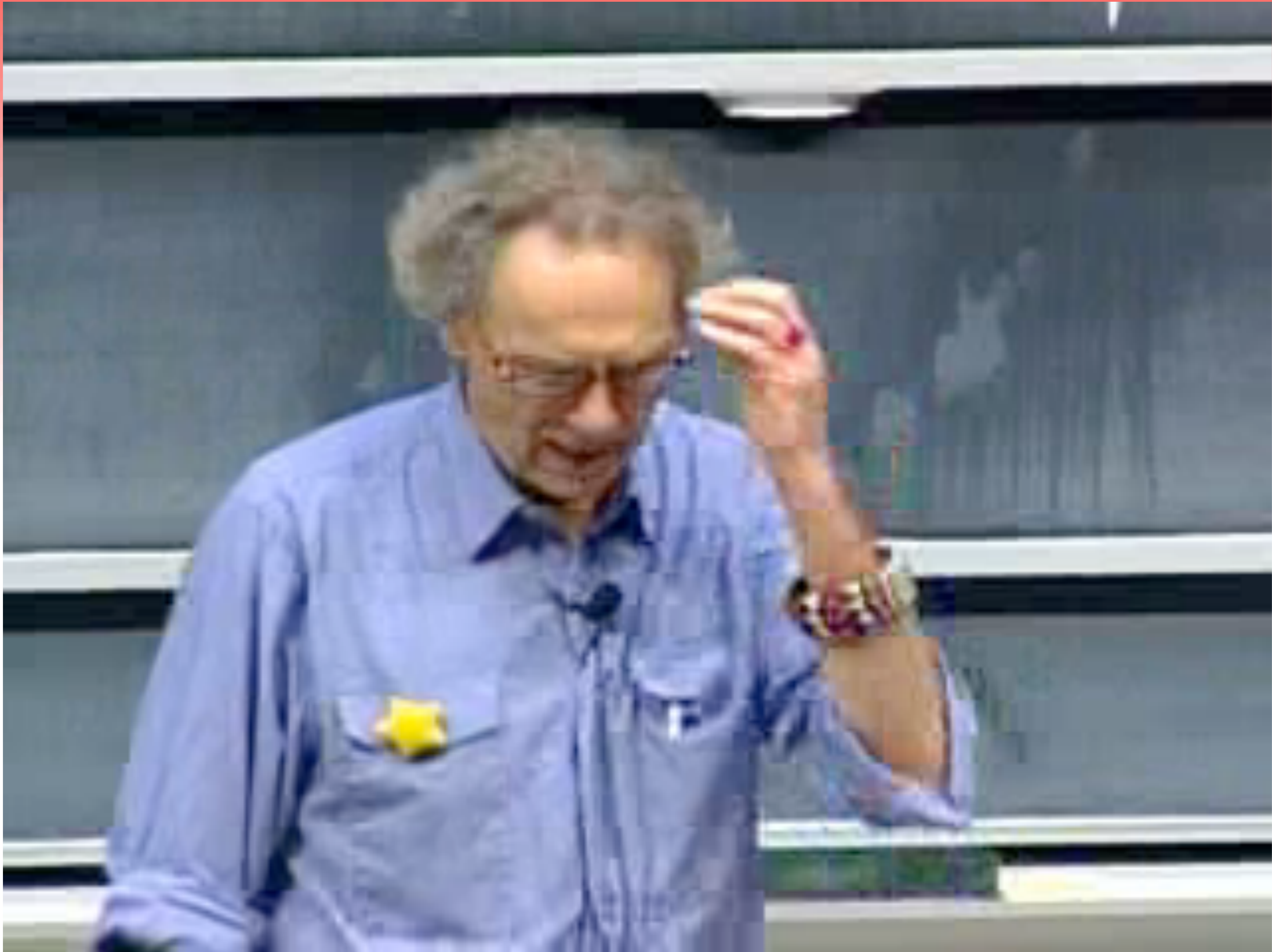


# Electronen diffractie



# Heisenberg onzekerheidsprincipe

# Heisenberg onzekerheidsprincipe





# Golf-deeltjes dualiteit

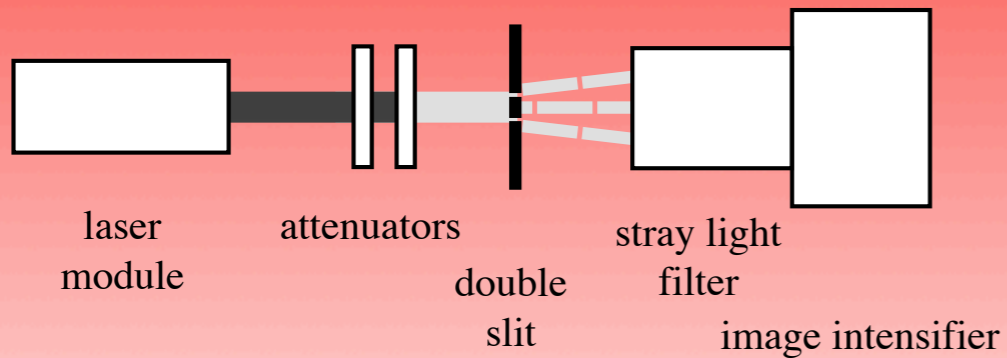


Figure 4. Setup of experiment 3: detecting individual photons in a single-photon diffraction experiment (not to scale)

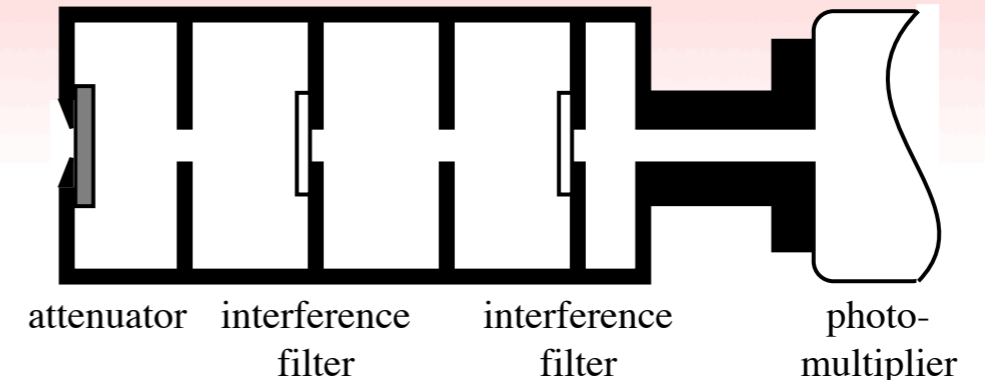
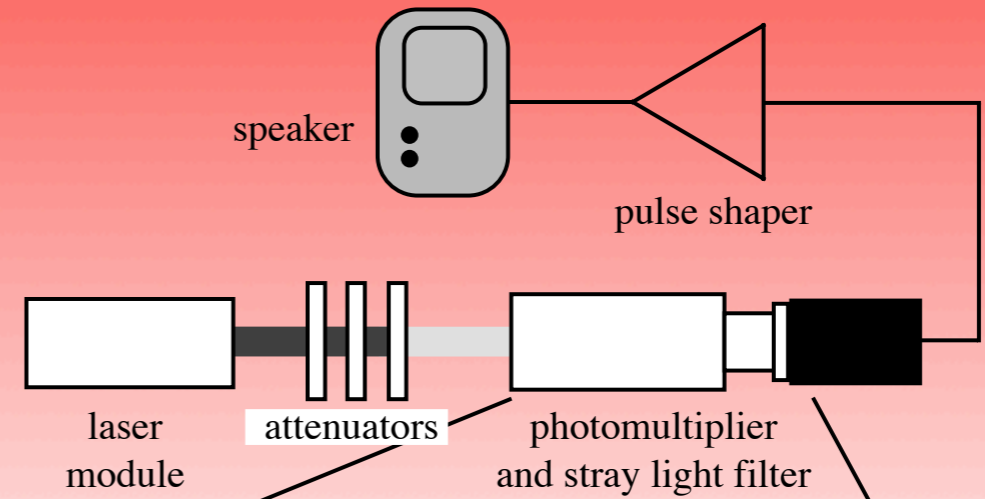


Figure 1. Setup of experiment 1: hearing single photons (not to scale)

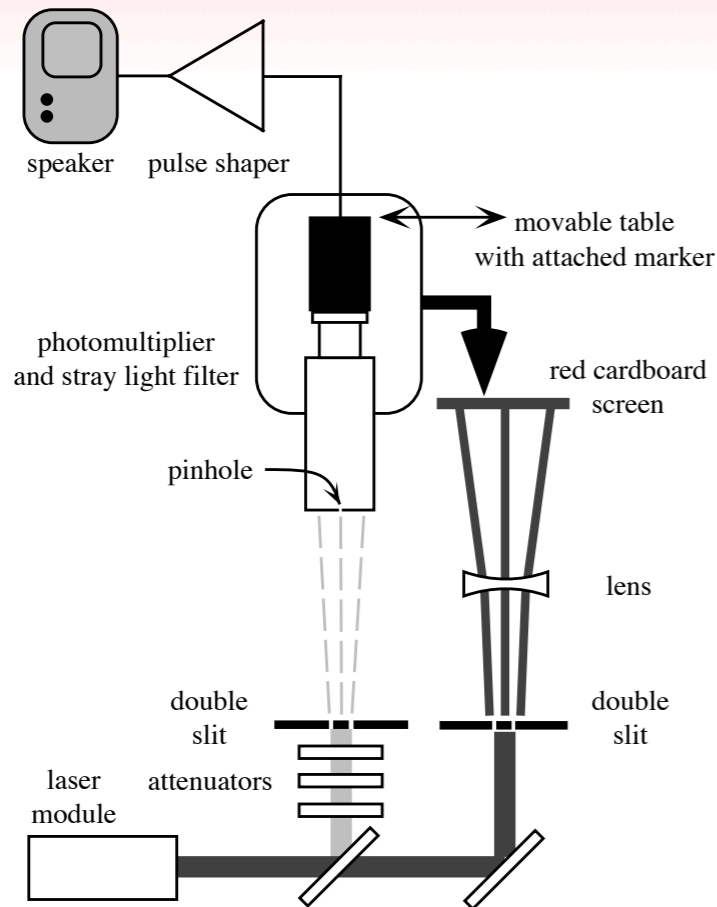
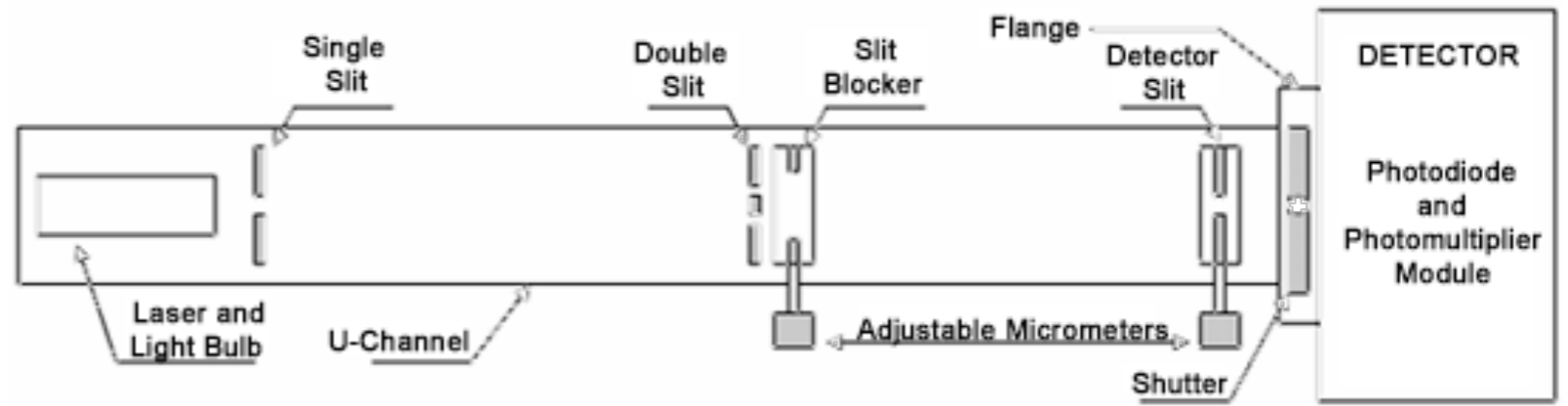


Figure 6. Setup of a low-budget version of the sin-



# Golf-deeltjes dualiteit

[www.quantumlab.de](http://www.quantumlab.de)

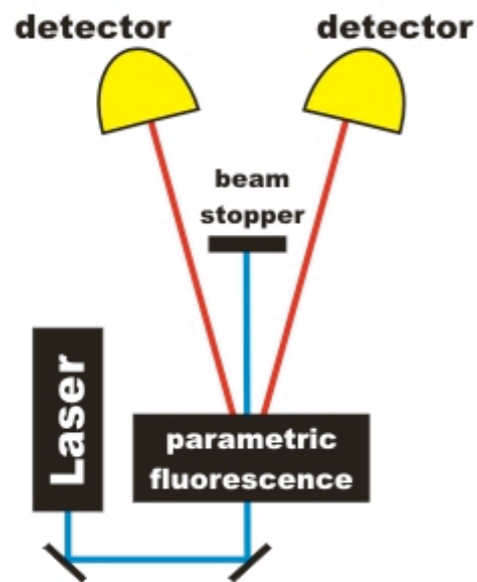
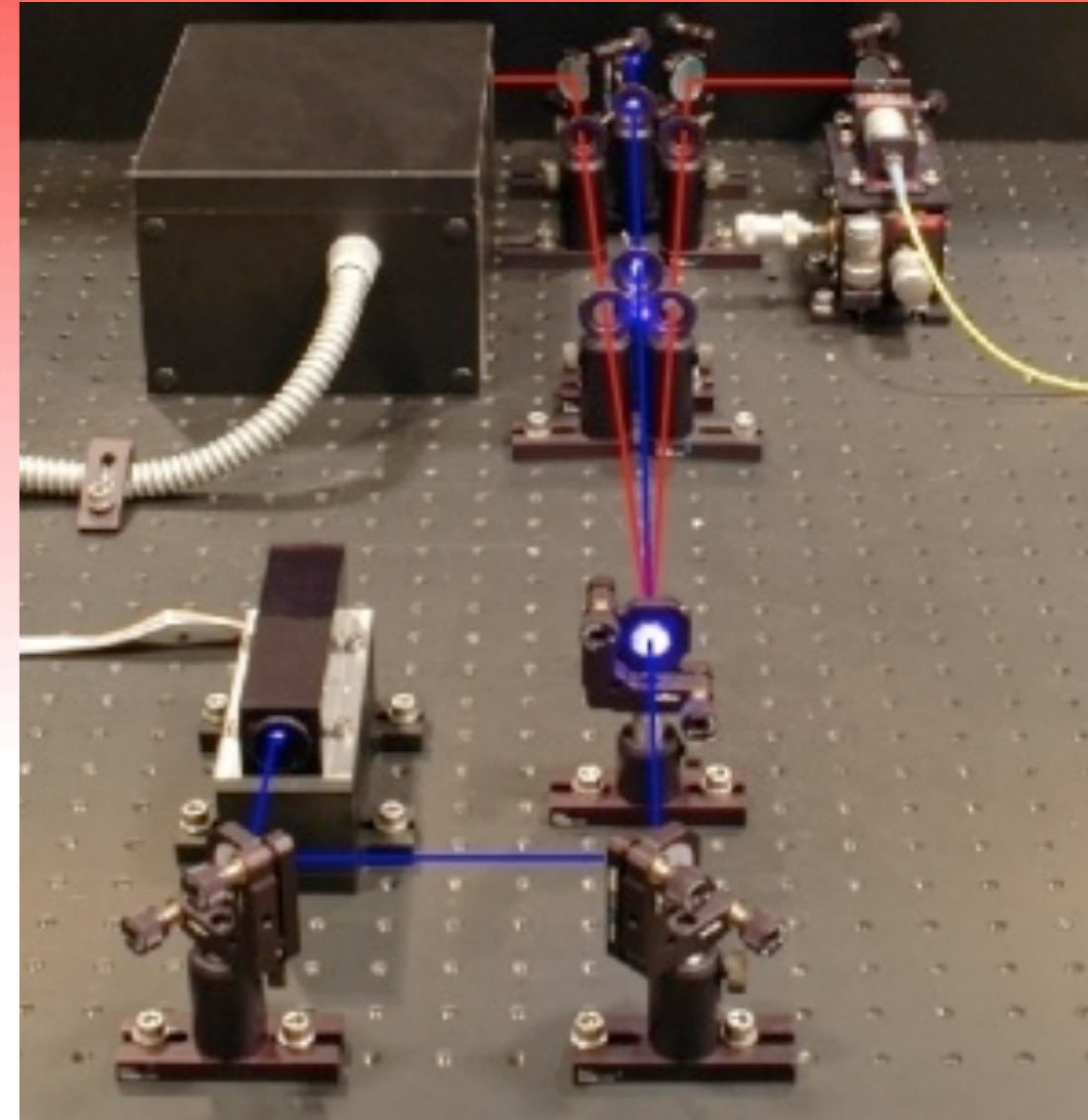
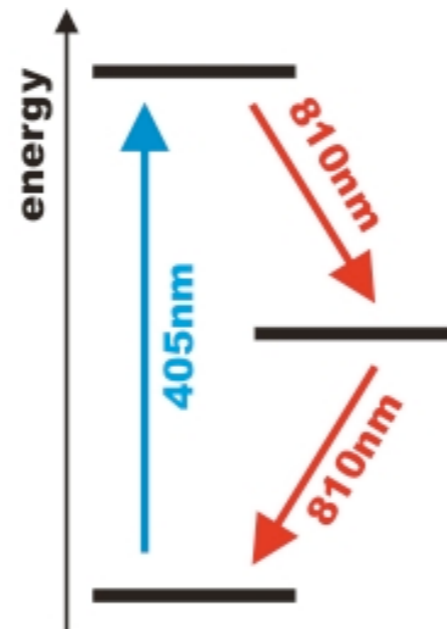


Figure 5: Setup for heralded photons with parametric fluorescence (i. e. PDC)



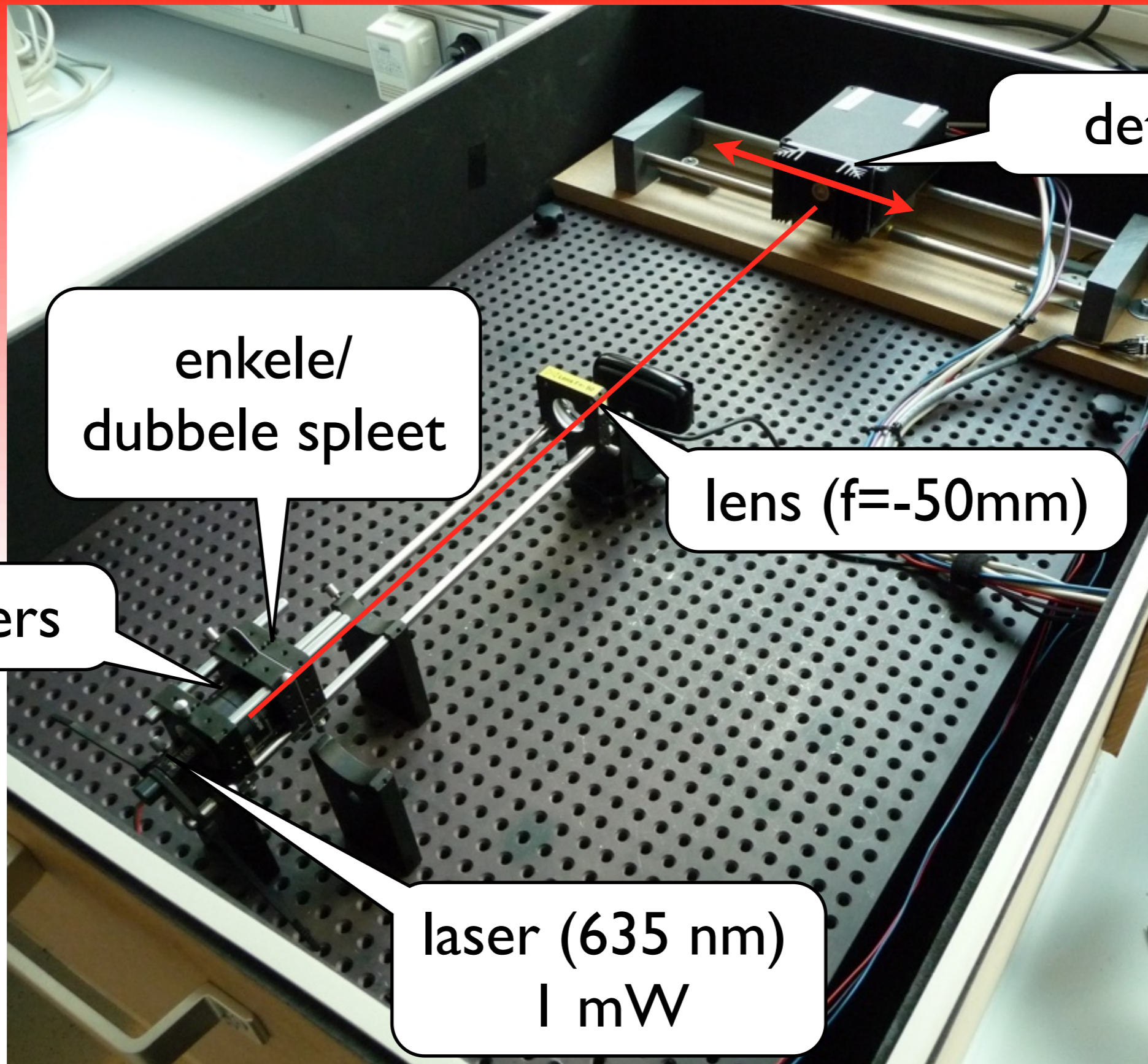
# Ontwikkeling dubbelspleetexperiment met losse fotonen

## De uitdaging:

- didactiek: aan leerlingen de golf-deeltjesdualiteit tonen ter ondersteuning van kennis en begrip; moet realtime en visueel zijn
- techniek: met beperkt budget ontwikkelen van een demonstratie-experiment dat door een middelbare school gemaakt en gebruikt kan worden

## Keuzes in de uitvoering:

- fotonen als quantumdeeltjes
- grijsfilters om lichtbundel af te zwakken
- zelfbouw fotonen detector
- goedkope microprocessors met opensource software



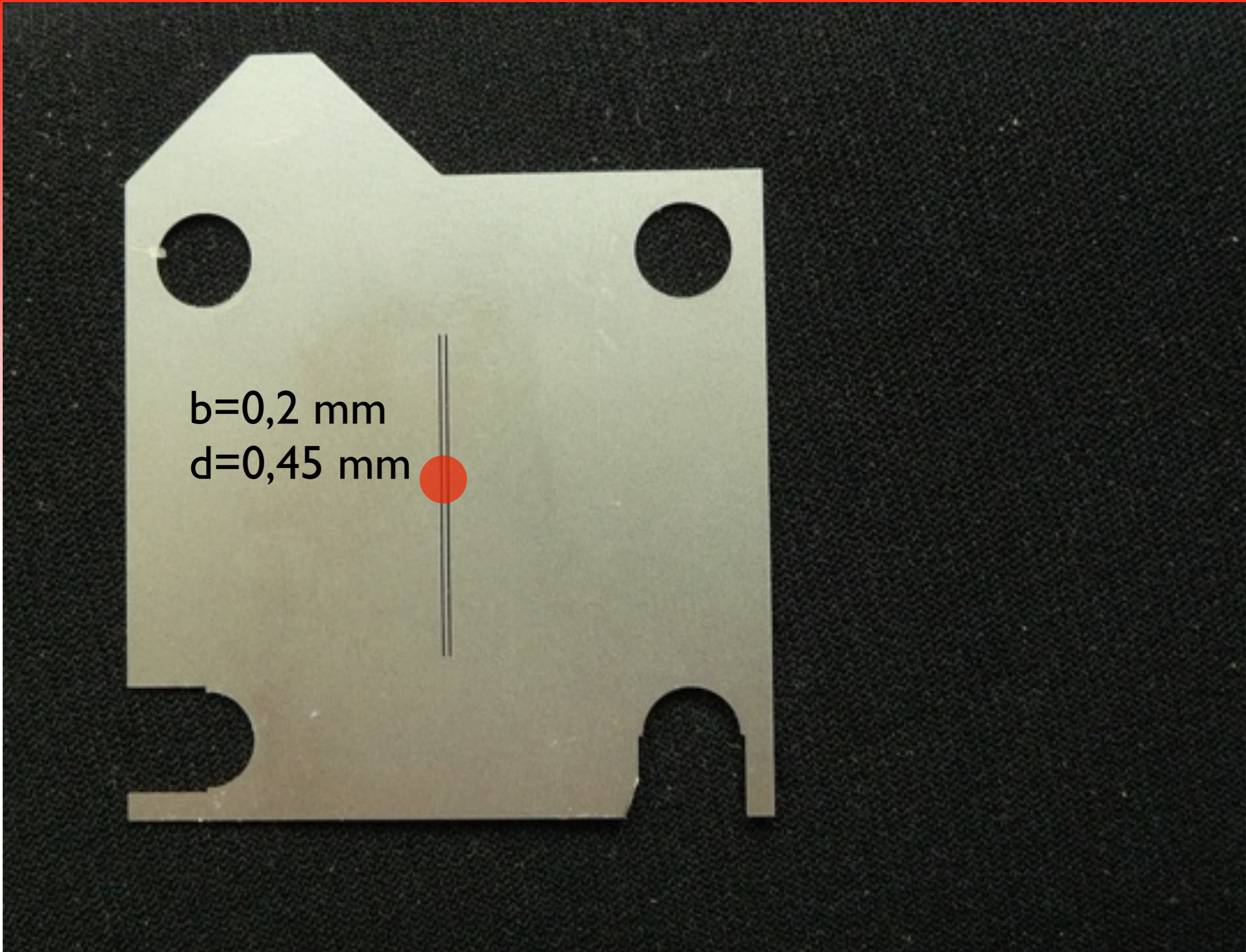
enkele/  
dubbele spleet

detector

grijsfilters

lens ( $f=-50\text{mm}$ )

laser (635 nm)  
1 mW

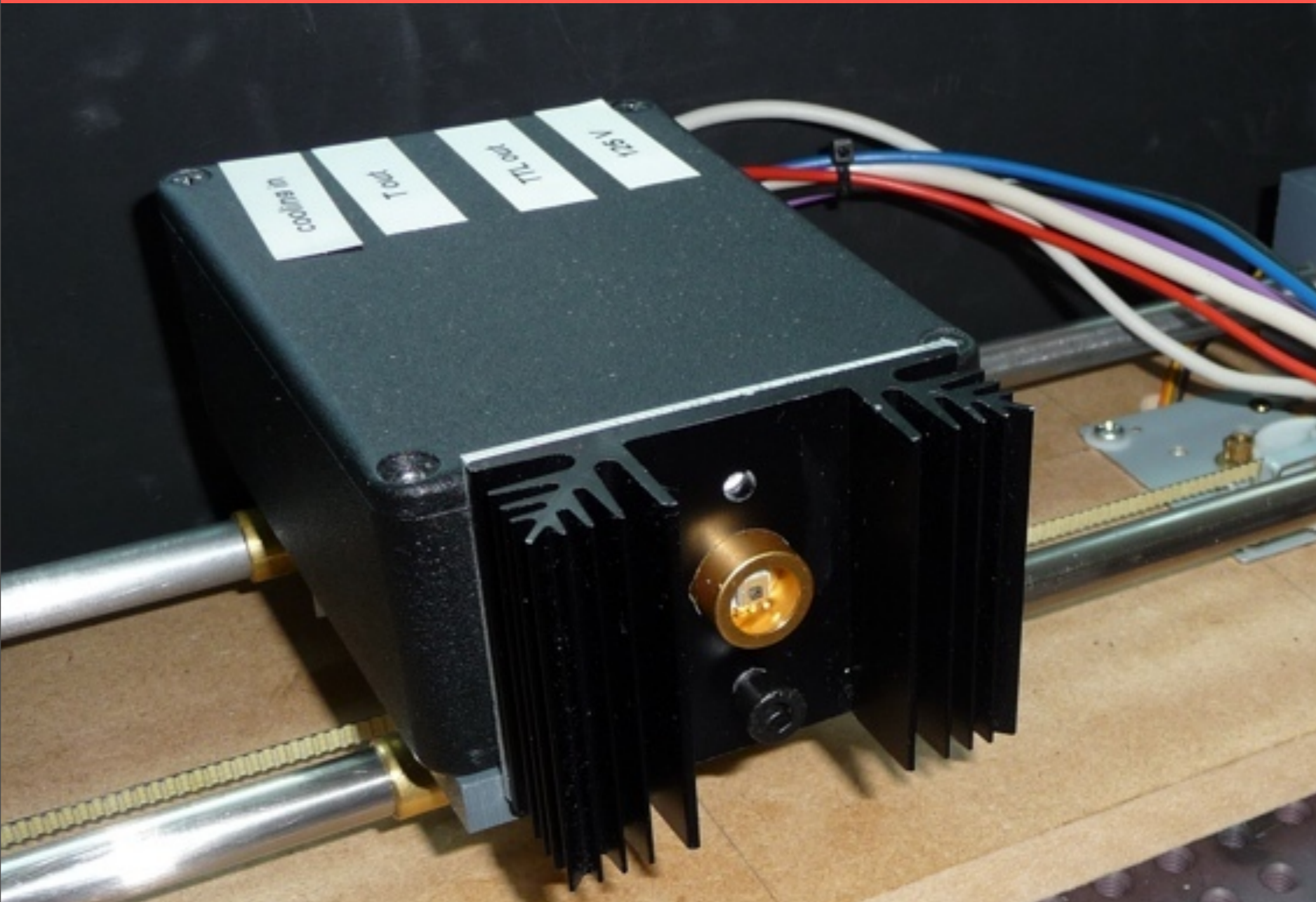


$b=0,2 \text{ mm}$

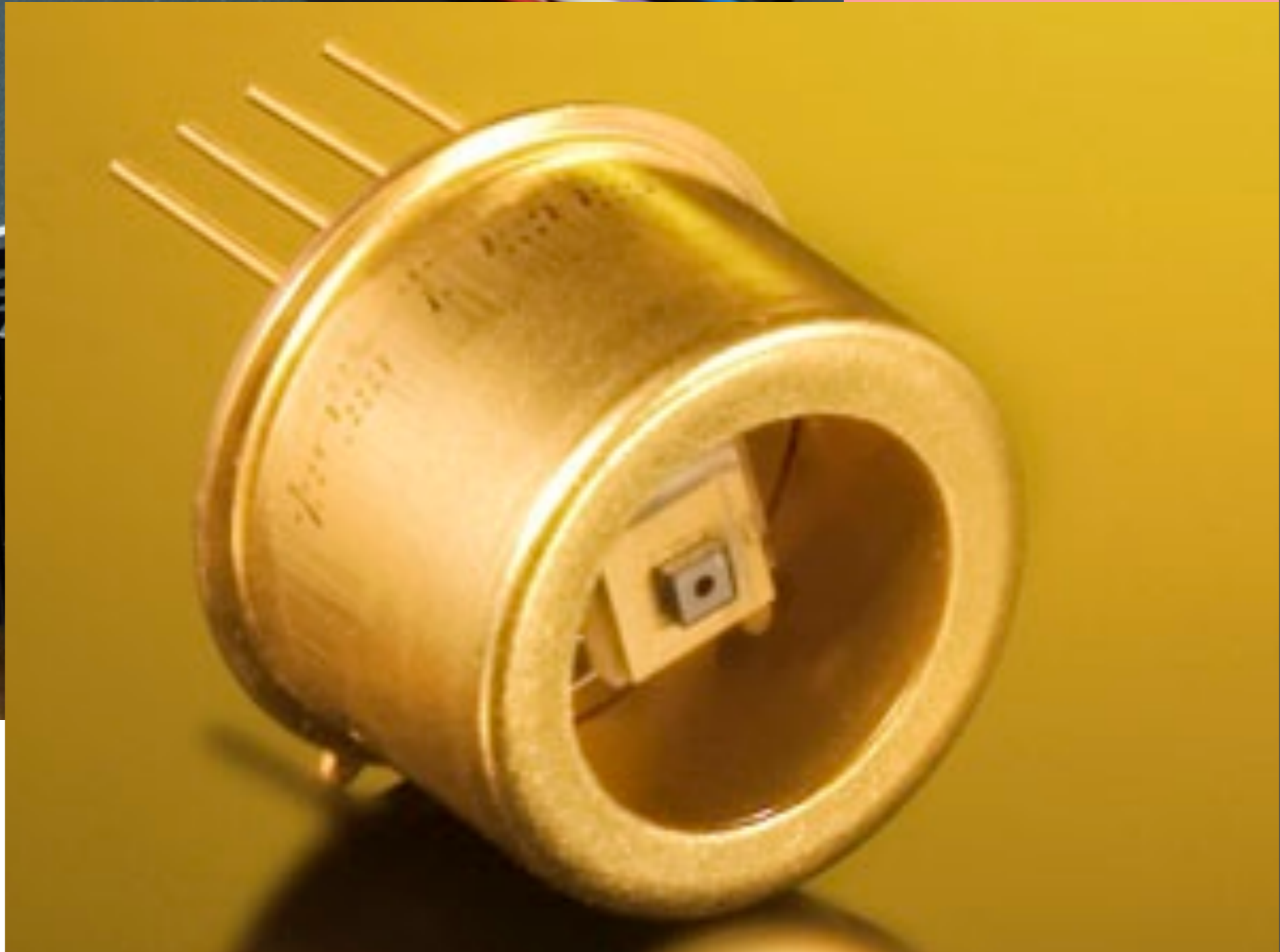
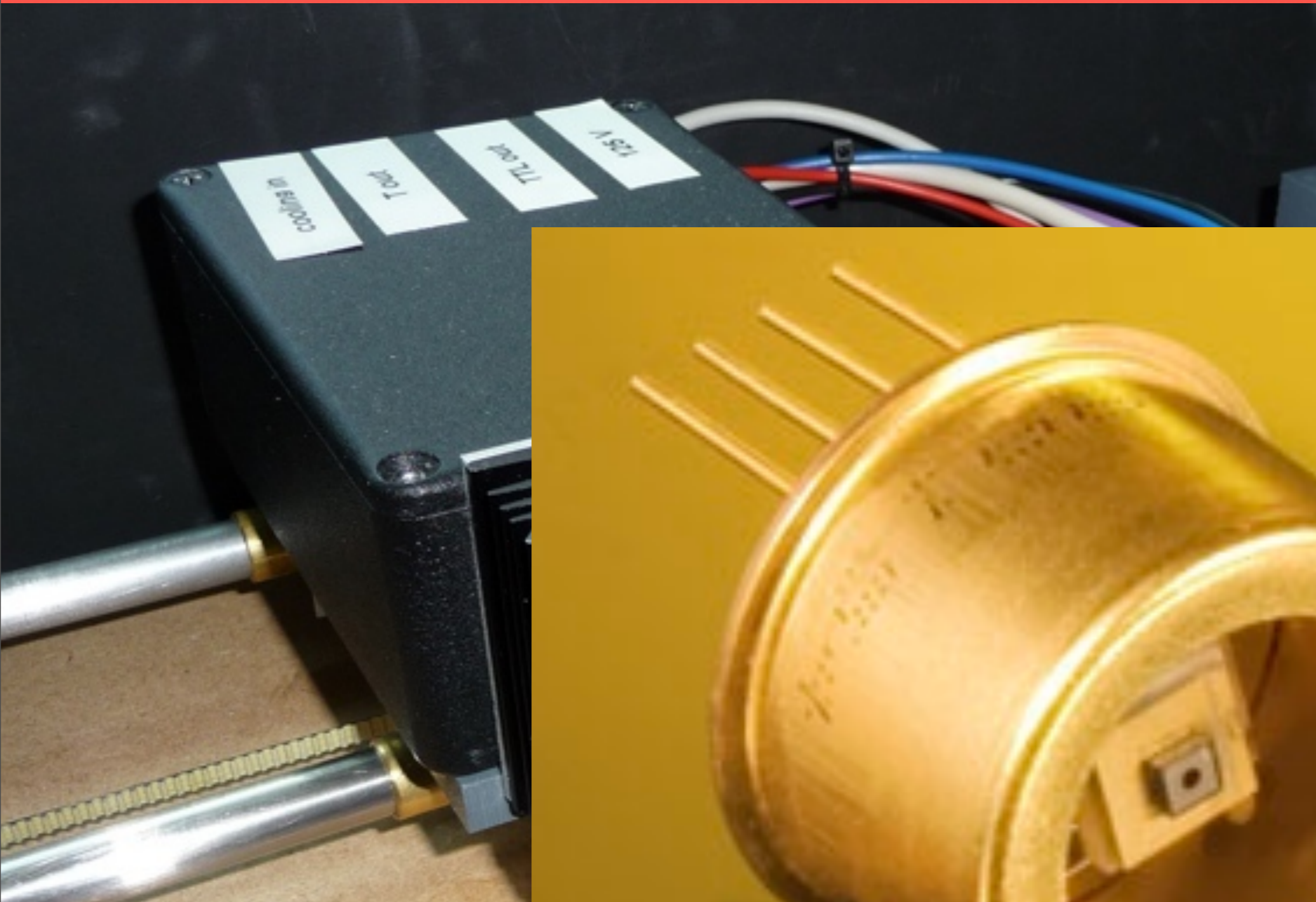
$d=0,45 \text{ mm}$



# Geigerteller voor fotonen: APD

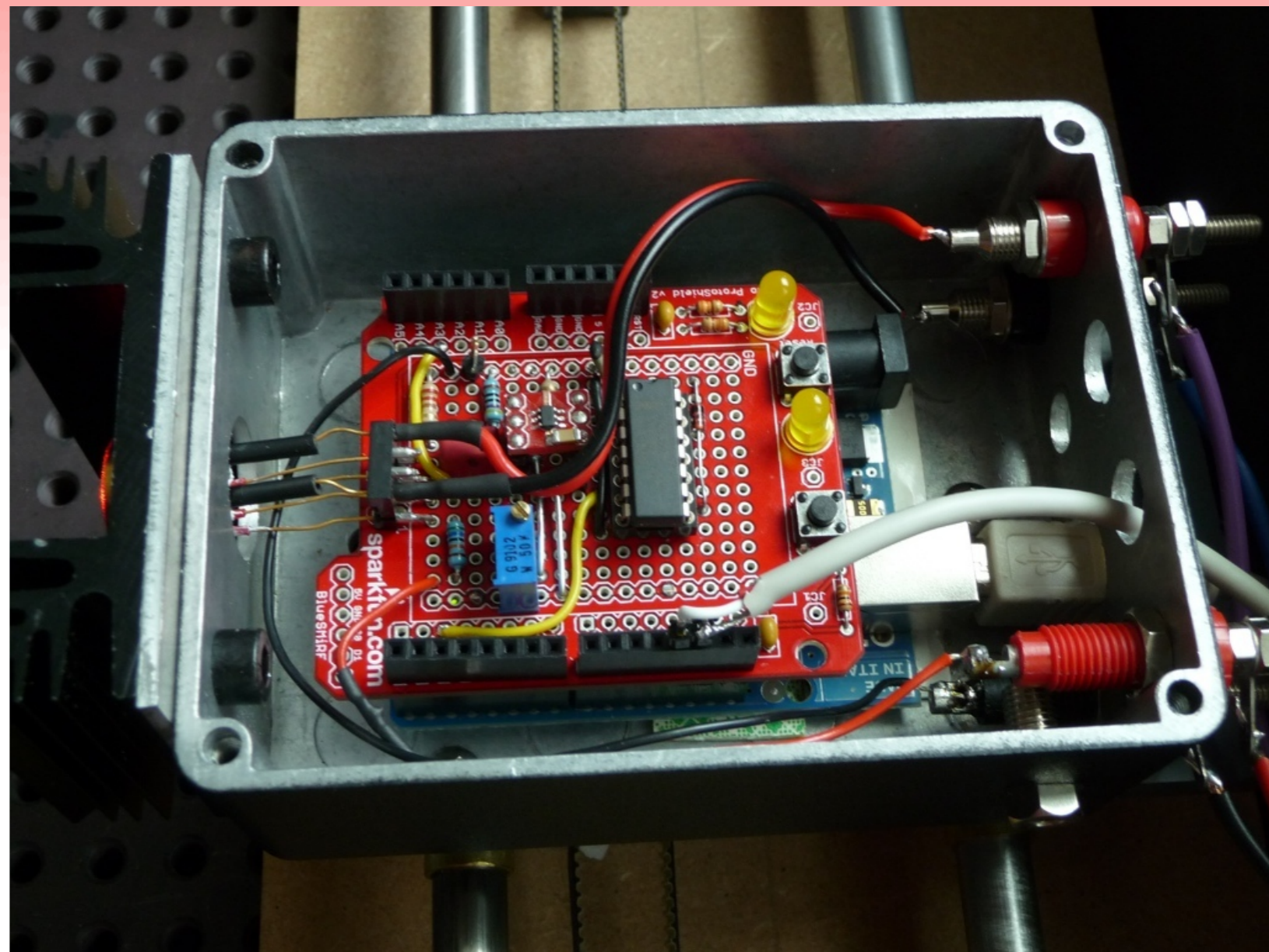


# Geigerteller voor fotonen: APD



# Fotonendetector en - teller

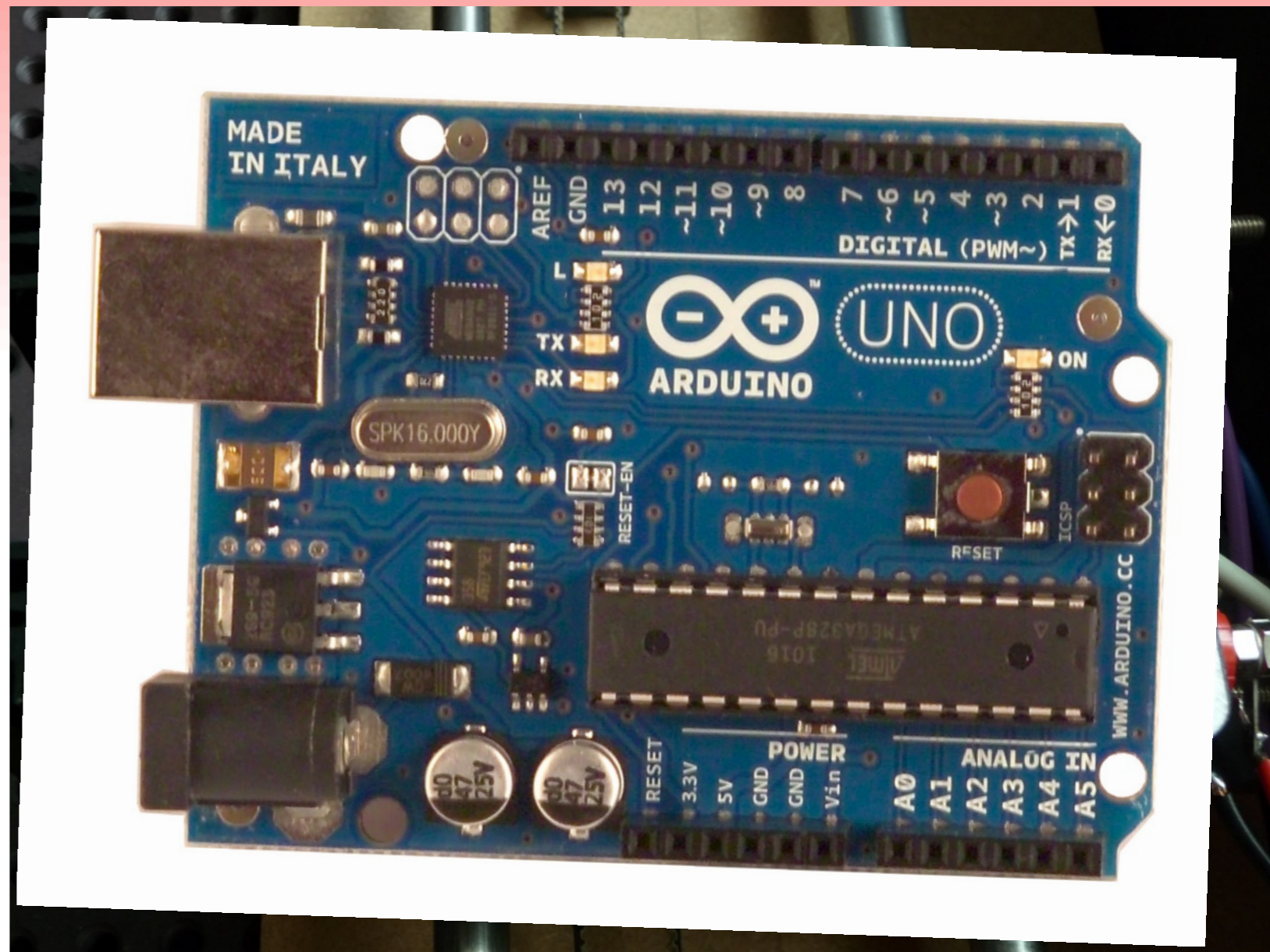
- elektronica als versterker
- tik geluid
- microprocessor als teller
- laptop met visualisatie software





# Fotonendetector en - teller

- elektronica als versterker
- tik geluid
- microprocessor als teller
- laptop met visualisatie software



Eén voor één

Hoe lang is het foton onderweg?  
( $l=0,75$  m)

2,5 ns

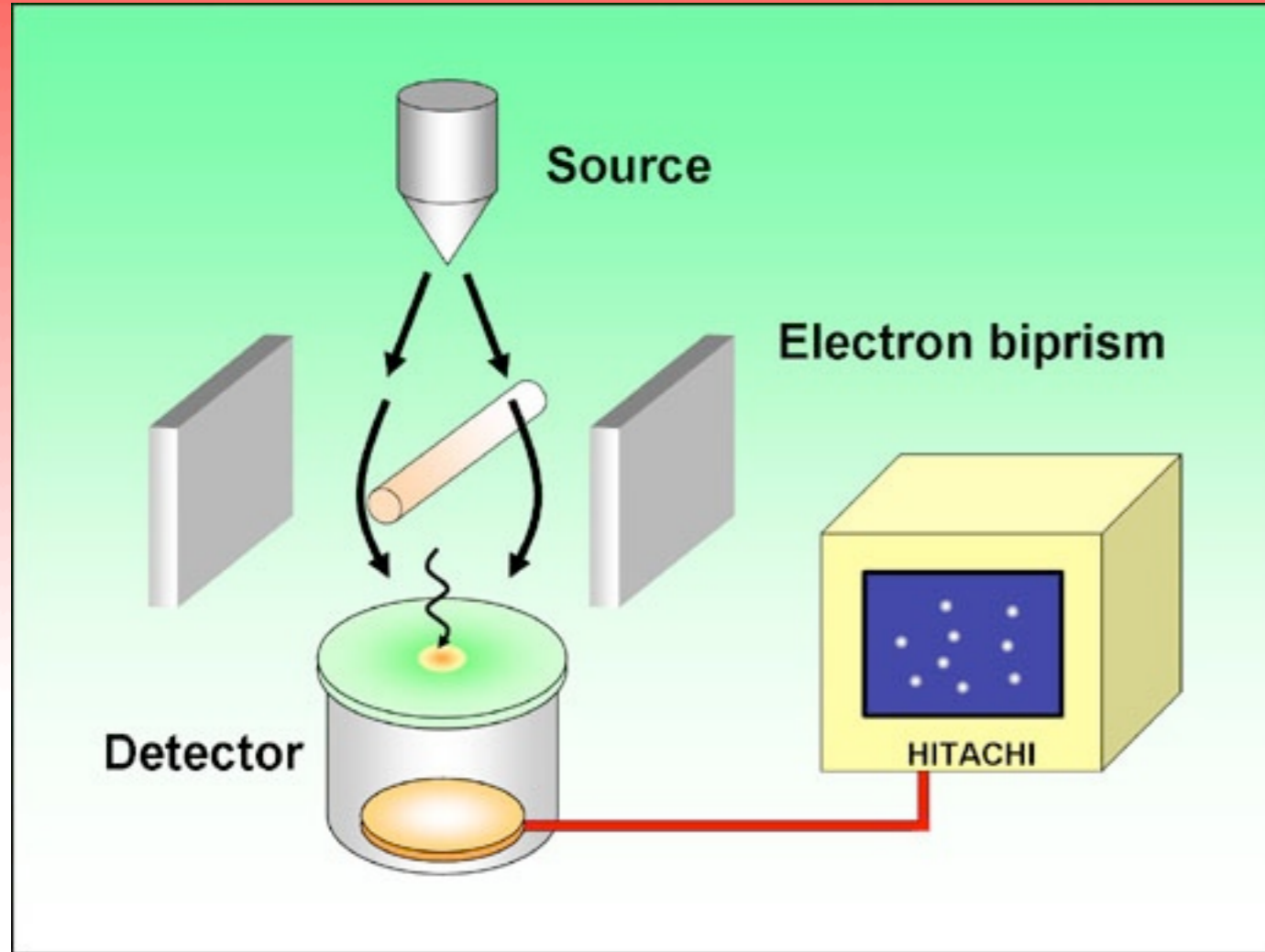
Wat is het gemiddelde tijdsverschil  
tussen de fotonen?  
( $n=3,3 \times 10^7$ /s)

30 ns



**Demo**

# Electron tweespleten experiment (1961)



# Electronen tweespleten experiment (1961)





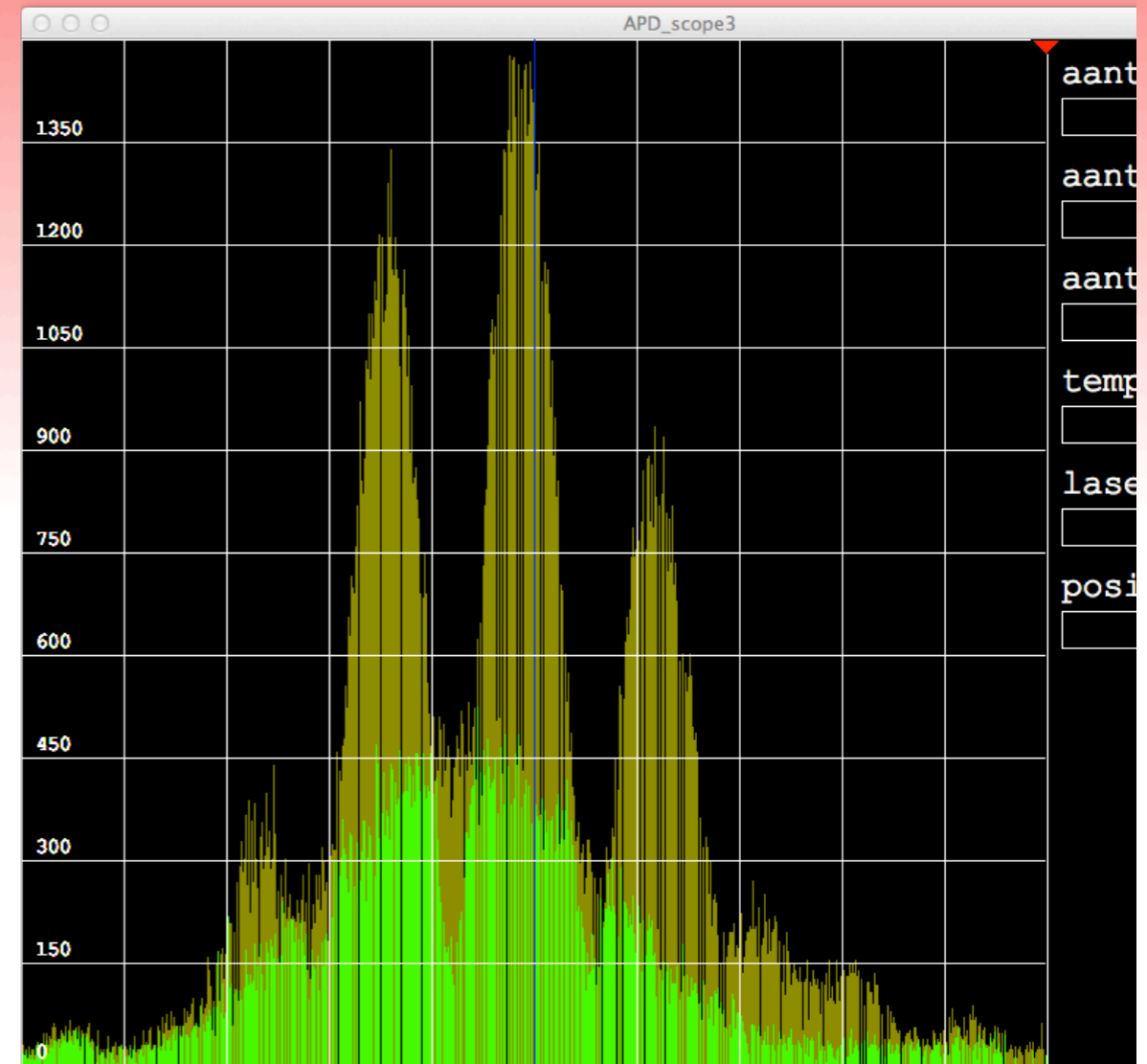
# Wat is je conclusie?

- “interessant, moeilijk” en “de wonderen zijn de wereld niet uit”
- “2 deeltjes zijn op een plek, kan niet bewijzen dat dit zo is”
- “deeltjes/fotonen zijn slim en communiceren met elkaar”
- “1 foton gaat door 2 spleten en interfereert met zichzelf”
- “de natuur is onbeslist totdat je iets observeert”
- “de fotonen bewegen in een golf en kunnen op twee plekken zijn”
- “Alle deeltjes golven en kunnen interfereren met elkaar”
- “dat licht nog eigenschappen heeft die nog niet kunnen uitleggen”
- “Vage shit, ik heb nog veel te leren(.) over 20 jaar kunnen we teleporteren”
- “quantum mechanica is wel interessant”
- “Een deeltje gaat/kan door twee spleten”
- “Dat één foton door 2 spleten gaat”
- “Dat een deeltje op twee plekken kan zijn in gedachte zodra je het meet er nog maar 1 mogelijkheid is”



# Ervaringen

- Leerlingen reageren enthousiast (V5)
- Klik geluid benadrukt deeltjes karakter
- *“Food for thoughts”*
- Inzetbaar voor uw school?



# Discussie en vragen

