

Ruisloos deeltjes detecteren

Het tellen van elektronen en ionen en het meten van hun snelheid is essentieel in een groot aantal fysische experimenten. Door de jaren zijn hiervoor vele verschillende manieren bedacht, iedere methode met zijn eigen beperkingen. Een nieuwe generatie twee-dimensionale pixel-detectors is bij CERN ontwikkeld ten behoeve van onderzoek in de hoge-energiefysica. Drie recente experimenten aan de Universiteit Twente en op AMOLF tonen de potentie voor atoom-, molecuul-, oppervlakte- en bio-moleculaire fysica.

Raoul van Gastel, Sense Jan van der Molen, Irakli Sikharulidze, Georg Gademann, Julia Jungmann, Ron M.A. Heeren en Marc Vrakking

402

Een van de eerste voorbeelden van een deeltjesdetector is het Wilsonvat [1] (zie figuur 1), dat zijn uitvinder Charles Wilson in 1927 de Nobelprijs voor de natuurkunde opleverde. Geladen deeltjes die het vat gevuld met oververzadigde damp binnenkomen, laten een zichtbaar

spoor achter. Een tweede, recent veel toegepaste detector voor laagenergetische deeltjes als elektronen en ionen is de Micro Channel Plate (MCP) [2] (zie figuur 1), dunne glasplaten met miljoenen tot 6 μm kleine kanaaltjes die van binnen bekleed zijn met een materiaal dat veel secundaire elektronen

genereert als het getroffen wordt door een invallend deeltje. Onder invloed van een elektrisch veld ontstaat zo een lawine van elektronen die aan de achterkant van de MCP eenvoudig te detecteren is, bijvoorbeeld met een fosforschermer, dat de elektronen omzet in licht, en een camera. De MCP is een twee-dimensionale detector, en in feite een verzameling van vele, kleine detectors. De MCP kan grote aantallen deeltjes tegelijk plaatsgevoelig detecteren. De MCP heeft ook nadelen. MCPs hebben een 'donkerstroom', wat betekent dat ze soms deeltjes registreren, die er niet waren. Ook stellen ze strenge eisen aan het vacuüm waar een experiment plaatsvindt. De Medipix is een detector die aan het begin van de jaren negentig bij CERN is ontworpen om de beperkingen van andere detectors zoals de MCP het hoofd te kunnen bieden [3,4].



Marc Vrakking (uiterst rechts) en Georg Gademann (uiterst links) gebruiken in de XUV fysicagroep van het AMOLF de Medipix-detector bij experimenten met attoseconde laserpulsen die gegenereerd worden door middel van hogere harmonische generatie. Ron Heeren (midden links) en Julia Jungmann (midden rechts) passen in de Macromolecular Physics groep de Medipix en Timepix detector toe voor het plaatsgevoelig meten van ionen die vrijgemaakt zijn uit weefsel om op moleculair niveau inzicht te krijgen in verschillende biomedische processen gerelateerd aan ziektes en veroudering.

Irakli Sikharulidze (boven), Sense Jan van der Molen (midden) en Raoul van Gastel (onder) onderzochten de toepassing van Medipix-detectie in LEEM/PEEM in het kader van het Leidse NWO-Groot project 'ESCHER'. Sense Jan van der Molen (UL) leidt dit project, met als doel in Leiden een unieke LEEM/PEEM opstelling te realiseren. In samenwerking met Irakli Sikharulidze (UL/lid Medipix consortium) en Raoul van Gastel (UT) is de detector uitgetest op de Twentse LEEM.

R.vanGastel@utwente.nl



Medipix

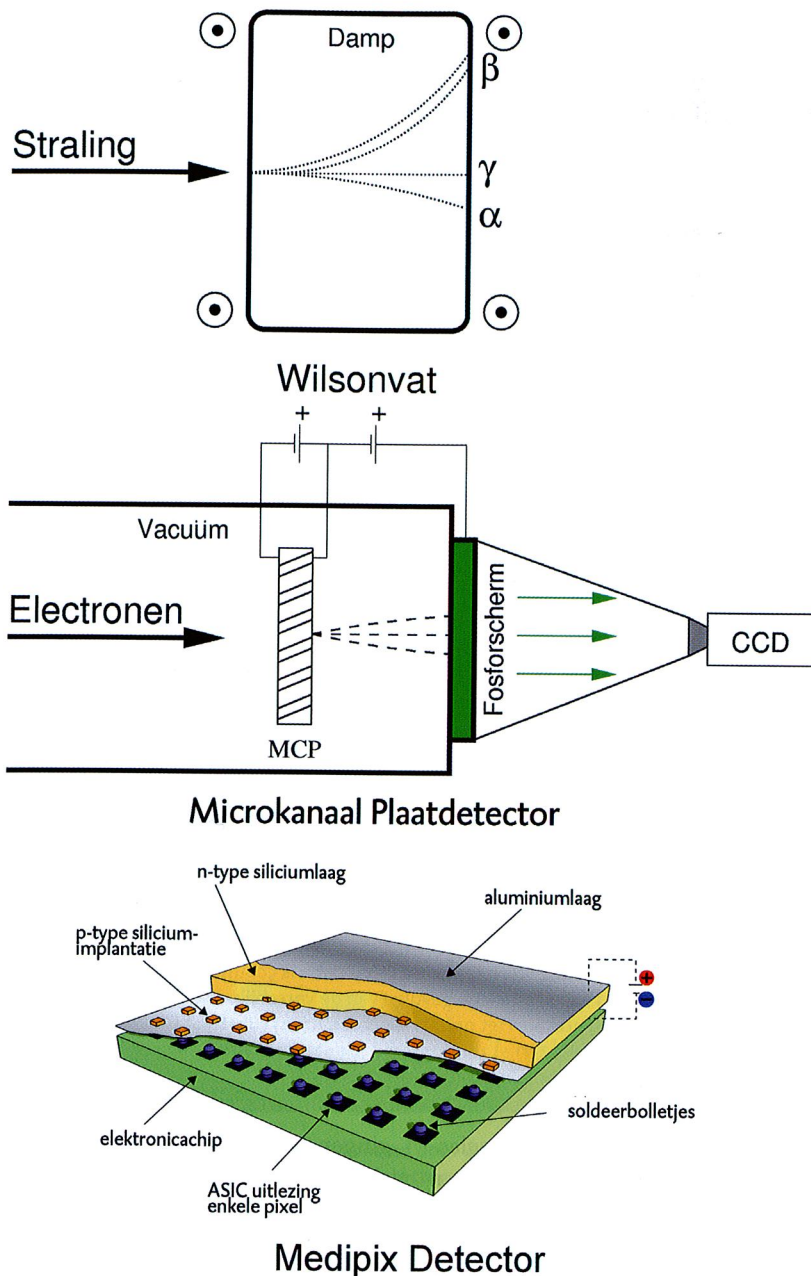
De Medipix-detector is ontworpen door een consortium van achttien Europese instellingen, waaronder Nikhef, AMOLF en de Universiteit Leiden. Deze drie Nederlandse instellingen ontwikkelen gezamenlijk een aantal nieuwe toepas-

singen voor deze unieke detector. De Amsterdamse 'Silicon Alley' bij Nikhef faciliteert in deze samenwerking de assemblage en verdere verfijning van de Medipix-detector en afgeleide systemen. Medipix is een twee-dimensionale hybride detector bestaande uit pixels waarin in alle individuele pixels hoogwaardige uitlees-elektronica geïntegreerd is (zie figuur 1). Medipix heeft geen hoogvacuüm nodig om te kunnen functioneren.

Medipix in oppervlaktefysica

Lage Energie Elektronen Microscopie (LEEM) [5,6], maakt afbeeldingen van oppervlakken door ze te belichten met langzame elektronen (energieën van een paar elektronvolt). De teruggekaatste elektronen genereren beelden waaruit details van een oppervlak tot ongeveer vijf nanometer lateraal en verticaal zelfs tot op atomaire schaal, zichtbaar worden. Zo kunnen bijvoorbeeld kristaldefecten als atomaire stapranden worden afgebeeld. Traditioneel wordt bij LEEM een MCP gebruikt, waarvan het signaal vervolgens met een fosforschermscherm en een CCD-camera wordt vastgelegd. Door met een Medipix-detector direct de elektronen te tellen, wordt het mogelijk plaatjes op te nemen met een hogere ruimtelijke resolutie (9 lijnpaaren/mm voor Medipix versus 3,5 effectieve lijnpaaren/mm voor een MCP) en daarmee meer detail te zien. Ook het onderdrukken van achtergrondruis met de in de Medipix beschikbare elektronica kan leiden tot een betere signaal-ruisverhouding en daarmee een helderder plaatje.

Om de Medipix-detector te vergelijken met de standaard MCP-detector is een samenwerking gestart tussen de universiteiten van Leiden en Twente [7]. Met beide detectoren zijn plaatjes opgenomen van hetzelfde grafeen oppervlak in de LEEM van de Twentse onderzoeksgroep Vastestoffysica (zie figuur 2). De Medipix-plaatjes zijn duidelijk scherper, wat zichtbaar is aan de randen van de stukken grafeen die wazig zijn in het MCP-plaatje en haarscherp in het Medipix-plaatje. Aan die randen is in de Medipix-plaatjes ook duidelijk een heldere lijn te zien, een indicatie van een veldvervorming ten gevolge van een potentiaalverschil tussen het grafeen en het Ir-oppervlak. Verder is het Medipix-plaatje volledig vrij van ruis en achtergrond. Een kwantitatieve



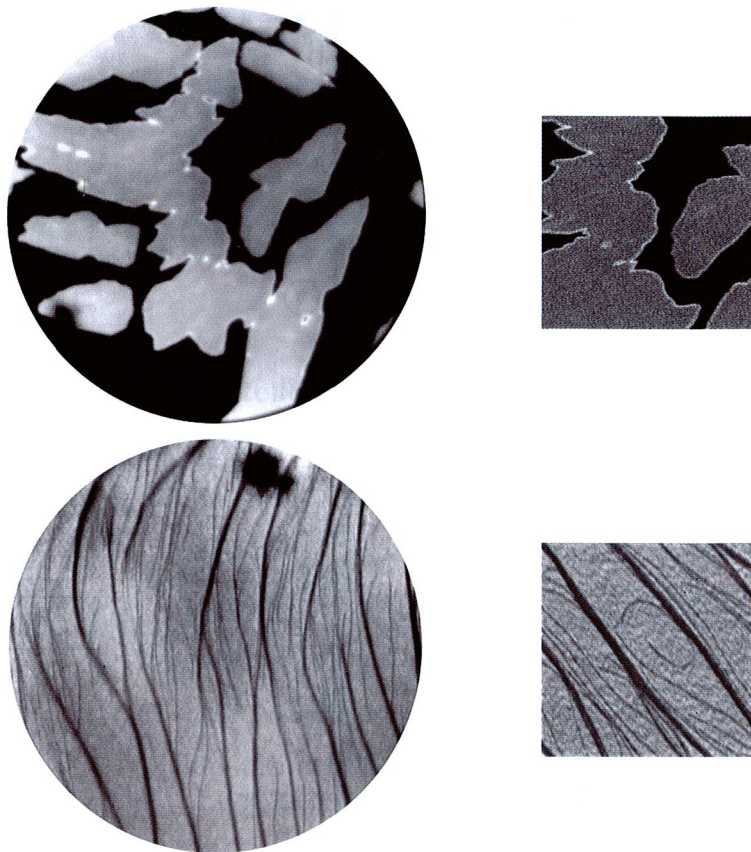
Figuur 1 Drie verschillende deeltjesdetectoren. De bovenste figuur laat een Wilsonvat zien, dat in combinatie met een magneetveld gebruikt kan worden om verschillende soorten stralingen te visualiseren en onderscheiden. Daaronder een MCP-detector zoals die vaak wordt gebruikt in combinatie met een fosforschermscherm en CCD-camera om twee-dimensionale beelden te projecteren en op te nemen. Onderaan de Medipix-detector. De sensor bevat 256×256 vierkante pixels met een laterale afmeting van $55 \mu\text{m}$. Elke pixel heeft een maximale telsnelheid van meer dan 100 kHz.

ve vergelijking van de plaatjes aan de hand van de breedte van de afgebeelde stapranden laat een verbetering zien van de resolutie in het Medipix-plaatje met een factor twee. We verwachten dat Medipix uiteindelijk de standaard-detector zal worden voor de diverse vormen van microscopie gebaseerd op elektronen.

Medipix voor atoom-, moleculair- en optische fysica

De Extreem Ultra-Violet (XUV) fy-

sicagroep op AMOLF bestudeert tijdsopgeloste elektronodynamica in atomaire, moleculaire en plasmonsystemen met behulp van attoseconde lasers [8,9]. Ook hier kan de Medipix-detector de MCP vervangen. Attoseconde laserpulsen kunnen opgewekt worden via Hoge Harmonische Generatie (HHG). In dit proces worden atomen blootgesteld aan intense ultrakorte laserpulsen. Deze ioniseren de atomen. De elektronen ondergaan een enorme versnelling in het oscillerende



Figuur 2 LEEM/PEEM-plaatjes opgenomen met twee verschillende detectoren. De plaatjes links zijn opgenomen met een MCP-detector en rechts met een Medipix2-detector. De afmeting van het plaatje linksboven is $50\ \mu\text{m}$ en linksonder $4\ \mu\text{m}$. De rechter plaatjes zijn kleiner ten gevolge van de verschillende fysieke afmetingen van de twee detectoren. Het oppervlak is een Ir(111) substraat (donker), waarop stukken grafeen (lichtgrijs) zijn gegroeid. De sterke verbetering van het contrast en scherpte in de Medipix-plaatjes is opvallend.

404

elektrisch veld van de laser. In inelastische botsingen van deze elektronen met het achtergebleven ion ontstaat de attoseconde straling. De inelastische botsingen gebeuren gedurende een kleine fractie ($0,1\ \text{fs} = 10^{-16}\ \text{s}$) van de optische periode (die zelf slechts $\sim 2,5\ \text{fs}$ lang is). Deze techniek wordt in talrijke laboratoria wereldwijd gebruikt en verder ontwikkeld. Echter, de opbrengst aan attoseconde straling is erg laag en daarom is het op dit moment nog een flinke uitdaging om attoseconde lasers in experimenten te gebruiken. Op AMOLF wordt op een aantal manieren geprobeerd deze problemen op te lossen. In het kader van een industrieel EU-project wordt geprobeerd om intensere attoseconde pulsen te maken. De Medipix-detector maakt het mogelijk om experimenten uit te voeren bij een relatief slecht vacuüm van 10^{-4} - 10^{-3} mBar. MCP-detectoren gaan bij deze waarden kapot. Positiegevoelige detectie van elektronen en ionen is heel belangrijk in attoseconde experimenten. De bewe-

gingen van elektronen in atomen en moleculen vertalen zich in de snelheidsverdelingen en hoekverdelingen van de elektronen en ionen die door de interactie van attoseconde pulsen gevormd worden. Daarom bestond de eerste test die op AMOLF met de Medipix-detector gedaan is uit het gebruik van de detector in een zogenaamde Velocity Map Imaging (VMI) spectrometer [10]. In deze spectrometer worden elektronen of ionen die gevormd worden op het kruispunt van een atomaire/moleculaire bundel en een of meer laserbundels afgebeeld op een plaatsgevoelige detector. Hierbij komt een positie in het beeld overeen met een bepaalde snelheid en richting van ion of elektron. Figuur 3 toont het resultaat van een VMI-experiment dat op AMOLF is gedaan met een Medipix-detector als vervanger van een MCP [11]. Xe-atomen werden geïoniseerd met behulp van een 355 nm Nd:YAG laser. Om een elektron uit het atoom te verwijderen zijn vier fotonen nodig. Hierbij worden vrije elektronen ge-

vormd met een kinetische energie van 1,83 eV of 0,52 eV, afhankelijk van de vraag of het Xe^+ -ion achterblijft in een $^2\text{P}_{3/2}$ of $^2\text{P}_{1/2}$ toestand. Versnelling en projectie van de elektronen op de Medipix-detector leidt tot de detectie van concentrische ringen die informatie bevatten over de kinetische energie en de hoekverdeling van de geëmitteerde elektronen. Zoals gehoopt kon het experiment uitgevoerd worden bij een druk die 100x hoger was dan mogelijk zou zijn met MCP-detectoren, met behoud van de detectie-efficiëntie en de plaatsresolutie die eerder gerealiseerd was met MCPs.

Timepix

De hiervoor beschreven toepassingen maken nog slechts gebruik van een deel van de mogelijkheden van de Medipix-familie van detectoren. De zogenaamde Timepix-variant [12] maakt het mogelijk om elektronen te detecteren met een hoge plaats- en tijdsresolutie. In de Timepix registreert de tel-elektronica niet alleen dat er een elektron op de detector aankomt, maar ook in welke cycle dit gebeurt van een kloksignaal dat aan de Timepix-chip wordt aangeboden. Dat levert direct een tijdsresolutie op van enkele tientallen nanoseconden. In combinatie met de snelle respons van een MCP vóór de Timepix chip geplaatst wordt is het naar verwachting mogelijk om de aankomsttijd van een elektron op de detector aan te scherpen tot een nauwkeurigheid van beter dan 100 ps. Dit betekent dat de tweedimensionale meting van bijvoorbeeld een VMI-experiment overgaat in een driedimensionale meting, die alle drie componenten van de snelheid van het gedetecteerde elektron/ion volledig bepaalt.

Als een MCP gebruikt wordt om het elektronsignaal te versterken, zal de lawine aan elektronen meerdere pixels op de Timepix belichten en ook gedurende een flink aantal klokcycli. Deze *time-over-threshold* is een goede maat voor de hoeveelheid elektronen die op individuele pixels wordt ingevangen. De combinatie van signalen over een aantal naburige pixels maakt het mogelijk om de positie waarop het elektron op de MCP inviel te bepalen met een resolutie die veel beter is dan de $55\ \mu\text{m}$ diameter van een individueel detector-element. Onderzoekers aan de universiteit van Berkeley (VS)

hebben al laten zien dat de positie waarop een ultraviolet foton invalt op een MCP detector met behulp van de Timepix en een slim algoritme bepaald kan worden met een resolutie die aanzienlijk beter is dan $10\ \mu\text{m}$ [13]! Detectie van invallende elektronen met sub $10\ \mu\text{m}$ plaatsresolutie en sub 100 ps tijdsresolutie opent een wereld van mogelijkheden.

Medipix detectoren voor hoge resolutie moleculaire pathologie

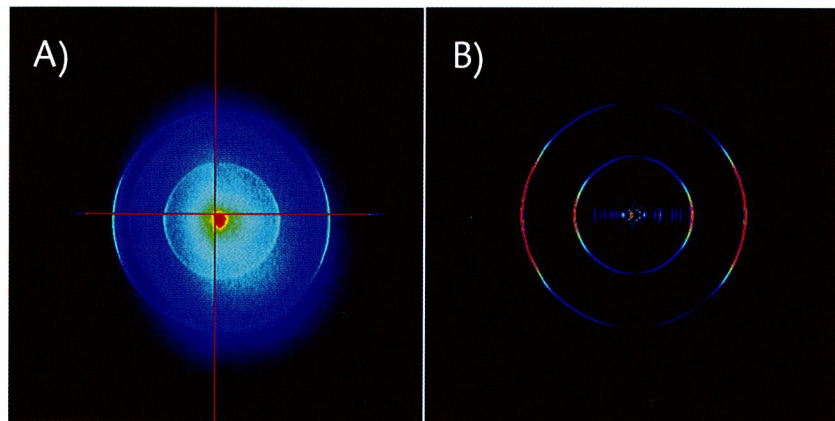
Tot dusverre hebben we het slechts over elektronen gehad. In combinatie met een MCP zijn de Medipix- en Timepix-detectoren ook uiterst geschikt voor het detecteren van ionen. In de Macromolecular Ion Physics groep op AMOLF worden plaatsgevoelige detectoren gebruikt om met behulp van een vluchtijdsmassaspectrometer afbeeldingen te maken van biomacromoleculaire ionen, vrijgemaakt uit pathologische weefselcoupes [14]. Deze afbeeldingen worden gebruikt om op moleculair niveau inzicht te krijgen in verschillende biomedische processen gerelateerd aan ziektes en veroudering. Het ruimtelijke detail dat met deze methode zichtbaar gemaakt kan worden, wordt bepaald door de ionenoptische vergrotingsfactor van een factor 100 in combinatie met de kwaliteit van de detector. Op AMOLF is een opstelling gebouwd waarin de Medipix-detector een cruciale rol speelt. De combinatie van Medipix met een MCP zorgt ervoor dat direct de positie van de invallende biomoleculaire ionen geregistreerd wordt, met een plaatsoplossend vermogen op het weefseloppervlak van 550 nm. In figuur 4a laat een enkele opname van deze opstelling zien dat individuele elektronenwolken (aan de achterzijde van het MCP), gerelateerd aan de impact van een enkel ion aan de voorkant van het MCP, door de Medipix-detector gevisualiseerd kunnen worden. In figuur 4b laat de sommatie van 100 beelden de gedetailleerde structuur van het oppervlak zien van een TEM-grid bovenop een peptidemengsel met een pitch van 37 micrometer. De moleculaire samenstelling en verdeling in arteriosclerotische plaques worden zichtbaar. Dit opent nieuwe mogelijkheden voor moleculaire pathologie.

Medipix- en Timepix-detectoren, die oorspronkelijk ontwikkeld zijn voor

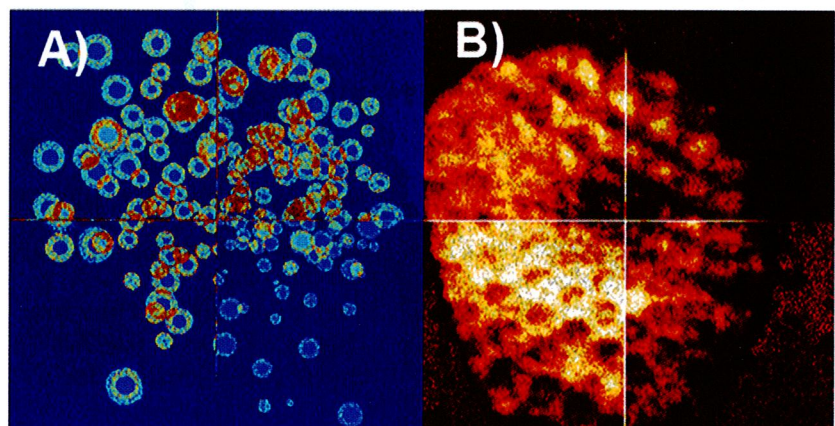
het detecteren van harde x-rays en gamma-rays, blijken geschikt te zijn voor het detecteren van geladen deeltjes, en openen unieke mogelijkheden in talrijke toepassingen waarin gebruik gemaakt wordt van plaatsgevoelige detectie van elektronen en ionen. De auteurs zijn Jan Visser en Jan Visschers van Nikhef erkentelijk voor hun bijdrage aan de ontwikkeling van Medipix en ieder van de hierboven beschreven experimenten.

Referenties

- 1 C. T. R. Wilson, *Phil. Mag.* **7** (1904), 681.
- 2 J.L. Wiza, *Nucl. Instr. Meth.* **162** (1979), 587, en referenties daarin.
- 3 S.R. Amendolia et al., *Nucl. Instr. Meth. A* **422** (1999), 201.
- 4 X. Llopart, M. Campbell, R. Dinapoli, D. San Segundo en E. Pernigotti, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** (2002), 2279.
- 5 E. Bauer, *Surf. Sci.* **299-300** (1994), 102.
- 6 R.M. Tromp, *IBM J. Res. Dev.* **44** (2000), 503.
- 7 R. van Gastel, I. Sikharulidze, S. Schramm, J.P. Abrahams, B. Poelsema, R.M. Tromp en S.J. van der Molen, *Ultramicroscopy* (in press), doi:10.1016/j.ultramic.2009.09.002.
- 8 M.F. Kling en M.J.J. Vrakking, *NTvN* **72-10** (2007), 326.
- 9 M.F. Kling en M.J.J. Vrakking, *Ann. Rev. Phys. Chem.* **59** (2008) 463.
- 10 A. Eppink en D. Parker, *Rev. Sci. Instrum.* **68** (1997), 3447.
- 11 G. Gademann, Y. Huismans, A. Gijsbertsen, J. Jungmann, J. Visschers en M.J.J. Vrakking, *Rev. Sci. Instrum.* (in press).
- 12 X. Llopart, R. Ballabriga, M. Campbell, L. Tlustos en W. Wong, *Nucl. Instr. and Meth. A* **581** (2007), 485-494.
- 13 B. Mikulec et al., *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **567** (2006), 110.
- 14 S. L. Luxembourg, A.F.M. Altelaar, L. McDonnell en Ron M.A. Heeren *NTvN* **72** (2006) 188-192.



Figuur 3 a) Projectie van elektronen gevormd door 4-fotonionisatie van Xe met een 355 nm Nd:YAG laser. De gebruikte detector was een zogenoemde Quad-detector, bestaande uit 4 Medipix chips met elk 256×256 pixels. De grenzen tussen de individuele detectoren zijn duidelijk zichtbaar. b) Doorsnede door de driedimensionale snelheidsverdeling die op basis van de meting bepaald kon worden. De elektronen worden gevormd met twee karakteristieke energieën.



Figuur 4 a) Een Medipix-beeld van de secundaire elektronen uit een MCP overeenkomend met de aankomst van een enkel ion. Elke cirkel is een enkele elektronenwolk. b) Een sommatie van 100 individuele beelden laat de moleculaire oppervlaktestructuur van een TEM-grid bovenop een eiwitmengsel zien.