

der GEO600-Kollaboration südlich von Hannover einen Gravitationswellendetektor betreiben. Viele technologische Entwicklungen aus Hannover wie die monolithische Spiegelaufhängung oder das Hochleistungslasersystem haben die notwendige hohe Empfindlichkeit der LIGO-Detektoren erst ermöglicht.

Im Dezember 2015 registrierte die LIGO-Kollaboration das zweite Gravitationswellensignal zweier verschmelzender Schwarzer Löcher, im Januar 2017 das dritte. Das vierte Gravitationswellensignal detektierten die LIGO- und VIRGO-Detektoren am 14. August 2017 erstmals gemeinsam. Diese drei-

fache gemeinsame Messung verbesserte die Genauigkeit, mit der sich die Position und Entfernung der Schwarzen Löcher bestimmen ließen, signifikant. Die Gravitationswelle erreichte zuerst den Detektor in Livingston, acht Millisekunden später den Detektor in Hanford und weitere 14 Millisekunden später den italienischen VIRGO-Detektor in der Nähe von Pisa. Damit ließ sich der Ursprung der Gravitationswelle auf einen Bereich von 60 Quadratgrad (das 300-Fache der scheinbaren Größe des Vollmondes) am Südhimmel zwischen den Sternbildern Eridanus und Horologium lokalisieren.

Am 16. Oktober sorgten die LIGO- und VIRGO-Kollaborationen erneut mit einer Pressekonferenz für Aufsehen: Am 17. August zeichneten sie das Gravitationswellensignal von zwei verschmelzenden Neutronensternen auf.¹⁾ Zudem registrierten insgesamt 70 astronomische Observatorien auf der Erde und im All die elektromagnetische Strahlung, die bei dem Ereignis und dessen Folge entstand. Mit dieser kombinierten Messung hat eine völlig neue Ära der Astronomie begonnen, maßgeblich initiiert durch die diesjährigen Physik-Nobelpreisträger.

Maïke Pfalz

■ Gefrorene Biomoleküle hochaufgelöst abbilden

Jacques Dubochet, Joachim Frank und Richard Henderson erhalten den Chemie-Nobelpreis 2017 für die Entwicklung der Kryo-Elektronenmikroskopie.



Jacques Dubochet (links) wurde 1942 in der Schweiz geboren und studierte in Lausanne und Genf, von 1978 bis 1987 arbeitete er in Heidelberg, bevor er in Lausanne Professor wurde. Joachim



Frank (Mitte) wurde 1940 in Weidenau an der Sieg geboren. Er wurde an der TU München promoviert. Nach zahlreichen Stationen wurde er 2003 Professor an der Columbia University in New



York City. Richard Henderson (rechts) wurde 1945 in Edinburgh geboren und studierte in Edinburgh und Cambridge. Nach 1973 arbeitete er am Medical Research Council in Cambridge.

Die Geheimnisse von Biomolekülen wie Proteine oder Viren lassen sich am besten entschlüsseln, wenn es hochaufgelöste dreidimensionale Bilder ihrer Struktur gibt. Bis ein allgemein anwendbares, einfaches Verfahren vorlag, haben drei Forscher mit ihren Arbeitsgruppen über Jahrzehnte die Grundlagen der Kryo-Elektronenmikroskopie entwickelt und verbessert. Dafür zeichnet die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften Jacques Dubochet, Joachim Frank und Richard Henderson zu jeweils gleichen Teilen mit dem Nobelpreis für Chemie 2017 aus.¹⁾

Richard Henderson versuchte nach seiner Promotion an der Cambridge University 1969, die Struktur von Proteinen mithilfe der Röntgenkristallographie darzustellen. Er scheiterte aber daran, ausreichende Mengen der Proteine aus ihrer natürlichen Umgebung zu extrahieren oder sie in ihrer natürlichen Struktur zu kristallisieren. Daher kam er auf die Idee, als bildgebendes Verfahren die Elektronenmikroskopie einzusetzen. 1975 gelang es ihm, das Protein Bacteriorhodopsin mit einer Auflösung von 7 Ångström darzustellen. Dabei kam ihm zugute, dass dieses Protein im Organis-

mus so regelmäßig angeordnet ist, dass es für die Untersuchung nicht extrahiert werden muss. In den folgenden Jahren nutzte Henderson die immer bessere Technik aus, um schließlich 1990 die Struktur von Bacteriorhodopsin mit atomarer Auflösung darzustellen.

Um die Elektronenmikroskopie allgemein als bildgebendes Verfahren für Biomoleküle zu etablieren, waren noch die Arbeiten von Joachim Frank und Jacques Dubochet notwendig. Der in Deutschland geborene Joachim Frank suchte nach einem Algorithmus, um aus den Aufnahmen tausender ver-

1) Vgl. Dossier „Nobelpreis“, www.pro-physik.de/phy/physik/dossier.html?qid=1417689

schieden orientierter Proteine ein gemittelttes Bild höherer Auflösung zu erzeugen. Dazu entwickelte er am New York State Department of Health ein Computerprogramm, das zunächst die Bilder in Gruppen gleicher Orientierung einsortiert und daraus einzelne hochaufgelöste zweidimensionale Bilder erzeugt. Im nächsten Schritt berechnet das Programm daraus die dreidimensionale Struktur des Biomoleküls. Mitte der 1980er-Jahre gelang es ihm damit, die Oberfläche eines Ribosoms hochaufgelöst darzustellen.

Das Problem der Probenpräparation ging Jacques Dubochet an: Er wollte verhindern, dass die Proben durch Evaporation austrocknen, wenn sie dem Vakuum

des Elektronenmikroskops ausgesetzt sind. Dazu entwickelte er eine Methode, die das Wasser in der Probe so schnell abkühlt, dass es im Glaszustand vorliegt. Dadurch entsteht bei der Aufnahme ein gleichmäßiger Untergrund, der die Auflösung nicht stört. Außerdem schützt das glasförmige Wasser die Struktur des Biomoleküls während der Aufnahme. 1984 veröffentlichte Dubochet die ersten Bilder verschiedener Viren.

Dennoch wurde die Kryoelektronenmikroskopie weiter scherzhaft als „Blob-ologie“ bezeichnet, weil es meist nicht gelang, die atomare Struktur der Biomoleküle sichtbar zu machen. Richard Henderson hielt an der Vision fest,

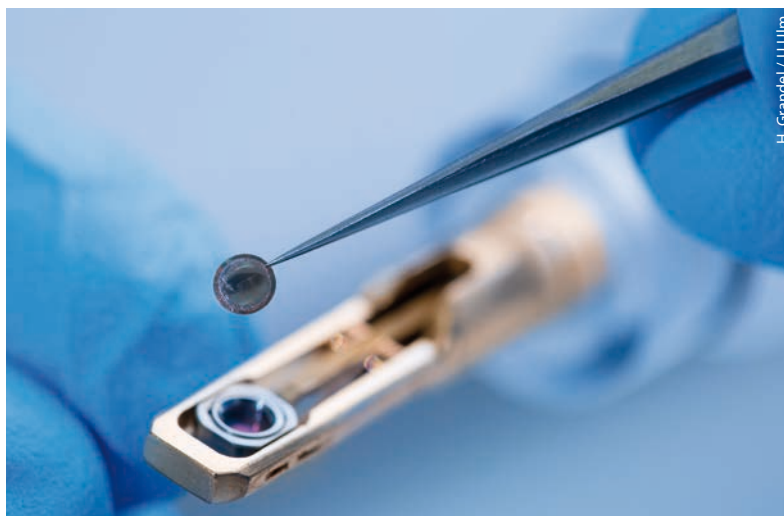
daraus ein Standardverfahren zu machen. Er behielt recht: Die Auflösung verbesserte sich kontinuierlich, bis 2013 ein neuer Typ von Elektronendetektoren den Durchbruch ermöglichte. Seither zeigen die Aufnahmen faszinierende Details der Struktur hochkomplexer Biomoleküle.

Zum Einsatz kommt die Kryoelektronenmikroskopie beispielsweise, wenn auf der Membran von Proteinen ein Angriffspunkt für Medikamente gesucht wird oder wenn es darum geht, die Struktur eines Virus zu verstehen, um Impfstoffe zu entwickeln, wie unlängst im Fall des Zika-Virus.

Kerstin Sonnabend

■ Begrüßt sei das Super-Mikroskop

An der Universität Ulm findet sich nun ein einzigartiges Transmissionselektronenmikroskop.



Das Transmissionselektronenmikroskop SALVE ermöglicht es, die atomare Struktur von Biomolekülen hochaufgelöst abzubilden.

Die „Sub-Ångström Low Voltage Electron microscopy“ ist eine Forschungsinitiative der Universität Ulm, um materialschonende Technologien zur atomar auflösenden elektronenmikroskopischen Abbildung zu entwickeln.¹⁾ Kürzlich ist das SALVE-Mikroskop – eine Entwicklung im Rahmen der Initiative – im neuen Mikroskop-Gebäude auf dem Campus der Universität angekommen. In dem weltweit einzigartigen Gerät stecken sieben Jahre Entwicklungsarbeit, welche

die Projektleiterin Ute Kaiser vom Lehrstuhl für Materialwissenschaftliche Elektronenmikroskopie gemeinsam mit den Partnerunternehmen CEOS und FEI geleistet hat.

Das SALVE-Mikroskop arbeitet mit Spannungen zwischen 20 und 80 kV und erlaubt so die Abbildung von empfindlichen Materialien wie Biomolekülen oder Graphen. Durch die niedrige Spannung treten neben den üblichen Öffnungsfehlern auch Farbfehler in den Aufnahmen auf. Daher ist eine zwei-

fache Bildfehlerkorrektur nötig, um auf atomarer Ebene hochaufgelöste Abbildungen zu ermöglichen.

Die Kosten für das SALVE-Mikroskop teilen sich die Deutsche Forschungsgemeinschaft (5,3 Mio. Euro), das Land Baden-Württemberg (3,8 Mio. Euro) und die Carl-Zeiss-Stiftung (1,5 Mio. Euro). Der Aufbau und erste Tests erfolgten beim Partner CEOS, da auf dem Campus der Universität Ulm zunächst ein spezielles Gebäude errichtet werden musste. Dessen Räume bieten nun eine erschütterungsfreie, temperaturstabile und von störenden Magnetfeldern abgeschirmte Umgebung. Fast die Hälfte der Kosten von 3,85 Millionen Euro tragen die Stadtwerke Ulm, weil der Neubau einer Straßenbahnlinie zum Campus das neue Gebäude erst notwendig machte. Die restliche Summe bringen Universität und das Land Baden-Württemberg auf. „Die Technologie von SALVE macht es möglich, Bewegungen und Interaktionen von Atomen mit nie gekannter Präzision zu erfassen,“ freut sich Ute Kaiser auf die Arbeit mit dem neuen Super-Mikroskop.

Kerstin Sonnabend / U Ulm

1) www.salve-project.de