

## Ultrakalte Forschung

**Der kälteste Ort Tirols ist nicht Seefeld, wo im Februar 1956 bitterkalte minus 32,5 Grad gemessen wurden, auch nicht Kitzbühel, wo im Jänner 1963 ebenfalls solch tiefe Temperaturen erreicht wurden. Und auch nicht der Brunnenkogel, wo das Thermometer im Februar 2012 minus 31,5 Grad anzeigte. Der kälteste Ort Tirols ist die Universität Innsbruck. Chemiker und Physiker simulieren in ihren Labors Vorgänge im Weltall und Quantenphänomene - und das mit Temperaturen weit unter minus 200 Grad Celsius.**

Auf den ersten Blick klingt es trivial. Gerhard Kirchmair hat einen Kühlschrank im Labor, in jenem von Thomas Lörting steht eine Eismaschine und Paul Scheier arbeitet mit Schneebällen. Doch schon der zweite Blick zeigt, dass nichts trivial, sondern alles außergewöhnlich ist. Kirchmair benötigt seinen Kühlschrank, um mit supraleitenden Schaltkreisen Quantensimulationen durchzuführen, Lörtings Eismaschine hyperquench Wasser zu amorphem Eis und Scheiers Schneebälle taugen für keine Schneeballschlacht, sind sie doch mit einer festen Heliumschicht überzogene Fullerene. Auf den dritten Blick offenbart sich aber eine Gemeinsamkeit: Alle drei Forscher der Universität Innsbruck arbeiten mit Temperaturen, die einem das Blut in den Adern gefrieren lassen. Am „coolsten“ geht es bei Gerhard Kirchmair zu. In seinem Kryostaten bewegen sich die Temperaturen gerade mal bei einigen Millikelvin, also knapp über dem absoluten Nullpunkt der Temperaturskala bei 0 Kelvin bzw. minus 273,15 Grad Celsius.

Im Dezember 1957 wurde im absoluten Niemandsland der Antarktis die Forschungsstation Wostok eröffnet, 3488 Meter über dem Meer und 1260 Kilometer von der nächstgelegenen Küste entfernt. Sie gilt als der Kältepol der Erde, minus 89,2 Grad Celsius wurden am 21. Juli 1983 dort gemessen, kälter war es noch nie auf unserem Planeten - zumindest seit es Temperaturaufzeichnungen gibt. Andere Bedingungen herrschen im Weltraum, „da sprechen wir von minus 268 Grad Celsius“, sagt der Chemiker Thomas Lörting. Das sei viel zu kalt, als dass Wasser so gefrieren könnte wie auf der Erde, als dass es kristallisieren würde. „Einzelne Wassermoleküle lagern sich ungeordnet aneinander und bilden amorphes Eis“, berichtet Lörting und ergänzt: „99,99 Prozent allen Eises, das wir kennen, ist amorph.“ Dementsprechend habe es auch eine riesige Bedeutung, was die Bildung von Sonnensystemen, von Planeten, aber auch die Evolution von Molekülen und somit auch des Lebens betrifft. Dem Thema, was mit Molekülen im amorphen Eis genau passiert, möchte sich der Forscher in den nächsten Jahren widmen, die Voraussetzungen schafft er sich bei minus 196 Grad Celsius in seinem Labor: Lörtings Arbeitsgruppe ist eine von nur zwei weltweit, die amorphes Eis in relevanten Mengen herstellen können. Wobei relevant relativ ist. Lörting: „Wir haben unser Verfahren und die Bedingungen so optimiert, dass wir in einer halben Stunde ein Gramm amorphes Eis bekommen.“

Auch Paul Scheier arbeitet nur mit wenigen Gramm und bei tiefen Temperaturen, genauer gesagt mit ultrakalten Heliumtröpfchen. Der Physiker hat in jahrelanger Arbeit eine Methode verfeinert, mit der es ihm in einer speziellen Vakuumapparatur möglich ist, „in den Heliumtröpfchen Bedingungen, wie sie im Weltall in kalten Wolken auftreten, gut zu simulieren“. Im Weltall, sagt der gebürtige Vorarlberger, würde zum Beispiel ein Molekül auf ein Staubteilchen treffen und hätte dann tausend Jahre Zeit, um wieder zu thermalisieren: „Und dann kommt das nächste Molekül.“ Das bekomme man im Labor nicht hin, es sei denn, man packe das Molekül bei 0,37 Kelvin in ein Heliumtröpfchen. „Die Abkühlrate liegt bei zehn hoch zehn Kelvin“, sagt Scheier. Hat das Molekül eine Ausgangstemperatur von 300 Kelvin, ist es in einer hundertmillionstel Sekunde abgekühlt und ist

Quelle: Standortagentur Tirol

bereit für das nächste Molekül. „Meines Erachtens ist dies der ähnlichste Vorgang wie im Weltall“, meint Scheier.

Mit dem Weltall eher weniger zu tun hat Gerhard Kirchmair, dafür erinnert sein zylinderförmiger Kryostat im Labor des Instituts für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der österreichischen Akademie der Wissenschaften entfernt an eine Rakete. Ähnlich einer Matrjoschka steckt ein Zylinder im nächsten, mit jedem Zylinder sinkt die Temperatur, im innersten herrscht Eiskälte - 20 Millikelvin. Dort, im Herzstück, befinden sich Kirchmairs Quantenbits, selbst gebaut aus Supraleitern, gerade mal so groß wie eine Bleistiftspitze. „Supraleiter haben die Eigenschaft, bei entsprechend tiefen Temperaturen keinen elektrischen Widerstand mehr zu haben“, erklärt Kirchmair, Professor am Institut für Experimentalphysik der Uni Innsbruck: „Somit können sie Strom verlustfrei leiten.“ Eine Eigenschaft, die Kirchmair für seine quantenphysikalische Arbeit nutzt. „Will man Quantenzustände speichern, darf das System keine Verluste haben.“ Mit seinen Schaltkreisen aus Supraleitern gelingt ihm dies, „wir können damit Speicherzeiten erreichen, mit denen wir Richtung Quanteninformationsverarbeitung gehen können.“ Wichtigste Bauteile seiner Schaltkreise sind 200 mal 200 Nanometer große Josephson-Kontakte, eine hauchdünne Oxidschicht zwischen zwei Supraleitern. Elektronenpaare können zwischen diesen zwei „Sandwichhälften“ hin- und herspringen, und das vollkommen verlustfrei, was wiederum für Quantenexperimente in Kirchmairs „Tiefstkühlzylinder“ notwendig ist.

Im Gegensatz zum mannshohen Kryostaten von Gerhard Kirchmair sind Paul Scheiers Gefriergeräte klitzeklein, die ultrakalten suprafluiden Heliumtröpfchen bilden ein Nanokühlschränkchen. Diese kann der Professor am Innsbrucker Institut für Ionenphysik und Angewandte Physik unterschiedlich „befüllen“: Scheier untersuchte darin unter anderem die DNA-Bausteine Thymin und Adenin, ließ TNT-Moleküle explodieren (und konnte erstmals nachweisen, dass der Sprengstoff viel langsamer explodiert als bis dahin vermutet) und zeigte, wie sich Fullerene im Weltall „verstecken“. Im Jahr 2010 war der Nachweis von Fullerenen im Weltraum eine wissenschaftliche Sensation - die fußballförmigen Kohlenstoff-Moleküle sind wichtige Mitspieler in zahlreichen chemischen und physikalischen Prozessen und auch die größten bislang im Weltall entdeckten Moleküle. Scheier packte Fullerene gemeinsam mit Wasserstoffmolekülen in sein Heliumtröpfchen und ionisierte sie. Die Auswertung der Massenspektren ergab, dass die Kohlenstoffatome mit einer Schicht von Wasserstoffmolekülen bedeckt sind - und dadurch in den auf der Erde beobachteten Lichtspektren aus dem All nicht nachweisbar sind.

Mit Fullerenen gelang dem Wissenschaftler noch ein weiteres international vielbeachtetes Experiment - er erzeugte mit ihnen sogenannte Atkins-Schneebälle. Atkins-Schneebälle entstehen unter besonderen Bedingungen. Lagert sich Helium bei ultrakalten Temperaturen und bei niedrigem Druck auf einem geladenen Teilchen ab, wird es fest und umgibt das Molekül wie ein Eismantel. Scheiers Team erzeugte im Labor ultrakalte Heliumtröpfchen, lagerte Fullerene aus 60 Kohlenstoffatomen ein und konnte beobachten, wie diese bis zu 32 Heliumatome aufnahmen, bevor, so Scheier, „der feste Heliummantel um das Kohlenstoffmolekül aufzuschmelzen und ein Teil der Atome zu wandern begann.“ Aus der Eiskruste wird eine feuchte, schmierige Schicht an der Oberfläche, bis zu 60 Heliumatome kann ein Fulleren in einer ersten, energetisch günstigen Schale aufnehmen, auf diese passen nochmals 20 Heliumatome, danach, sagt Scheier, „ändert sich das Absorptionsverhalten des Fulleren-Ions nicht mehr“. Die Erkenntnisse sollen helfen, mehr Licht in die Zusammensetzung von interstellaren Wolken zu bringen und ob in ihnen Fullerene bei der

Quelle: Standortagentur Tirol

Entstehung komplexer Biomoleküle, den Bausteinen des Lebens, eine Rolle spielen. Eine Rolle spielen dabei sicherlich tiefste Temperaturen - und somit amorphes Eis.

„Von vielen wird amorphes Eis als Brutstätte des Lebens gesehen“, weiß Thomas Lörting, Mitarbeiter am Institut für Physikalische Chemie. Ohne den schützenden Eismantel, ist er überzeugt, würden empfindliche Moleküle im All sofort zerstört werden, amorphes Eis, das zeigen seine Laboruntersuchungen, wäre sehr porenreich: „Moleküle könnten dort sehr gut Platz finden.“ Für seine Arbeit greift der Tiroler auf eine eigene Methode zurück - das „Hyperquenchen“. Mitte der 80er Jahre entwickelte der Innsbrucker Chemiker Erwin Mayer dieses Verfahren, mit dem Wasser im Blitztempo auf minus 200 Grad abgekühlt werden kann.

Mit einer Abkühlgeschwindigkeit von 1000 Grad in der Sekunde habe man begonnen, sagt Lörting, doch das Ergebnis wäre immer noch kristallisiertes Eis gewesen. Man sei dann immer schneller geworden: 10.000 Grad, 100.000 Grad, eine Million Grad in der Sekunde ( „Da haben wir gemerkt, dass sich langsam was ändert.“), bei einer Abkühlgeschwindigkeit von zehn Millionen Grad pro Sekunde war man so weit - amorphes Eis. Auch die Tröpfchengröße habe man ständig verkleinert, am Schluss holte man sich eine Anleihe bei Lungenfachärzten, deren Vernebler bei Asthmakranken winzigste Tröpfchen in die Lungenalveolen befördern können. Diese mikrometer-kleinen Tröpfchen wollte man auf eine auf minus 196 Grad abgekühlte Kupferplatte prallen lassen, es fehlte noch die notwendige überschallgeschwindigkeit. Erreicht wird diese mittels einer Vakuumapparatur. „Die Tröpfchen werden in diese injiziert, durch den riesigen Druckunterschied zwischen Umgebungsdruck und Hochvakuum im Inneren bilden sie einen Überschallkegel und treffen auf die Kupferplatte“, beschreibt der Chemiker die Eismaschine, die ihm sein Forschungsmaterial liefert. An diesem konnte der Innsbrucker überraschendes zeigen, etwa, dass es auch „tief unterkühltes flüssiges Wasser“ gibt. Lörting: „Bei minus 196 Grad sind die Wassermoleküle des amorphen Eises ungeordnet und unbeweglich, es herrscht eine Art stilles Chaos.“ Erwärmt man das Eis aber langsam, beginnen sich die Wassermoleküle zu bewegen. Normalerweise in Richtung der idealen Position, um einen Eiskristall zu bilden. Nicht so in Lörtings Eismaschine. „Sie bewegen sich hin und her, es ist der Zustand zwischen amorphem und dem alltäglichen flüssigen Wasser“, erläutert Lörting. Zähflüssig wie Honig sei es, nur würde dieser „Eishonig“ schon Tage benötigen, um „vom Löffel auf das Brot zu rinnen“ - und das bei einer Temperatur von minus 157 Grad.

Eine Temperatur, die für Gerhard Kirchmair fast sommerlich wirkt, beobachtet er doch Quanteneffekte nahe dem absoluten Nullpunkt. Tiefsttemperaturen ist man in den Physiklabors der Uni Innsbruck und dem benachbarten IQOQI gewohnt: Egal ob mit ultrakalten Atomen, mit Quantengasen oder gefangenen Ionen, die Tiroler Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler erforschen mit unterschiedlichen Ansätzen quantenphysikalische Phänomene und zählen zu den weltweit führenden auf diesem Gebiet.

Kirchmair brachte mit seinen supraleitenden Qubits eine zusätzliche Technologie von der US-amerikanischen Yale University nach Innsbruck. Während seine Kolleginnen und Kollegen mit auf echten Atomen basierenden Quantensystemen arbeiten, „bauen wir uns“, lacht der Tiroler, „unsere Systeme selbst“. Das Set-Up seiner Experimente sei etwas einfacher als etwa Ionenfallen mit Lasertechnologie, viel Zeit und Know-how stecke dafür in der Mikrofabrikation seiner Schaltkreise, mit denen er in nächster Zukunft „Modelle in der Festkörperphysik, die mit normalen Rechnern schwer oder nicht lösbar sind“ angehen will. Kirchmair - so wie Lörting übrigens mit einem ERC Starting Grant des europäischen Forschungsrats ausgezeichnet - denkt dabei an Quantencomputer

Quelle: Standortagentur Tirol

mit 40, gar 50 Qubits in seinem Kryostaten. „Wir bauen keinen universell anwendbaren Quantencomputer, sondern ein vereinfachtes System, in dem nicht jedes Qubit absolut kontrolliert werden muss und nicht überall Gatteroperationen gemacht werden müssen“, schildert er seinen „Weg außen links vorbei“. Dieser „Quantencomputer im Maßanzug“ passt dann zwar nur für eine Klasse von Problemen, kann aber dabei helfen, ungelöste Fragen der Physik zu lösen. Und das mit einer „tiefen Coolness“.