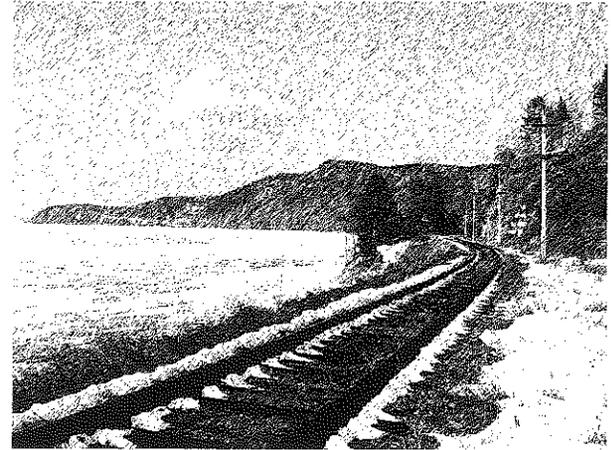


3

Kleine Neutrale



Vor ungefähr 25 Millionen Jahren teilte sich die Erde im äußersten Südosten Sibiriens. Den auseinanderklaffenden kontinentalen Riss füllten seitdem viele Flüsse, und es entstand ein riesiges Gewässer: der Baikalsee. Dieser Binnensee war schon immer von Bergen eingerahmt und hatte niemals direkten Kontakt zu anderen Seen oder Ozeanen. Dadurch entwickelte sich eine ungewöhnliche Flora und Fauna; drei Viertel der Arten gibt es sonst nirgendwo. Deshalb bezeichnet man den See auch als die russische Variante der Galapagos-Inseln. Normalerweise enthält der

Baikalsee rund 20 % des weltweiten Vorrats an ungefrorenem Süßwasser, und selbst während der eisigen sibirischen Winter, wenn der See trotz seiner außergewöhnlichen Größe und Tiefe zufriert, ist es nicht viel weniger.

An einem solchen Wintertag, zwei Tage nach meiner Ankunft in dieser Gegend, befand ich mich auf dem See nahe der Stadt Listwjanka, die an einer Uferbiegung liegt. Ich saß in einem alten Van und versuchte, nach Westen zu gelangen – nicht entlang der Uferstraße, denn es gab keine, sondern über das Eis. Ein Eiskamm, der wie ein tektonischer Bruch aussah, blockierte den Weg. Zwei Abschnitte der festen Oberfläche des Sees waren aufeinandergeprallt und dabei zersplittert. Zerklüftete Eisbrocken waren aufgeworfen worden. Mein Fahrer, ein Russe mit einem wettergegerbten Gesicht, blickte unter seiner Schirmmütze hervor und suchte nach einem Weg durch diese Verwüstung. Jedes Mal, wenn er ein paar Meter glattes Eis sah, stieg er aus dem Wagen und stieß mit einer Metallstange kräftig auf die Fläche, doch wenn das Eis zerbröselte, schüttelte er den Kopf. Es war einfach nicht dick genug, um den Van auszuhalten. Wir fuhren weiter in Richtung Süden, immer weiter vom Ufer weg, meiner Meinung nach in die falsche Richtung. Zitternd stotterte der Van über das Eis, die Reifen knirschten auf frischen Schneeflächen und gelegentlich kamen wir ins Rutschen. Der Kamm erstreckte sich, soweit das Auge blickte. Plötzlich hielten wir an.

Vor uns befand sich eine gefährlich aussehende, mit riesigen Eisbrocken überdeckte Fläche. Wie gewaltige Glassplitter hoben sie sich aus der gefrorenen Oberfläche des Sees empor. Mein Chauffeur schien zu überlegen, ob er das Gebiet umfahren sollte, um nach dickem, festem Eis Ausschau zu halten, auf dem wir unsere Fahrt fortsetzen konnten. Unser Ziel war ein Unterwasserobservatorium in einem der tiefsten Teile des Sees. Ein Umweg hätte uns jedoch noch weiter vom Ufer entfernt, und schon ein platter Reifen hätte uns festgesetzt. Der Sonnenuntergang war noch rund eine Stunde entfernt, und die Temperatur sank

drastisch. Ich konnte den Fahrer nicht fragen, ob er einen Sender oder ein Telefon besaß, um Hilfe herbeizurufen, denn er sprach kein Wort Englisch, und der einzige russische Ausdruck, den ich kannte, war *Do swidanija* – Auf Wiedersehen –, und das war so ziemlich das Letzte, was ich ihm in dieser Situation sagen wollte.

Zum Glück entschied er sich umzukehren. Schließlich stießen wir auf Autospuren, die auf dem Eis über den Kamm verliefen. Der Fahrer drehte nach Westen und überquerte den Kamm, und bald rasten wir über den See mit einer Geschwindigkeit, die jeden kleinen festgefrorenen Eisklumpen zu einer holprigen Bodenschwelle werden ließ. Die Front des Vans hob und senkte sich, dass einem schlecht werden konnte und die Werkzeuge auf dem Vordersitz durcheinanderflogen. Ich machte mir Sorgen, das Eis könnte brechen und wir würden im eiskalten Wasser versinken. Doch es hielt, und auch der Van war trotz des äußeren Erscheinungsbilds in guter mechanischer Verfassung und besaß stabile Stoßdämpfer. In der Ferne erblickte ich auf der ansonsten weißen Fläche einen dunklen Fleck. Als wir uns näherten, wuchs der Fleck zu voller Größe an und entpuppte sich als ein knapp einen Meter großer Weihnachtsbaum. Vor uns lagen immer noch 35 Kilometer, und die Sonne würde bald hinter dem eisigen Horizont verschwinden. Doch nachdem wir den Weihnachtsbaum gefunden hatten, wusste ich, dass wir in Sicherheit waren.

Vor zwei Tagen hatte ich den Baum das erste Mal gesehen, als wir mit Nikolai (Kolja) Budnew, einem Physiker von der staatlichen Universität in Irkutsk, und dem deutschen Geologen Bertram Heinze hier vorbeigekommen waren. Damals befanden wir uns auf dem Weg zu dem tief unter dem Eis gelegenen Neutrinoobservatorium. Kurz nachdem wir in der Nähe von Listwjanka das Ufer verlassen und auf den See gefahren waren, hatte Heinze gefragt: „Wann beginnt das Eis zu brechen?“

„Irgendwann Anfang März“, hatte Budnew geantwortet.

Mein Herz war beinahe stehen geblieben. Es war Ende März und wir befanden uns in einem alten olivgrünen Militärjeep mit-

ten auf dem Eis. „Entschuldigung“, meinte Budnew, „irgendwann Anfang April.“ *Puh.*

An jenem Morgen hatte Budnew mich an dem auffälligen Flughafen von Irkutsk abgeholt. Ich war aus Moskau gekommen, und der Unterschied zwischen Domodedowo, dem schillernden neuen internationalen Flughafen der Hauptstadt, und dem Flughafen von Irkutsk war krass. Der staubig gelbe Pistenbus, der uns vom Flugzeug zum Terminal gebracht hatte, war derart überladen, dass sein Heck über den Boden schleifte, und am Terminalgebäude erkannte man überall Risse im Beton. (Drei Monate später kam der Flughafen von Irkutsk in die Nachrichten, als genau das Flugzeug, mit dem ich hergefliegen war, nach der Landung zerbrach, wobei 125 Personen getötet und 78 weitere Personen schwer verletzt wurden.) In der Vergangenheit, als sich der Einfluss von Russland noch über Sibirien nach Alaska und sogar Kalifornien erstreckte, war Irkutsk eine wohlhabende und blühende Stadt gewesen. An diesem kalten, grauen Morgen im Jahre 2006 sah der Stadtkern heruntergekommen aus, und seine zerfallenden Holzgebäude ließen die beeindruckende Vergangenheit nur erahnen.

Wir hielten an und holten Heinze von seinem Hotel ab. Der große Mann hatte Schwierigkeiten, es sich auf dem Vordersitz bequem zu machen. Kurz danach fuhren wir von Irkutsk in Richtung Listwjanka. Zu beiden Seiten der breiten Straße lagen Wälder, und gelegentlich wurde das gefleckte Weiß der vom Winter entlaubten Birken durch das Immergrün der Kiefern unterbrochen. Etwas später überholten wir einen Van, denselben Van, der zwei Tage später für mich zu einer Quelle existenzieller Angst werden sollte und der andere Wissenschaftler zum Observatorium brachte. Im Dachträger des Vans erkannte man Holzplanken. „Seht ihr die Planken?“, hatte Budnew gefragt. „Damit können wir Risse im Eis überqueren.“

Noch bevor ich mein Unbehagen zum Ausdruck bringen konnte, fuhr Budnew fort und erklärte uns, dass die Planken nicht

verwendet würden, wenn die Risse schmaler als einen halben Meter sind. In solchen Fällen führe der Fahrer einfach schneller und würde die Risse „überspringen“, meinte er und untermalte seine Erklärung noch durch das Geräusch eines Wagens, der kurz abhebt und mit einem dumpfen Schlag auf der anderen Seite aufsetzt.

„Hält das Eis das Gewicht eines Jeeps aus?“, erkundigte ich mich vorsichtig. Budnew versicherte uns, das Eis könne sogar einen Panzer tragen, wenn es sein muss, sogar einen Zug – zumindest fast. Bevor die Transsibirische Eisenbahn fertiggestellt wurde, endeten die Schienen am Westufer des Baikalsees und begannen erst wieder am Ostufer. Der gesamte Zug – Waggons, Zugmaschine, Ladung und Passagiere – wurden mit speziellen Eisbrechern über den See gebracht. Während des russisch-japanischen Kriegs im Winter 1904 war das Eis besonders dick gewesen. Als auf der anderen Seite des Sees dringend Verstärkung notwendig wurde, verlegten die Russen einfach Eisenbahnschienen über den gefrorenen See. Eine Zugmaschine wurde vorausgeschickt, um das Eis zu testen. Sie kam nie an und liegt noch immer irgendwo auf dem Grund. Hätte ich das schon damals gewusst, hätten mich Budnews Versicherungen nicht ganz so sehr beruhigt.

Allerdings ermöglicht gerade das Eis ein ganz besonderes Forschungsvorhaben. Seit über zwei Jahrzehnten campieren russische und deutsche Physiker jedes Jahr von Februar bis April auf dem See. Während dieser Zeit installieren und warten sie besondere Instrumente für die Suche nach „den kleinen Neutralen“ – sehr flüchtigen subatomaren Teilchen, den Neutrinos. Tief unter der Seeoberfläche suchen künstliche Augen nach winzigen blauen Lichtblitzen, die von den sehr unwahrscheinlichen Zusammenstößen zwischen einem Neutrino und einem Wassermolekül stammen. Man sagte mir, dass auch unsere Augen diese Blitze sehen könnten, wenn sie die Größe einer großen Wassermelone hätten. Tatsächlich hat jedes der künstlichen

Augen einen Durchmesser von über dreißig Zentimetern, und das Baikal-Neutrino-Teleskop, das erste Instrument dieser Art, besitzt 228 solcher Augen, die in absoluter Stille auf Nachricht aus dem Weltraum warten.

Das Teleskop befindet sich einige Kilometer vom Ufer entfernt und arbeitet das ganze Jahr unter Wasser. Durch Kabel ist es mit einem Kontrollraum am Ufer verbunden, wo die Daten gesammelt und ausgewertet werden. Finanziell gesehen handelt es sich um ein Schmalspurprojekt. Die Wissenschaftler kommen ohne den Luxus von teuren Schiffen oder ferngesteuerten Tauchgeräten aus. Sie warten einfach auf das Wintereis, das für ihre Kräne und Winden eine sichere Plattform bildet. Jedes Jahr errichten sie ein solches Eiscamp, holen das Teleskop aus einer Tiefe von 1,1 Kilometern noch oben auf das Eis, nehmen die üblichen Wartungsarbeiten vor und lassen es anschließend wieder hinab. Und jedes Jahr ist es ein Wettlauf gegen die Zeit, damit sie mit ihrer Arbeit rechtzeitig fertig werden und ihre Geräte wieder zum Ufer bringen können, bevor die ersten Frühlingboten den sibirischen Winter beleben und das Eis zu brechen beginnt.

Was macht ein Neutrino so außergewöhnlich, dass Wissenschaftler solche Bedingungen auf sich nehmen? Neutrinos dringen nahezu problemlos durch jede Form von Materie hindurch, und seit den weit zurückliegenden Zeiten ihrer Entstehung – für manche von ihnen war das unmittelbar nach dem Urknall – reisen sie ungehindert durch den Weltraum und tragen dabei Informationen mit sich, die in dieser Form kein anderes Teilchen besitzt. Bei sehr hohen Energien ist unser Universum optisch lichtundurchlässig, denn energiereiche Photonen werden von der Materie und der Strahlung, die sich zwischen ihren Entstehungsorten und der Erde befinden, absorbiert. Doch Neutrinos, die unter ähnlichen astrophysikalischen Bedingungen erzeugt werden wie die energiereichen Photonen, treten kaum in Wechselwirkung mit irgendetwas, das sich ihnen in den Weg stellen könnte. Sie können sogar aus dem Inneren von Himmelskörpern entwei-

chen. So strömen riesige Mengen an Neutrinos direkt nach ihrer Erzeugung aus dem Zentrum der Sonne heraus, wohingegen ein Photon Jahrtausende benötigt, um aus dem Sonneninneren an die Oberfläche zu dringen. Neutrinos bilden ein einzigartiges Fenster zu einem ansonsten unsichtbaren Universum.

Diese Teilchen haben für Astrophysiker eine besondere Bedeutung, doch sie können auch einen wichtigen Beitrag zur Kosmologie liefern: Sie könnten uns zeigen, wo sich in unserer Galaxie sehr dichte Bereiche von Antimaterie befinden. Der Theorie zufolge sollten die Potenzialtöpfe der Schwerkraft der Erde und der Sonne im Verlaufe der Zeit große Mengen an Teilchen der Dunklen Materie in sich hineingezogen haben. Es gibt jedoch in unserer relativen (im kosmischen Maßstab) Nähe einen weitaus tieferen Potenzialtopf, der von einem supermassereichen Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße stammt. Auch hier sollten sich dichte Ansammlungen von Teilchen der Dunklen Materie befinden. Unter diesen Bedingungen sollten sie zusammenstoßen und annihilieren können, wobei unter anderem Neutrinos entstehen. In gewisser Hinsicht könnte man sagen, dass sich im Zentrum unserer Galaxie ein riesiger künstlicher Teilchenbeschleuniger befindet, der die Teilchen der Dunklen Materie zur Kollision bringt und dabei Neutrinos erzeugt. Die Neutrinos treten aus dem Bereich heraus, und einige von ihnen fliegen in unsere Richtung. Der Nachweis von Neutrinos aus dem Zentrum unserer Galaxie hätte einen ähnlichen Stellenwert wie der direkte Nachweis von Dunkler Materie, er wäre allerdings indirekt.

Für die Physiker ist von Vorteil, dass es sich bei Neutrinos, im Gegensatz zur Dunklen Materie, um bekannte Teilchen handelt. Doch Neutrinos können sehr unterschiedliche Energien haben, und die Neutrinos aus der Kollision von Teilchen der Dunklen Materie hätten ungefähr dieselbe Energie wie Neutrinos, die ganz in unserer Nähe, nämlich in der Atmosphäre, erzeugt werden. Wenn die kosmische Strahlung auf die oberen Atmosphärenschichten trifft, entstehen sogenannte Sekundärschauer aus

unterschiedlichen Teilchen, unter anderem auch aus Neutrinos. Diese atmosphärischen Neutrinos bilden den bei weitem größten Teil der Neutrinos, die auf die Erde treffen. Sie müssen zunächst sehr genau untersucht werden, und es müssen genaue Karten von ihren Eigenschaften und statistischen Verteilungen am Himmel erstellt werden, denn die Neutrinos aus der Dunklen Materie im Zentrum der Galaxie erscheinen vor diesem Hintergrund wie ein kurzer Lichtblitz. Solange der Hintergrund nicht verstanden ist, laufen wir in Gefahr, das eigentliche Signal zu übersehen.

Es gibt aber noch einen weiteren Grund dafür, dass Neutrinos uns bei der Suche nach der Dunklen Materie unterstützen können. Er hängt mit dem Standardmodell der Teilchenphysik zusammen. Wie schon erwähnt, kann das Standardmodell die Dunkle Materie nicht erklären; dazu bedarf es einer neuen Physik. Wie diese neue Physik jedoch aussehen könnte, hängt auch davon ab, welche Beobachtungen in der nahen Zukunft weitere Ungereimtheiten des Standardmodells aufdecken. Neutrinos könnten hier hilfreich sein, denn auch sie haben Eigenschaften, die sich nicht im Rahmen des Standardmodells erklären lassen. Noch vor zwei Physikergenerationen hätte man es kaum für möglich gehalten, dass Neutrinos einmal eine solche Schlüsselrolle für den Fortschritt der Physik spielen könnten. Damals galt das Neutrino noch als ein Produkt der Fantasie, als rein theoretische Notwendigkeit, die sich jedoch aufgrund extremer Flüchtigkeit unmöglich direkt nachweisen lässt – ein „Geist“ eines Teilchens.

Die Geschichte des Neutrinos beginnt in den späten 1920er Jahren. Im Zusammenhang mit radioaktiven Betazerfällen von Atomkernen (beispielsweise der Umwandlung von Kohlenstoff-14 in Stickstoff-14) waren die Physiker auf ein Problem gestoßen. Kohlenstoff-14 besitzt acht Neutronen und sechs Protonen. Beim Betazerfall verwandelt sich eines dieser Neutronen in ein Proton und emittiert dabei ein Elektron. Es entsteht ein neuer Atomkern mit sieben Protonen und sieben Neutronen, Stick-

stoff-14. Irgendwie schien bei diesem Prozess jedoch etwas Energie verloren zu gehen, d. h., die Energieerhaltung schien verletzt zu sein. Der in Österreich geborene Physiker und Nobelpreisträger Wolfgang Pauli konnte die Sache schließlich klären.

Am 4. Dezember 1930 schrieb Pauli einen bemerkenswerten Brief an eine Gruppe von Kollegen, die sich in Tübingen zu einer Tagung über Radioaktivität getroffen hatte. Pauli begann seinen Brief mit den Worten: „Liebe radioaktive Damen und Herren“, und dann beschrieb er, wie er auf einen „verzweifelten Ausweg“ verfallen sei, um das Gesetz der Energieerhaltung zu retten. Nach seiner Theorie sollte beim Betazerfall zusätzlich ein bisher unentdecktes neutrales Teilchen emittiert werden. Pauli bezeichnete dieses hypothetische Teilchen zwar als „Neutron“, aber er bezog sich dabei nicht auf das Neutron, das wir heute unter diesem Namen kennen und das einer der Bausteine des Atomkerns ist (dieses Teilchen wurde 1932 entdeckt). Pauli war sich bewusst, dass seine Idee sehr spekulativ war. „Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vorneherein wenig wahrscheinlich erscheinen mag, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte“, schrieb er.

Einige Jahre später bezeichnete der theoretische Physiker Enrico Fermi das Teilchen scherzhaft als Neutrino, was im Italienischen so viel wie „kleines Neutrales“ bedeutet, und bei diesem Namen ist es geblieben. Für viele Jahrzehnte blieb das Neutrino ein theoretisches Konstrukt, ein nützliches Teilchen, mit dem die Physiker das peinliche Scheitern ihrer Theorien verhindern konnten. Doch niemand hatte je ein Neutrino gesehen, und niemand wusste auch nur, wie man eines finden könnte. Nach der Theorie sollten insbesondere energiearme Neutrinos problemlos Bleischichten mit einer Dicke von Lichtjahren durchdringen können, und daher war es nicht verwunderlich, dass die Experimentalphysiker in Bezug auf einen Nachweis dieses geisterhaften Teilchens pessimistisch waren. Es sei denn, irgendetwas auf der Erde erzeugt Neutrinos in unvorstellbar großen Mengen.

Tatsächlich gab es da etwas. Um 1950 lief das amerikanische Atomwaffenprogramm auf Hochtouren. Damals arbeitete Frederick Reines, ein mit Mitte dreißig noch vergleichsweise junger Wissenschaftler, am Los Alamos Laboratory in New Mexico. Reines erkannte, dass eine Atombombe eine sehr intensive Neutrinoquelle sein muss (genauer gesagt eine Quelle von Antineutrinos, aber es ändert nichts an der Theorie, wenn wir in diesem Buch einfach von Neutrinos sprechen, was auch anderswo üblich ist). Das gleiche sollte für einen Kernreaktor gelten, argumentierten Reines und sein Kollege Clyde L. Cowan jr. Ihren Berechnungen zufolge sollten auf einen Detektor unmittelbar neben einem Kernreaktor pro Sekunde und Quadratzentimeter rund 10^{13} Neutrinos treffen. Es gab nur ein kleines Problem: Neutrinos sind elektrisch neutral – einer der Gründe, weshalb sie Materie so leicht durchdringen können. Man kann sie nur sehen, wenn sie direkt auf einen Atomkern treffen. Reines und Cowan suchten nach den Anzeichen einer solchen Kollision, und sie hatten Erfolg. Am 14. Juni 1956 verkündeten die beiden Wissenschaftler, ihr „Projekt Poltergeist“ habe ein solches Geisterteilchen nachgewiesen. Pauli informierte sie telegrafisch; die Nachricht erreichte Pauli während eines Physikertreffens in Europa. Er erzählte jedem von dieser Neuigkeit und feierte sie später mit seinen Kollegen und einer Kiste Champagner.

Reines erhielt 1995 für die Entdeckung des Neutrinos den Nobelpreis. (Cowan war damals bereits zwei Jahrzehnte tot.) Zwischen 1930, als Pauli die Existenz des Teilchens vorhergesagt hatte, und dem Nobelpreis für Reines hatte das Neutrino an Bedeutung gewonnen; die Physiker maßen ihm zunehmend eine zentrale Bedeutung für die Struktur des Universums bei. Neutrinos schienen allgegenwärtig zu sein: Manche entstehen gegenwärtig auf der Erde, andere entstanden Sekunden nach dem Urknall. Zu allen Zeiten fanden Prozesse statt, bei denen Neutrinos erzeugt wurden, sei es die Kernfusion im Inneren der Sonne oder die katastrophalen kosmischen Explosionen,

die man Supernova nennt und mit denen ein massereicher Stern untergeht. Die erdnächste Neutrinoquelle ist die Sonne. In jeder Sekunde durchfliegen nahezu eine Billion Neutrinos jede Ihrer Handflächen.

In den 1960er Jahren begann man, Neutrinodetektoren in aufgelassenen Bergwerken aufzustellen. Dort gab es eine natürliche Abschirmung gegen die kosmische Strahlung, die für den Neutrinonachweis ebenso störend ist wie für den Nachweis der Teilchen der Dunklen Materie (siehe Kapitel 2). 1968 bauten Raymond Davis und seine Kollegen vom Brookhaven National Laboratory einen Detektor in die Homestake-Goldmine in Lead (South Dakota). Sie stellten einen Tank mit rund 430 000 Litern Tetrachlorethylen auf, einer Substanz, die in der chemischen Reinigung verwendet wird. Wenn ein Neutrino auf den Kern eines Chloratoms trifft, kann sich dieses Atom in radioaktives Argon umwandeln. Die Physiker zählten die erzeugten Argonatome und konnten daraus die Anzahl der Neutrinos berechnen, die von der Sonne zu uns kommen (wobei sie natürlich einrechnen mussten, dass nur ein winziger Bruchteil der Neutrinos mit dem Chlor reagiert). Sie waren überrascht, weit weniger Neutrinos zu finden als erwartet – man bezeichnete dies als „Problem der fehlenden Sonnenneutrinos“.

In der Zwischenzeit wurden die Neutrinodetektoren größer und besser: „Kamiokande“ stand in einer noch in Betrieb befindlichen Zinkmine in den Japanischen Alpen; ein weiterer war Teil des Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB)-Experiments, tief unter der Erde in der Morton Salt Mine in der Nähe von Cleveland (Ohio); außerdem gab es noch das sowjetische Baksan-Neutrinoobservatorium im Kaukasus. Am 23. Februar 1987 zeigten alle drei Detektoren etwas Unerwartetes: eine Neutrinoflut von außerhalb des Sonnensystems, ausgehend von der Supernova SN1987A, die in der Großen Magellan'schen Wolke explodiert war. Bis auf den heutigen Tag handelt es sich hierbei um die einzigen auf der Erde beobachteten, nicht von der Sonne stammenden

den Neutrinos aus dem Weltraum. Die Resultate bekräftigten das Problem der fehlenden Sonnenneutrinos.

Erst zwei noch größere Detektoren – Super-Kamiokande (Super-K), der 1996 direkt neben Kamiokande seinen Betrieb aufnahm, und das Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in einer Nickelmine in Ontario (Kanada) – konnten das Problem lösen. Aus dem Standardmodell der Teilchenphysik folgen drei Sorten von Neutrinos: Elektron-Neutrinos, Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos. Nur auf zwei dieser drei Sorten sind Super-K und SNO empfindlich, und zusammengenommen zeigen die Daten, dass sich Sonnenneutrinos auf ihrem Weg zur Erde von einer Art in eine andere Art umwandeln können. Dieses Phänomen bezeichnet man als Neutrinooszillation. Während also in der Sonne die vorhergesagte Menge an Neutrinos entsteht, sorgt die unterwegs stattfindende Oszillation dafür, dass die Detektoren – die nur Elektron-Neutrinos nachweisen können – weit weniger Neutrinos registrieren, als die Sonne verlassen haben. Mit Super-K konnte man beweisen, dass auch in der Atmosphäre Neutrinooszillationen stattfinden.

Die Neutrinooszillation bedeutete für das Standardmodell ein ernstes Problem, denn dieses Modell weist Neutrinos keine Masse zu. Nur mit einer Masse aber ist die Oszillation erklärbar. Hitoshi Murayama, theoretischer Physiker an University of California in Berkeley, war 1998 bei der öffentlichen Bekanntmachung der Ergebnisse von Super-K in Japan dabei. Später schrieb er: „Es war ein bewegender Augenblick. Im Gegensatz zu den üblichen Physikerkonferenzen gaben die Teilnehmer dem Sprecher einen stehenden Applaus. Auch ich war aufgestanden. Nachdem das Standardmodell jeden experimentellen Test seit den späten 1970er Jahren bestanden hatte, war es nun gekippt – zumindest konnte die Theorie nicht vollständig sein.“

Die Japaner hatten die Technik perfektioniert, Neutrinos mit einem zigtausend Tonnen Wasser enthaltenden, mit Photoelektronenvervielfachern (PMTs, photomultiplier tubes) ausgekleideten

Tank nachzuweisen. PMTs halten Ausschau nach dem Lichtblitz, der beim Auftreffen eines Neutrinos auf ein Wassermolekül entsteht. Normalerweise fliegt ein Neutrino ohne jede Wechselwirkung einfach durch das Wasser hindurch. Ganz gelegentlich trifft es jedoch auf den Atomkern eines Wasserstoff- oder Sauerstoffatoms, und dabei kann ein weiteres subatomares Teilchen, ein Myon, entstehen. Das geladene Myon reagiert über die elektromagnetische Wechselwirkung mit den Wassermolekülen, und da seine Geschwindigkeit größer ist als die Lichtgeschwindigkeit im Wasser, entsteht hinter ihm ein Kegel aus blauem Licht, die Tscherenkow-Strahlung (benannt nach dem russischen Physiker Pawel Alexejewitsch Tscherenkow, der dieses Phänomen zuerst beschrieben hat). Man könnte dies mit dem Überschallknall eines Flugzeugs vergleichen, das sich schneller als mit Schallgeschwindigkeit bewegt.

Schon während des Aufbaus von Super-K und SNO planten die Physiker, über die Sonne hinauszublicken. Dabei stellen sich ganz neue Herausforderungen: Viele kosmische Neutrinos, einschließlich derjenigen, die von Dunkler Materie im Herzen unserer Milchstraße erzeugt werden, haben eine höhere Energie als die Sonnenneutrinos. Zwar lassen sie sich deshalb leichter nachweisen (sie erzeugen im Wasser hellere, längere Lichtstreifen), aber ihre Anzahl nimmt mit zunehmender Energie sehr rasch ab. Für den Nachweis solcher Neutrinos benötigt man weit aus größere Wassertanks, als sie bei den üblichen Untertanddetektoren möglich sind, deren Abmessungen durch die Minen eingeschränkt sind. Wo findet man derart riesige Mengen an vollkommen reinem Wasser?

Schon in den 1960er Jahren hatte der russische Physiker Moisej Alexandrowitsch Markow, ein Poet unter den Astrophysikern, vorgeschlagen, natürliche Wasservorkommen als Neutrinodetektoren zu verwenden – statt der riesigen Wassertanks in Minen einen See oder sogar einen Ozean. Man musste nur lange Reihen von PMTs zu Wasser lassen und nach dem Tscherenkow-

Licht suchen, das die von den Neutrinos erzeugten Myonen produzieren würden. Die Idee war verlockend, allerdings gab es enorme praktische Schwierigkeiten. Insbesondere würde ein Detektor ohne die schützende Felsschicht der störenden kosmischen Strahlung ausgesetzt sein.

Wenn die kosmische Strahlung auf die Hochatmosphäre trifft, erzeugt sie Neutrinos und ungefähr ebenso viele Myonen. Diese Myonen treffen zusammen mit den atmosphärischen Neutrinos auf das Wasser, und auf jedes Neutrino, das mit dem Wasser reagiert und seinerseits ein Myon erzeugt, das dann einen Lichtblitz im Wasser hinterlässt, kommen Milliarden von Myonen aus der kosmischen Strahlung, die dasselbe tun. Befindet sich also ein Neutrinodetektor in der Nähe der Wasseroberfläche, wird er von dem Tscherenkow-Licht der Myonen aus der kosmischen Strahlung überflutet, das er nicht von dem unterschieden kann, das von Neutrinos verursacht wurde. Nicht zuletzt überstrahlt das Sonnenlicht (das in Minen kein Problem ist) das Tscherenkow-Licht. Die Lösung für beide Probleme besteht darin, in große Wassertiefen zu gehen, in die kein Sonnenlicht vordringt. Wasser verschluckt auch viele der Myonen aus der kosmischen Strahlung; am Boden eines tiefen Sees kommen tausendmal weniger Myonen an als an der Oberfläche. Doch selbst das sind noch zu viele.

Die Physiker erkannten aber, dass die Erde selbst gut abschirmt. Es dringen zwar viele Myonen durch eine kilometerdicke Wasserschicht, nicht aber durch eine ähnlich dicke Felsschicht. Also kann man den Neutrinodetektor am Grund eines Sees so positionieren, dass er nur nach Myonen von Neutrinos schaut, die von unten kommen. Kein Myon, das auf der anderen Hälfte der Erdkugel in der Atmosphäre erzeugt wurde, kann den ganzen Planeten durchdringen. Für Neutrinos ist das hingegen kein Problem, und gelegentlich trifft eines von ihnen auf einen Atomkern im Wasser oder im Seegrund. Dabei entsteht ein Myon, das dann von unten nach oben fliegt. Findet man also ein nach oben

fliegendes Myon, hat man eigentlich ein Neutrino nachgewiesen, das von der anderen Seite der Erde kam.

Alles, was man noch brauchte, war eine entsprechende Wassermenge. Mitte der 1980er Jahre wurde den Russen bewusst, dass sie über einen riesigen Tank verfügen (636 Kilometer lang und bis zu 80 Kilometer breit), der mit vollkommen sauberem Wasser gefüllt ist: den Baikalsee.

Der Baikalsee ist der tiefste Süßwassersee der Welt. Im Lauf der Zeit haben die Zuflüsse eine rund sieben Kilometer starke Sedimentschicht abgelagert, aber trotzdem ist der See noch bis zu 1,7 Kilometer tief. Diese Tiefe ist für das Neutrinoexperiment entscheidend.

An meinem ersten Morgen in Sibirien fuhren wir mit mehreren Autos über den See zum Teleskop. Doch bevor unser Jeep an Ort und Stelle ankam, hielten wir an und versammelten uns als ganze Gruppe in dem Van und einem anderen grünen Jeep. Ich wusste von der Vorliebe der Russen für starke Getränke und hatte eine Flasche guten schottischen Whisky mitgebracht, die ich mit meinen Gastgebern teilen wollte. Doch auf das nun folgende Ritual auf dem Eis um 10 Uhr morgens war ich nicht vorbereitet. Der weiße, erstarrte See erstreckte sich kilometerweit in alle Richtungen; lediglich im Nordwesten war das Ufer vergleichsweise nahe. Die Männer schlenderten um die Wagen. Die frostigen Temperaturen schien jeder anders zu empfinden – manche standen ohne Mütze herum, andere hatten Wollkappen über ihre Ohren gezogen, und dann gab es noch Ralf Wischnewski mit seiner russischen Fellmütze, die wie ein aufgeplustertes Kaninchen aussah. Er war ein deutscher Neutrinophysiker, der seit 20 Jahren zusammen mit den Russen am Baikalsee arbeitete. Wischnewski war der Grund meines Hierseins. Ich hatte den Mann mit dem rötlichen Gesicht und den angegrauten Schläfen sechs Monate zuvor in London vor dem Tate Modern Museum am Südufer der Themse getroffen. Wir waren zu einem griechischen Pub spaziert und hatten bei

einem kühlen Bier über die Baikalexpedition gesprochen. Er hatte mich auf den Brauch hingewiesen, Hochprozentiges an kalten Winterabenden mit den Gastgebern gemeinsam zu genießen.

Und nun war der Moment gekommen, abgesehen davon, dass es immer noch Morgen war. Die Russen hatten einen traditionellen Willkommenstrunk für Heinze geplant, den Vorsitzenden des Moskauer Büros der Helmholtz-Gesellschaft. Mit einer Flasche Wodka in der Hand sprang Kolja Budnew aus dem Jeep. Die breite Motorhaube wurde zum Tisch, und plötzlich stand da eine zweite Flasche Wodka und ein riesiges Glas eingelegter Gurken. Irgendjemand schnitt eine Wurst in Scheiben. Als Vegetarier war ich froh, auch etwas Brot zu sehen. Knallgelbe, -blaue und -rote Kunststoffbecher wurden herausgeholt, und bald hatte jeder von uns einen mit Wodka gefüllten Becher in der Hand. Budnew tauchte einen Finger hinein und schnippte ein paar Tropfen Wodka auf das Eis – eine Opfergabe an Burkhan, den großen Geist des Baikalsees. Andere folgten seinem Beispiel, bevor sie ihren Wodka tranken, und etwas zögerlich schloss ich mich ihnen an. Ich wollte neben meinem Jetlag (ich hatte gerade acht Zeitzonen überflogen) nicht auch noch betrunken werden.

Wir bestiegen wieder unsere Wagen und fuhren entlang des Nordwestufers zum Neutrinooteleskop. Ein altes Eisenbahngleis aus dem Jahre 1904 schlängelte sich die bergige Uferlinie entlang. Viele Jahrzehnte gehörte es zur Transsibirischen Eisenbahn. 1950 wurde dann in der Nähe von Irkutsk ein Wasserkraftwerk errichtet und dafür die aus dem Baikalsee abfließende Angara aufgestaut. Dabei wurden mehrere Abschnitte der Eisenbahngleise überflutet. Auf der anderen Seite der Berge wurden neue Schienen gelegt, wodurch ein großer Teil der hundert Jahre alten Ingenieurskunst nahezu überflüssig wurde, obwohl die Gleise teilweise immer noch von lokalen Zügen benutzt werden. Der Stützpunkt des Neutrinoexperiments ist von diesen Zügen abhängig: Sie bringen sowohl die Ausrüstung als auch und besonders die Lebensmittel. Manchmal fährt jemand im Winter rund

40 Kilometer über das Eis zur nächstgelegenen Stadt und kauft einige Vorräte ein, doch der Zug ist die eigentliche Lebensader und gleichzeitig die einzige Anbindung, wenn der See nicht gefroren ist. Als man vor ungefähr fünfundzwanzig Jahren mit diesem Experiment begann, bauten die Wissenschaftler zwei der früheren Bahngelände für ihre Zwecke um. Das Gebäude bei Kilometer 106 (was sich auf die Entfernung bis Irkutsk bezieht) wurde zur Uferstation. Hier befindet sich der Kontrollraum mit der gesamten Elektronik, und hier wohnen mehrere Mitarbeiter während des zweimonatigen Winteraufenthalts. Das andere Gebäude bei Kilometer 107 beherbergt jetzt die Kantine und den Sitz von Grigori Domogatskij, Sprecher des Experiments. Immer noch halten Züge an den einfachen Holzbahnsteigen, doch mit der vornehmen Eleganz der Transsibirischen Eisenbahn vor hundert Jahren können sie nicht mithalten.

Vier Kilometer vom Ufer in Höhe des Gebäudes 106 entfernt befindet sich das Eiscamp des Neutrinooteleskops. Vom Ufer aus wirkt es wie eine Reihe schwarzer Punkte auf einem weißen Feld. Die hohen, schneebedeckten Berge am gegenüberliegenden Ufer bilden eine beeindruckende Kulisse. Wenn man sich dem Camp nähert, verwandeln sich die Punkte in kleine Hütten, Kräne, Jeeps, Lastwagen, einen Generator und schließlich auch Menschen. Als ich das Camp besuchte, trug nahezu jeder einen graublauen Overall, mit Ausnahme eines Mannes, der sich vermutlich so angestrengt hatte, dass er mit freiem Oberkörper arbeitete. Alle saßen eng zusammengedrängt um ein quadratisches Loch im Eis. Mit einer Winde wurde gerade eine Kette aus der Tiefe emporgezogen. An ihrem oberen Ende befanden sich mehrere große, hohle Bälle, die als Bojen dienten und nun durcheinander auf dem Eis lagen. Der Rest der Kette hing noch im dunklen Wasser; unten befestigt waren die PMTs, die zu Reparaturarbeiten und Nachrüstungen an die Oberfläche gebracht werden sollten.

Das Neutrinooteleskop im Baikalsee besteht aus insgesamt elf Ketten mit PMTs, jeweils mit einer große Boje am oberen Ende.

Unten befestigt ist jeweils ein Gegengewicht, das in einer Tiefe von nahezu 1,1 Kilometern im Wasser schwebt (an dieser Stelle ist der See 1,4 Kilometer tief; dort könnte man das Empire State Building dreimal übereinanderstapeln, ohne dass auch nur das Dach aus dem Wasser ragte). In ungefähr zehn Metern Tiefe sind nochmals kleinere Bojen an den Ketten befestigt. Das ganze Jahr über halten 228 PMTs Ausschau nach Tscherenkow-Kegeln von Neutrinos und überwachen dabei 40 Megatonnen Wasser. Jeden Winter muss zunächst das Fiscamp aufgebaut werden, und anschließend muss sich das Team auf die Suche nach dem Teleskop begeben, dessen oberer Teil im Verlaufe eines Jahres etwas abdriften kann. Dazu muss ein Taucher im eiskalten Wasser nach den kleinen Bojen Ausschau halten. Dann brechen die Forscher oberhalb der Ketten (deren Lage relativ zum Teleskop sie kennen) Löcher ins Eis und hängen die Kettenenden an eine Winde, die sie dann hochzieht. Insgesamt bleiben dem Team zwei Monate Zeit, um die normalen Wartungsarbeiten durchzuführen, die Ketten wieder ins Wasser zu lassen und das Camp abzubauen, bevor das Eis zu brechen beginnt. Mittlerweile haben sie ihre Technik vervollkommen. Nur einmal in den zwei Jahrzehnten des Betriebs gab es mit einer der Ketten ein Problem: 1994 brach ein angerostetes Metallkabel und trennte eine Boje ab, wodurch eine Kette zum Grund sank.

Budnew hat sie wieder hochgeholt. In diese Tiefen zu tauchen war vollkommen unmöglich, doch Budnew wusste, dass die Kette – trotz des Gegengewichts, das nun am Grund des Sees lag – immer noch senkrecht nach oben zeigen würde, da die PMTs einen gewissen Auftrieb erzeugen. Seine Idee war genial: Er bastelte einen Propeller, band ihn an das Ende eines langen Seils und ließ ihn zu Wasser. Der Winkel der Propellerblätter war so gewählt, dass sich der Propeller drehte, sobald er im Wasser hinabsank, und dabei beschrieb er einen großen Kreis. Mit diesem einfachen Hilfsmittel strich Budnew systematisch durch das Wasser. Ziemlich bald verhakte sich der Propeller mit der freischwebenden

Kette, und das Team konnte die Kette hochziehen. Wischnewski erzählte die Geschichte von Budnews heroischer Tat, während wir auf dem Eis standen, umgeben von den zähesten Physikern, denen ich je begegnet bin. Die Bezeichnung „Experimentalphysiker“ gewinnt bei diesen eisigen Temperaturen, die leicht auf $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ fallen können, eine ganz neue Bedeutung.

Meine Bewunderung für diese Männer wuchs noch mehr, als ich sah, wie hart ihre Lebensbedingungen waren. Wischnewski hatte mich schon in London gewarnt, dass das Leben hier schwierig sei. Die meisten Physiker wohnten in kleinen, dreieinhalb mal sieben Meter großen Kajüten, immer zu zweit. Andere schliefen in Ftagenbetten in der Uferstation, mitten zwischen Werkbänken, die mit Computern, Elektrogeräten, Drähten und Kabeln vollgestopft waren. Sie arbeiteten sehr lange, manchmal von morgens bis weit nach Mitternacht. Es gab kein fließendes Wasser, das heißt, zwei Monate lang konnte man nicht duschen. Das Trinkwasser wurde jeden Morgen aus einem Eisloch am Ufer geholt. Der Baikalsee ist so sauber, dass man das Wasser direkt trinken kann. Genau diese Eigenschaft macht ihn für die Neutrino-physik so wichtig. Die Toiletten bestanden aus einfachen, von einer hölzernen Kabine umgebenen Gruben im Boden. Die extreme Kälte half zwar gegen den Gestank, doch durch den warmen Urin wurde er trotzdem nach oben getragen.

Es gab hier allerdings einen Luxus: die *Banja*, eine traditionelle russische Sauna. Jeder nutzte sie – nicht nur, um sich zu säubern, sondern hauptsächlich, um den Stress der Arbeit an diesem rauen, wenn auch schönen Ort abzustreifen. „Sie ist viel wichtiger, als man sich vorstellen kann“, sagte Wischnewski über die *Banja*. „Sie ist der Mittelpunkt des wöchentlichen Lebensrhythmus.“ Die nackten Männer sitzen in einer Hütte, gießen Wasser über heiße Steine, um Dampf zu erzeugen und schlagen sich gegenseitig mit belaubten Birkenzweigen. Dann gehen sie hinaus in die eisige Kälte, übergießen sich mit kaltem Wasser oder reiben sich mit Eis ein. Das soll die Haut durchbluten, die Poren öff-

nen, Giftstoffe werden abgeben und Krankheiten sollen geheilt werden. Heinze, der deutsche Geologe, mit dem ich das Zimmer in einer Blockhütte teilte, behauptete steif und fest, er sei einmal mit einem verstimmtten Magen in die *Banja* gegangen und habe sich am Schluss wieder vollkommen gesund gefühlt.

Eines nachmittags wehte ein unangenehmer Wind. Die Einheimischen nennen ihn *Kultuk* nach dem Dorf an der Südwestseite des Sees. Nun mussten alle das offene Eis verlassen und zur Uferstation zurückkehren. Dort machten es sich einige in der Küche bequem, die aussah, wie man es von einer Studenten-WG an einem College erwartet hätte. Die vielen Jahre hatten an den Kaffeetassen ihre Spuren hinterlassen. Auf den Regalen lagen verbeulte und verfärbte Töpfe und Pfannen herum. Irgendjemand kochte Wasser für einen Tee. Dankbar nahm ich eine Tasse an, und plötzlich stand sogar eine Dose mit süßer, cremiger Kondensmilch auf dem Tisch. „Nach einer Weile sehne ich mich nach Schokolade und Zucker“, meinte einer der Wissenschaftler. „Ich glaube, es ist der Stress“, fügte er hinzu, als ob er sich für seine Gelüste entschuldigen müsste. Ein anderer Wissenschaftler schaute mit traurigem Blick auf die Milchdose. Gezuckerte Kondensmilch war sein Kindertraum, als er noch in Sibirien in der Stadt Tomsk lebte. „In Moskau gab es so etwas“, sagte er, „aber nicht in Tomsk.“

Zum Abendessen musste ich später hinüber zur Kantine bei Kilometer 107 laufen. Das fiel mir nicht leicht, denn ich war mitten im sibirischen Winter mit „europäischen Sommerschuhen“ aufgetaucht, wie Wischnewski verwundert feststellte. Nun musste ich im Dunkeln über den See. Ich folgte Wischnewski. Solange wir noch am Ufer waren, konnte ich in Autospuren treten, wo das Eis matschig geworden und aufgeraut war. Doch auf dem See war das Laufen für mich nahezu unmöglich. Meine glatt besohlenen Schuhe rutschten unentwegt. Nach ein paar Tagen hatte ich gelernt, mir frischen Schnee zu suchen, der wenigstens etwas Halt bot, doch an diesem ersten Abend war ich vor Angst wie

gelähmt. Zum Glück fuhr ein Jeep vorbei und Wischnewski, der meine missliche Lage bemerkt hatte, bat den Fahrer, mich zur Kantine mitzunehmen. Der Fahrer war Igor Belolaptikow, ein großer, bärtiger Physiker vom Kernforschungsinstitut in Dubna bei Moskau. Später beim Abendessen saß ich mit ihm zusammen und war froh, als er mir eine Fahrt zurück zu seiner kleinen Kajüte anbot, wo wir uns über Neutrinos unterhalten konnten.

Seine Unterkunft war sehr einfach. Auf der einen Seite gab es zwei Etagenbetten, und in der Mitte befand sich ein langer Tisch. Überall stand Elektronik herum – Computer, Modems, Funkgeräte, Drähte. Belolaptikow teilte seine Kammer mit Andrej Panfilow vom Kernforschungsinstitut in Moskau. Wir unterhielten uns über eine Stunde lang, nur unterbrochen von einem honigsüßen Tee, den Panfilow zubereitet hatte. Konstantin Konischew, den ich vorher mit entblößter Brust auf dem See gesehen hatte und der sich nun in warme Kleider gehüllt hatte, gesellte sich zwischendurch immer wieder zu uns, besonders wenn die anderen Probleme mit ihrem Englisch hatten.

„Meine Aufgabe ist es, die Myonen und Neutrinos zu rekonstruieren“, sagte Belolaptikow und lachte bei dieser Enthüllung wie ein kleines Kind. Diese Rekonstruktionen sind ziemlich schwierig. Hunderte von PMTs suchen am Grunde des Baikalsees nach dem Tscherenkow-Licht. Wenn ein Myon, das von einem Neutrino erzeugt wurde, durch das Wasser fliegt, erreicht das Licht seines Tscherenkow-Kegels verschiedene PMTs zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die Kunst besteht darin, sämtliche Informationen der PMTs zu sammeln und daraus den Weg des nach oben fliegenden Myons zurückzurechnen. Daraus kann man dann wiederum den Weg des ursprünglichen Neutrinos ermitteln. Die Möglichkeit, die Herkunftsrichtung eines Neutrinos zu rekonstruieren, unterscheidet ein Neutrino-teleskop von einem einfachen Neutrino-detektor. Ein Teleskop sollte die Neutrinoquelle am Himmel identifizieren können, und das Instrument im Baikalsee kann dies mit einer Winkelauflösung von $2,5^\circ$. Das

bedeutet, es kann die Herkunftsrichtungen von zwei Neutrinos am Himmel unterscheiden, wenn ihr Abstand größer ist als fünf Vollmondscheiben. Bisher hat das Baikal-Teleskop, ebenso wie alle anderen Neutrino-Teleskope, die sich in natürlichen Gewässern oder Eisreservoirs befinden, nur atmosphärische Neutrinos beobachtet. Jeder hier wartet auf den Tag, an dem ein energiereiches Neutrino aus dem Weltraum seine Anwesenheit in dieser kleinen Ecke des Sees zu erkennen gibt.

Belolaptikow erinnert sich noch an sein erstes Neutrino – tatsächlich das erste Neutrino für den Detektor im Baikalsee. „Es war großartig“, sagte er. „Hier, schau her.“ Er lehnte sich über sein Etagenbett und nahm ein Stück Papier von der Wand – den Ausdruck der Bahnkurve von einem nach oben fliegenden Myon, rekonstruiert aus dem Nachweis seines Tscherenkow-Kegels durch die PMTs entlang seines Weges. „Dies ist das erste – das erste richtige, das wir rekonstruiert haben.“ Teenager bekleben ihre Wände mit Bildern von Stars oder Pin-up-Girls, und Belolaptikow hatte eben diese Zeichnung von einem Ereignis aus dem Jahre 1993. Warum auch nicht? Es war das erste Neutrino, das ein Mensch jemals in einem natürlichen Gewässer gesehen hatte. Ihm und seinen Kollegen war diese Rekonstruktion gelungen, und damit hatten sie den Baikalsee-Detektor bekannt gemacht.

Solche wissenschaftlichen Erfolge sind der Lohn für die anstrengende Arbeit. Die „Expedition“ – so nennt das Baikal-Team die zweimonatigen Unternehmungen – beginnt jedes Jahr mit der Errichtung einer Eisstraße von Listwjanka zum Eiscamp. Mitte Februar, wenn der See wirklich zugefroren ist, begeben sich ein paar Leute von Listwjanka aus auf eine Erkundungstour und untersuchen, an welchen Stellen das Eis bereits dick genug ist, um es zu befahren. Alle paar Kilometer bohren sie ein Loch in das Eis und entnehmen eine Probe, einfach nur um sicher zu sein, dass es dick genug ist. Dann stellen sie in das Loch eine kleine Tanne, einen alten Weihnachtsbaum, und das Wasser gefriert um den Stamm und hält ihn fest auf dem Eis.

Sobald dieser mit Bäumen markierte Weg über das Eis die 40 Kilometer von der Stadt bis zum Ort des Experiments fertiggestellt ist, begeben sich die Wissenschaftler auf die Suche nach dem Teleskop tief unten im Wasser. In dem Jahr, als ich das Camp besuchte, war das Eis vergleichsweise glatt und damit die Arbeit entsprechend einfach. Doch Belolaptikow erinnerte sich an ein besonders grauenvolles Jahr mit ungewöhnlich intensivem Schneefall. Überall waren die Eisplatten gegeneinandergesprengt worden und hatten riesige Aufwerfungen aus unüberwindbar hohen Eisblöcken erzeugt. Eines Tages befand sich Belolaptikow in der Uferstation, während die anderen vier Kilometer vom Ufer entfernt oberhalb des Teleskops Löcher in das Eis bohrten. Plötzlich erhielt er einen Funkruf: „Es war zu großen Zusammenstößen von Eisplatten gekommen – sehr gefährlichen Zusammenstößen“, sagte Belolaptikow.

„Innerhalb einer Stunde hatte sich das Eis bewegt“, erinnerte sich Konischew, einer der gestrandeten Physiker. An manchen Stellen hatte es Risse von zwei bis drei Metern Breite gegeben, die nun die Leute im Eiscamp von der Uferstation trennten. Die Gruppe fuhr acht Stunden die Risse entlang und suchte nach einem Rückweg. „Wir fanden schließlich eine Stelle, wo es aussah, als ob wir hinüberkommen konnten, doch wir hatten alle ein schlechtes Gefühl“, sagte Konischew. „Also haben wir Igor gerufen.“ Belolaptikow untersuchte den Riss von der Uferseite aus und fand eine andere Stelle, die sicherer erschien. „Ich musste entscheiden, und ich entschied, dass dieser Ort sicher war“, erinnerte er sich. „Es war wirklich schlimm.“ Doch Belolaptikows Intuition erwies sich als richtig. Das Eis hielt den Belastungen stand und alle erreichten sicher das Ufer.

Draußen war die Temperatur drastisch gefallen. Für diesen Abend waren die Wissenschaftler mit ihrer Arbeit fast fertig. Wischnewski hatte alle auf einen Drink zur Uferstation eingeladen, und ich sollte meine Flasche Chivas Regal mitbringen. Panfilow gesellte sich zu uns, ebenso wie Wassili Prosin, ein

schmächtiger, aber gut durchtrainierter 59-jähriger Physiker aus Moskau, der die 40 Kilometer von Listwjanka zur Uferstation regelmäßig auf Skiern zurücklegte. Außerdem gesellten sich zu unserer Gruppe noch Prosins schlaksiger Kollege Leonid Kusmischew, die beiden Tartaren Wladimir Aynutdinow und Raschid Mirgasow und schließlich noch ein deutscher Student namens Eike Middell. Der Whisky war eine willkommene Abwechslung zum traditionellen Wodka, und Aynutdinow beschloss, dass man guten Whisky nur „on the rocks“ trinken dürfe. Also ging er hinaus, um etwas Eis vom See zu holen, er konnte jedoch den Rest von uns nicht dazu überreden, bei dieser Kälte mitzukommen. Schließlich kam er mit einigen erbärmlich aussehenden Klumpen zurück, die er von den Eiszapfen vom Dach der Uferstation abgebrochen hatte. Während der dritten Runde gestanden Prosin und Kusmischew, dass sie in ihrer Jugend ganz begeisterte Anhänger von Bollywood gewesen seien, und Prosin und ich begannen *Awaara Hoon* („Ich bin ein Vagabund“) aus einem Hindu-Film aus dem Jahre 1960 zu singen. Wischnewski schien verwirrt und konnte diesen kulturübergreifenden Austausch nicht nachvollziehen.

Der Whisky war bald geleert. Wischnewski brachte eine Flasche Wodka und gab jedem ein Glas. Wie auf ein Zeichen tauchte jeder einen Finger in sein Getränk und schnipste ein paar Tropfen Wodka auf den Boden (anscheinend machten sich die Götter nicht viel aus Whisky). Die Nacht wurde benebelter, obwohl ich mir den Bauch vollgeschlagen hatte, um mithalten zu können. Die Unterhaltung floss dahin und wechselte oft zwischen Russisch und Englisch, und manchmal sogar zu Italienisch und Deutsch. Den letzten Toast an diesem Abend sprach Wischnewski auf den Baikalsee aus.

Die folgenden zwei Tage glitten vorbei, doch selbst in dieser kurzen Zeit stellte sich ein Rhythmus ein. Morgens war der erste Gang hinunter zum See, um aus einem Loch im Eis einen Eimer

voll Trinkwasser zu schöpfen. Anschließend ging es zurück in die Hütten zu einem Kaffee mit Kondensmilch und Honig, wobei das Loch in der Dose immer mit Papier verschlossen wurde, um „kleine Tiere“, wie Wischnewski Insekten nannte, am Eindringen zu hindern. Und dann kam, morgens um zwei Uhr, mein erster Besuch im Nebengebäude. Schon als ich mich in der ersten Nacht schlafen legte, hatte mich der Gedanke daran beunruhigt. Immerhin gingen die Temperaturen draußen auf $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ zurück. Doch es half nichts. Ich rollte mich aus meinem russischen Militärschlafsack und zog mir Schichten von Thermowäsche, T-Shirts und Jacken über, dazu dicke Socken und Schuhe. Als ich aus meiner vergleichsweise warmen, beheizten Hütte nach draußen in den Winter trat, wehte mir eine grausige Kälte ins Gesicht. Die Reifenspuren der Jeeps, die tagsüber den Boden matschig gefahren hatten, waren hart gefroren und ich stapfte darin entlang. Der zweiminütige Sparziergang erschien mir wie eine eigene kleine Expedition. Innerhalb weniger Tage wurde auch das zur Gewohnheit und die Kälte einfach eine Gemütsverfassung. Gegen Ende meines Besuchs ging ich in Socken und Sandalen hinaus.

Der frühe Morgen hatte etwas Überirdisches. Aus meiner Hütte hatte ich eine klare Sicht über den See, dessen schneeweiße Stille nur durch die blanken Eisplatten unterbrochen wurde, die im Vergleich zum Schnee dunkler aussahen. Mit wurde bewusst, dass ich auf einen See schaute, der mehr Wasser enthält, als alle fünf Großen Seen Nordamerikas zusammengenommen, einen See mit einer Oberfläche, die größer ist als Belgien. 80 % des russischen Süßwassers befindet sich hier. Selbst in großen Tiefen ist das Seewasser noch reichlich mit Sauerstoff angereichert und bietet damit besonders günstige Lebensbedingungen.

Bei einem Besuch im Baikalsee-Museum in Listwjanka erfuhr ich, weshalb dieses Gewässer für die Astrophysik so wertvoll ist. Es sind die gefräßigen Schalentiere, die in großen Tiefen leben. Nichts Totes oder Sterbendes überdauert hier länger als wenige

Tage. Wenn die Fischer ihren Fang zu lange in den Netzen lassen, drängen die Schalentiere durch den Mund und die Kiemen in den Fisch und fressen ihn von innen her auf. Diese Viecher reinigen den See von toter Materie und halten ihn unglaublich klar, insbesondere in großen Tiefen. Trübe Gewässer hätten die Suche nach Myonen nahezu unmöglich gemacht.

Budnew lebt in Irkutsk, und für ihn war es die 26. Neutrinoexpedition. Doch auch zu anderen Zeiten im Jahr besucht er den Baikalsee. „Das Wasser ist wirklich einzigartig“, sagte er. „Für Russland ist es sehr wichtig, den Baikalsee zu schützen.“ Das geschieht leider nicht immer. Seit den 1960er Jahren gibt es in der Stadt Baikalsk eine Papier- und Zellstofffabrik, die ihre Ecke des Sees jahrzehntelang verschmutzte. Eine Woche vor meiner Ankunft fand in Irkutsk eine Protestaktion gegen eine Ölpipeline statt, die entlang des nördlichen Ufers gebaut werden sollte. Lokalpolitiker und Wissenschaftler hatten sich zusammengetan, um gegen diesen Plan zu demonstrieren, der ihrer Meinung nach in einem seismisch derart aktiven Gebiet fehl am Platz war. Eine Ölkatastrophe würde den See zerstören. Doch aus Moskau war niemand erschienen. Budnew, der leicht untersetzte Physiker mit seinen blauen Augen und den dicken, rauen Fingern, die schwere Arbeit gewohnt waren, senkte seine Stimme, wenn er über den See sprach. „Wenn man die Biologie des Baikalsees zerstört, dann gibt es keine Möglichkeit mehr, das Wasser zu reinigen“, sagte er. Obwohl er nur über die Ökologie des Sees sprach, zeigte sein ganzes Verhalten, dass er zu diesem ertümlichen, unberührten Gewässer eine weitaus größere Verwandtschaft spürte.

Außer auf den See war Budnew auch stolz auf den Detektor, der den Weg für eine ganz neue Technologie der Unterwasser-Neutrinoteleskope gebahnt hatte. Durch eine Ironie des Schicksals verdankte die Gruppe diese Ehre teilweise der sowjetischen Invasion in Afghanistan. In den 1970er Jahren plante ein internationales Gemeinschaftsunternehmen, an dem unter anderem Amerikaner und Russen beteiligt waren, das „Deep Underwater

Muon and Neutrino Detection Project“ (DUMAND) im pazifischen Ozean vor der Küste von Hawaii. Nachdem jedoch das sowjetische Militär 1979 in Afghanistan einmarschiert war, zerbrach die Partnerschaft. Die amerikanische Regierung drohte, ihren Wissenschaftlern die finanzielle Unterstützung zu entziehen, sollten sie ihre Zusammenarbeit mit den Russen nicht beenden. So sahen sich die Gruppen gezwungen, getrennte Wege zu gehen. Die Russen wandten sich dem Baikalsee zu, während die Amerikaner unter der Führung von John Learned von der Universität von Hawaii im Pazifik blieben. Im Jahre 1993 schließlich traf das DUMAND-Projekt ein Unglück: Den Wissenschaftlern war es gelungen, eine Kette mit PMTs am Boden des Pazifik in einer Tiefe von 4,8 Kilometern zu platzieren. Doch kurz darauf gab es in der Kette einen Kurzschluss, und die Verbindung zu den Geräten brach ab. Raue Winde und Wellen machten die Sache schwierig und schließlich, im Jahre 1995, strich das US-Energieministerium sämtliche finanziellen Mittel. Die Russen bauten weiter an ihrem Teleskop im Baikalsee und nahmen es 1993 in Betrieb als damals einzigen Detektor seiner Art.

Das hat sich mittlerweile geändert. Europäische Physiker begannen mit der Errichtung ähnlicher Detektoren im Mittelmeer, und ein neues amerikanisch-europäisches Team ging Mitte der 1990er Jahre an den Südpol, um dort AMANDA, das „Antarctic Muon And Neutrino Detector Array“, aufzubauen. Gleichzeitig legten sie den Grundstein für IceCube, den größten Neutrino-detektor der Welt. Mehrere deutsche Physiker, die ursprünglich am Baikalsee gearbeitet hatten, gesellten sich zu der Gruppe am Südpol. Einige Jahre verbrachte auch Wischnewski teilweise in der Antarktis, bevor er sich entschloss, ausschließlich für das Baikalseeprojekt zu arbeiten. Die Detektoren am Südpol suchen nach dem Tscherenkow-Licht von Myonen, die auf das Eis treffen, und IceCube wird einmal einen Kubikkilometer Eis auf der Suche nach den flüchtigen Lichtblitzen überwachen können. Die Neuerungen am Baikalsee, einschließlich der Arbeiten von Belo-

laptikow zur Rekonstruktion der Myonenbahnen, hatten großen Einfluss auf die ersten Schritte in der Antarktis. Einige Monate später sollte ich mich am Südpol wiederfinden und mich fragen, ob diese Detektoren vielleicht die ersten Neutrinos aus dem Weltraum nachweisen werden.

Trotz aller politischer Wirren nach dem Sturz der Sowjetunion hat die Gruppe am Baikalsee durchgehalten – fest davon überzeugt, dass der See ein ganz besonders geeigneter Ort ist, um nach Neutrinos zu suchen. Auch wenn das Eis der Antarktis noch reiner ist als das Wasser des Baikalsees, hat Wasser doch einen großen Vorteil: Im Vergleich zu Eis kann sich Licht darin rund zehnmal weiter ausbreiten, bevor es gestreut wird. Erwischt man die Photonen, bevor sie gestreut werden, kann man ihren Ursprungspunkt genau bestimmen. Erwischt man sie erst nach mehrmaliger Streuung, wird die Bestimmung ihrer ursprünglichen Richtung sehr viel schwieriger. Das bedeutet, im antarktischen Eis benötigt man wesentlich mehr PMTs, um alle nötigen Informationen zu sammeln, aus denen man die Richtung der von den Neutrinos erzeugten Myonen berechnen kann. In den Gewässern des Baikalsees kommt man mit einer weniger dichten Anordnung von PMTs aus. Ein Detektor für die Überwachung von einem Kubikkilometer wäre hier vermutlich billiger, sowohl in der Konstruktion als auch der Wartung, als der Detektor, der nun am Südpol gebaut wird.

Der Sprecher des Baikal-Projekts, Grigorij Domogatski, machte diesen Punkt deutlich, als wir an einem Nachmittag zusammen neben einem prasselnden Feuer in seiner Hütte saßen. Domogatski rauchte ununterbrochen filterlose russische Zigaretten. Sein Englisch war sehr holprig, und er hatte die Angewohnheit, mit seinen Fingern auf dem Tisch zu trommeln oder zu schnipsen, wenn er nach den richtigen Worten suchte. Trotz seines rasplenden Raucherhustens, der ihn mitten im Gespräch überfallen konnte, argumentierte er leidenschaftlich dafür, den größten Neutrinodetektor im Baikalsee zu bauen.

Die Amerikaner und ihre europäischen Partner geben 270 Millionen US-Dollar für IceCube aus, und Domogatski meinte, schon ein Zehntel davon würde für einen entsprechenden Detektor in Sibirien reichen. Abgesehen von dem Vorteil, dass man weniger PMTs zum Nachweis der energiereichen Neutrinos benötigen würde, betonte Domogatski, dass nur ein Detektor auf der Nordhalbkugel Neutrinos aus dem Zentrum unserer Galaxie nachweisen könnte.

„Man sieht aber doch das Zentrum der Milchstraße vom Südpol aus“, warf ich etwas erstaunt ein.

„Das ist richtig. Aber nicht die Neutrinos,“ meine Domogatski mit dem sanft triumphierenden Ton eines Dozenten, der recht behalten hat. Natürlich! Neutrinodetektoren sehen nur die Neutrinos, die durch die Erde gekommen sind. Optische Teleskope können das Zentrum der Milchstraße zwar nur von der südlichen Erdhalbkugel aus untersuchen, doch die Neutrinos aus dem Herzen unserer Galaxie können lediglich die Detektoren im Baikalsee und im Mittelmeer – vor der französischen, italienischen und griechischen Küste – sehen. Um unser galaktisches Zentrum untersuchen zu können, bräuchten die Physiker also einen Neutrinodetektor von der Größe von IceCube auf der nördlichen Halbkugel. Für die Suche nach Dunkler Materie ist das eine Voraussetzung.

Domogatski argumentierte weiter, der Baikalsee sei das beste Gewässer für einen solchen Detektor, weil man sich nicht mit tiefen Wasserströmungen herumschlagen müsste, wie beispielsweise im Mittelmeer. „Hier gibt es keine Strömungen. Der Baikalsee ist wie ein Aquarium“, meinte er. Außerdem benötigen die Wissenschaftler im Mittelmeer Schiffe, mit denen sie ihre PMT-Ketten ins Meer lassen können, und ferngesteuerte Unterwassergeräte, um sie wieder nach oben zu holen, was das ganze Unternehmen sehr teuer macht. Doch dann fügte Domogatski mit einem Seufzer hinzu: „Es ist nicht leicht, die Leute zu überreden, mitten im Winter in Sibirien zu arbeiten, wenn die Alternative das sonnenverwöhnte Mittelmeer ist.“

Während dieser Unterhaltung machte Domogatski Tee und verteilte Datteln, Rosinen, Kekse und Nüsse. Fir rauchte unentwegt, trotz seines Hustens. Sein stark zerfurchtes Gesicht zeigte die deutlichen Spuren von 40 Jahren Physik, von denen er die meisten an diesem unwirtlichen Ort verbracht hatte. Nun wollte er die Verantwortung langsam abgeben. Die Gruppe hatte sich überlegt, dass ihr Teleskop – acht Ketten mit insgesamt 192 PMTs innerhalb von 21 Metern um den Mittelpunkt, drei weitere Ketten mit insgesamt 36 PMTs innerhalb von 100 Metern um den Mittelpunkt – zur Keimzelle eines sehr viel größeren Teleskops werden könnte. Würde man ähnliche Zellen wie sechseckige Fliesen auf einem Fußboden zusammenlegen, könnten sie eine Gigatonne (einen Kubikkilometer) Wasser überdecken. Dafür bräuchte man lediglich 25 Millionen US-Dollar, also eine Größenordnung weniger als der Betrag, der für die Projekte im Mittelmeer oder am Südpol ausgegeben werden soll.

Das Feuer erlosch langsam und draußen ging die Sonne unter.

„Ich hoffe, dieses Projekt mit in Gang bringen zu können“, meinte Domogatski. „Doch die eigentliche Arbeit sollte dann von jüngeren Leuten erledigt werden.“

Wir traten nach draußen, wo ich ein Bild von dem stattlichen Grandseigneur der zeitgenössischen russischen Physik vor seinem geliebten See machte. Anschließend ging ich von Kilometer 107 die Zugschienen entlang zurück zur Uferstation bei Kilometer 106. Die dunklen Umrisse des hölzernen Kantinenbaus hoben sich gegen ein orange-rosafarbenes Abendrot ab. Licht fiel durch die Türen nach draußen. Irgendwo in der Ferne hinter mir hörte ich das lange, tiefe Signal eines Zugs.

Eines hatte ich bisher noch nicht unternommen: Wischnewski hatte gemeint, mein Besuch müsse durch eine Nacht auf dem Eis abgerundet werden. Ich könnte in einer der Hütten im Eiscamp schlafen; ich hatte zugestimmt. Doch dann hatte er wie nebenbei bemerkt, dass sich das Eis hebt und senkt. Trotz der zugefrore-

nen Oberfläche ist das Wasser darunter in Bewegung und stößt gegen die Eisdecke. Manchmal kann die gesamte Eisplatte unter dem Camp ruckeln und taumeln. Wenn einem das zum ersten Mal während der Nacht passiert, ist man so erschrocken, dass man aus seinem Schlafsack springt und sofort zum offenen Eis läuft. Wischnewski versicherte mir, es könne eigentlich nichts Ernsthaftes passieren, solange nicht ein Erdbeben der Stärke 6 dieses Gebiet heimsuche. Beruhigt hat mich das nicht gerade.

Während ich die schneebedeckten Zugschienen zurückwanderte, immer darauf achtend, auf die hölzernen Schwellen zu treten, musste ich mir eingestehen, Angst zu haben. Der Gedanke an knirschendes, dröhnendes Eis, das sich im Schlaf unter mir hin- und herbewegt, erschien mir unerträglich. Doch als ich bei der Uferstation ankam, war bereits alles vorbereitet. Jemand im Eiscamp hatte eingewilligt, mir sein Bett für eine Nacht zu überlassen. Jetzt gab es kein Zurück mehr.

Als die Nacht hereinbrach, brauste Wischnewski mit mir über das Eis zum Camp. Er fuhr einen nagelneuen Japaner mit Allradantrieb, den er von irgendwem geliehen hatte – mal etwas anderes als die russischen Militärjeeps. Mit Taschenlampen in der Hand legten wir die letzten Meter zurück, denn hinter einer bestimmten Markierung waren keine Fahrzeuge mehr erlaubt. Der sichere Tritt, den ich mir in den letzten Tagen angeeignet hatte, war verschwunden. In der Dunkelheit hatten die Kräne und Winden etwas Unheilvolles. Wischnewski klopfte an die Stahltür einer der Hütten, und ein junger Doktorand namens Alexej Kochanow ließ uns herein. Er meinte, ich solle mir keine Sorgen machen; kleine Erdbeben gebe es ständig. Nicht gerade ermutigend!

Ich kroch in meinen Schlafsack und äußerte nochmals meine Bedenken. Kochanow meinte nur, dass er den Klang von knirschendem Eis unter ihm entspannend finde. Offenbar war er schon zu lange hier. Doch dann erklärte er mir die Sache. Das Knirschen bedeutet, dass die Eisschicht wirklich fest ist. Es ist der Klang des Eises als Reaktion auf die Wasserbewegungen da-

runter. Erst wenn man das Knirschen nicht mehr hört, gibt es Grund zur Beunruhigung. Dann sind die Spalten zwischen den Platten so groß, dass das Eis genügend Spiel hat. In diesem Fall sollte man eigentlich nicht mehr auf dem Eis sein.

Plötzlich war der protestierende Ton des Eises wie Musik in meinen Ohren. Die ganze Nacht über dröhnte es in einer Weise, wie ich es noch nie gehört hatte, und allein die Vielfalt der verschiedenen Laute war erstaunlich. Von weit her klangen die Geräusche wie dumpfe Gewehrschüsse, Kanonenschläge oder zuknallende Stahltüren. Je näher die Geräusche waren, umso klarer und schärfer tönnten sie, eher wie der Knall einer Peitsche. Manchmal hielt das Dröhnen für mehrere Sekunden an, und manchmal war es direkt unter uns – ein Spalt, der durch das Eis zuckte. Irgendwann war ich eingeschlafen.

Um fünf Uhr morgens hob sich das Eis. Es war die einzige stärkere Bewegung, die ich in dieser Nacht verspürte. Schlafen konnte ich nicht mehr, und so zog ich meine Kleidungsschichten über, meine Socken und Schuhe, und ging nach draußen. Es war immer noch dunkel. Kein Eisschlund öffnete sich, um mich zu verschlingen. Feine Risse liefen kreuz und quer über die Oberfläche. Sie mussten in dieser Nacht entstanden sein, denn noch hatte der Schnee sie nicht bedeckt. Sie waren wieder zugefroren und zeigten vielschichtige Muster. Im schwachen Licht meiner Taschenlampe erschienen diese blumenförmigen Muster wie eine Erlösung vor der drohenden Dunkelheit der Tiefe darunter. In der Nähe brummte ein Generator, doch er störte die Ruhe und Stille dieses außergewöhnlich kalten Orts kaum. Das Mondlicht spielte mit dem Eis, ohne Aufschluss über seine Dicke und das riesige Volumen an eiskaltem Wasser darunter zu geben. Neben dem Mond erkannte man den Schwanz des Skorpions, und über mir befand sich der Kleine Bär. Am gegenüberliegenden Ufer, an den Hängen des Chamar-Daban-Gebirges, glühte die Asche eines Waldbrands.

Ich ging zurück in die Hütte und in mein Bett, das von einer Elektroheizung gewärmt wurde. Irgendwo tief unter mir schoss

vielleicht in diesem Augenblick ein bläulicher Lichtkegel aufwärts durch das kalte Wasser: Ein Neutrino aus einem entfernten Teil des Universums war allen Hindernissen auf seinem Weg entgangen, direkt durch die Erde hindurchgeflogen, um nun mit einem Wassermolekül im Baikalsee zusammenzutreffen und in einem kurzen Lichtblitz zu verschwinden. Ob die künstlichen Augen im See irgendwann einen solchen Blitz sehen werden und wissen, dass sie zum ersten Mal ein geisterhaftes Teilchen aus dem Zentrum der Milchstraße beobachtet haben?

Sollte das der Fall sein, könnte es dazu beitragen, das Geheimnis um die Dunkle Materie zu lüften und damit die Zusammensetzung von rund einem Viertel des Universums zu klären. Doch ich wollte auch verstehen, wie die Kosmologen dem mehrheitlichen Rest des Unbekannten beikommen wollen, und so reiste ich an einen Ort, der in jeder Hinsicht das Gegenteil von Sibirien ist: eine ausgedörrte Wüste in den chilenischen Anden.