

Neutrinojagd im tiefsten See der Welt

Beitrag zu
„Humboldts Erben – Expeditionen zu den Grenzen des Wissens“
(Lübbe-Verlag, 2000)



Christian Spiering

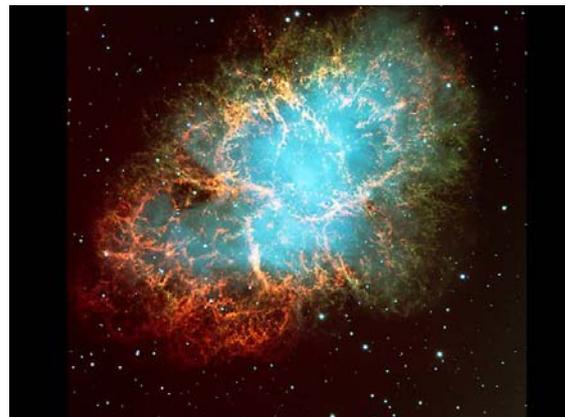
Ein Stern explodiert

Der Winter des Jahres 1988 hatte dem Baikalsee außergewöhnlich tiefe Temperaturen beschert. Selbst am südlichen Ende des Sees war die Eisdecke bis auf knapp einen Meter Dicke gewachsen. Es war Anfang März, und ich fuhr in einem klapprigen Kleinbus über die weite, spiegelnde Fläche, die nur gelegentlich von Schneeverwehungen oder Haufen aus geborstenem Eis aufgelockert wurde. Das kleine Außenthermometer zeigte minus 20 Grad. Dort, wo sich meine Füße befanden, konnte es meiner Schätzung nach nicht viel wärmer sein. Ich fühlte mich, als ob ich langsam aber sicher von unten vereiste. Die Sonne tauchte die bläulich-weiße Pracht in strahlendes Morgenlicht. Rechts von uns, keinen Kilometer entfernt, lag das pittoreske, zerklüftete Nordufer, links dehnte sich der See. Weit hinter seinem Südufer konnte man im verschwimmenden Blau die Gipfel der Kharmardaban-Bergkette ausmachen. Soweit sie durch die verfrorenen Füße nicht in ihrer Erlebnisfähigkeit eingeschränkt waren, gaben sich die Businsassen dem überwältigenden Anblick hin.

Es gab verschiedene Gründe dafür, daß ich 1988 über das Eis des sibirischen Naturwunders holperte. Einer davon lag 180 000 Jahre zurück.

Damals war in der kleinen Magellanschen Wolke, einer Begleitgalaxis unseres eigenen Milchstraßensystems, ein Stern explodiert. Das Licht dieser Explosion breitete sich in den Raum aus. Als es seinen Weg begann, sollten noch einige zehntausend Jahre bis zum Erscheinen der Neandertaler auf unserer Erde vergehen. Rund 180 000 Jahre benötigte die Lichtwelle, um den intergalaktischen Raum zwischen der großen Magellanschen Wolke und unserer Milchstraße zu durchmessen. Die Ägypter bauten an ihren Pyramiden, als der auf uns gerichtete Teil der Lichtfront in die Milchstraße eindrang. Am 23. Februar 1987, vermutlich gegen 9:30 Greenwichzeit, erreichte sie schließlich die Erde. Einen Tag später bemerkte ein Astronom das immer noch ansteigende Leuchten aus der Magellanschen Wolke: er hatte eine *Supernova* entdeckt!

Supernova-Ausbrüche sind extrem seltene Ereignisse. Nur fünfmal im Verlauf des letzten Jahrtausends konnte ein solcher Vorgang in unserer eigenen Galaxis beobachtet werden – in den Jahren 1006, 1054, 1181, 1582 und 1604. Fast alle anderen Supernova-Explosionen ereigneten sich in Galaxien, von denen uns Dutzende Millionen von Lichtjahren trennen. Sofort nachdem die Entdeckung der mit SN 1987A bezeichneten Supernova bekannt geworden war, setzte daher eine fieberhafte wissenschaftliche Aktivität ein. Erstmals interessierten sich nicht nur Astronomen für dieses Naturereignis. Auf Grund der geringen Entfernung der Explosion und mit Hilfe neuartiger Nachweisgeräte ergab sich nämlich erstmals die Chance, Boten aus dem eigentlichen Kern des kollabierten Sterns zu registrieren, Boten die zu den seltsamsten Erscheinungen des Kosmos zählen: *Neutrinos*.



Die Reste der Supernova-Explosion des Jahres 1054 sieht man noch heute als expandierende Gaswolke.

Unsichtbare Himmelsboten

Neutrinos sind elektrisch neutrale Elementarteilchen – Verwandte von Protonen, Neutronen und Elektronen, aus denen die Atome aufgebaut sind. Im Vergleich zu diesen eher prosaischen Verwandten nehmen sich Neutrinos wie elfenhafte Zauberwesen aus. Ihre bemerkenswerteste Eigenschaft besteht in ihrer geringen Neigung, mit ihrer Umgebung in irgendeine Wechselwirkung zu treten.

Aufgrund dieser Eigenschaft können sie riesige Materieschichten ohne einen Zusammenstoß durchdringen.

Von den 60 Milliarden Sonnenneutrinos pro Quadratmeter und Sekunde etwa, die von der Sonne kommend auf die Erdoberfläche treffen und dann die Erde durchqueren, stoßen im Mittel kaum ein Dutzend mit einem Atom des Erdinnern zusammen. Unbemerkt durchqueren sie auch unseren Körper, schießen in der Schulter hinein und durch die Fußsohlen hinaus, rasen durchs Herz, sausen durch die Lunge und huschen durchs Gehirn.

Die Existenz von Neutrinos wurde 1930 von dem Physiker Wolfgang Pauli „postuliert“, um einige Ungereimtheiten bei radioaktiven Zerfallsprozessen erklären zu können. Bald gelang es, die Eigenschaften des hypothetischen Teilchens genauestens zu berechnen. Es stellte sich heraus, daß das Neutrino eher einem Geisterteilchen als einer realen Existenz gleicht, und Pauli bekannte zerknirscht: „Ich habe etwas Schreckliches getan: Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das nicht nachgewiesen werden kann.“



Wolfgang Pauli

Zum Glück irrte er. In den vierziger Jahren entstanden die ersten Kernreaktoren, und sie erzeugten einen so großen Neutrinofluß, daß ein Nachweis in den Bereich der Möglichkeit rückte. 1956 gelang es Frederick Reines und Clyde Cowan, am Savannah River Reaktor in den USA Neutrinos nachzuweisen. Aus dem Fluß von Milliarden und Abermilliarden Neutrinos löste ein knappes Dutzend dieser Teilchen in ihrem Nachweisgerät ein Signal aus.

Frederick Reines erhielt dafür den Nobelpreis für Physik. „Mit dieser Großtat, die ans Unmögliche zu grenzen schien“, heißt es in der Nobelpreis-Begründung, sei es Reines und seinem inzwischen verstorbenen Mitforscher Cowan gelungen, das Neutrino „aus einem Zustand als Phantasiegebilde zu befreien und seine Existenz als real existierendes Teilchen zu beweisen“.

Was macht das Neutrino so interessant für die Astronomie? Was soll uns ein Teilchen nützen, das nur sporadisch mit irgendetwas in Wechselwirkung tritt?

Paradoxerweise ist es gerade die zuletzt erwähnte Eigenschaft, mit der sich das Neutrino als kosmischer Bote empfiehlt. Teilchen, die kaum aufspürbar sind, können nämlich ungehindert auch die dicksten Materieschichten durchdringen. Sie erreichen uns von Regionen des Kosmos, aus denen nie ein Lichtstrahl zu uns dringen kann. Sie können uns Kunde vom Innern der Sonne geben, von dort, wo die Kernreaktionen ablaufen, aus denen unser Zentralgestirn seine Energie bezieht. Sie fliegen tausende Lichtjahre durch das kompakte Zentrum unserer Galaxis hindurch. Und sie entweichen sogar aus den kosmischen Höllen, die sich im Innern von sogenannten aktiven Galaxien befinden, denjenigen Orten im Universum, an denen es zu den gewaltigsten Energieausbrüchen kommt, die es überhaupt geben mag.

Neutrinos sind also ideale kosmische Boten aus Regionen, die uns mittels Licht nicht zugänglich sind. Vereinfacht könnte man sagen: was der Röntgenstrahl für den Mediziner, das ist das Neutrino für den Astrophysiker.

Moskau 1987: Streit um die Supernova

Im August 1987, knapp sechs Monate nach der Entdeckung von SN1987A, fand in Moskau die 20. Internationale Konferenz für Kosmische Strahlung statt. Obwohl der wirtschaftliche Zerfall des Landes schon nicht mehr zu verbergen war, erfreute sich die Grundlagenforschung in der UdSSR noch einer verhältnismäßig üppigen Finanzierung. Die Tagung wurde in einem von westlichen Firmen errichteten, modernen Konferenz- und

Handelszentrum durchgeführt, das weit mehr als den etwa 800 Teilnehmern Platz geboten hätte. Die einzige Mangelerscheinung, mit der die Physiker konfrontiert wurden, war das vollständige Fehlen von Alkohol - selbst auf dem Konferenzbankett fragte man vergeblich nach Wein. Gorbatschow führte gerade seine erbitterte Kampagne gegen den Alkohol, und in den südlichen Sowjetrepubliken wurden ganze Weinberge gerodet. Die australischen Konferenzteilnehmer, die als Werbe-Gag für die zwei Jahre später auf ihrem Erdteil stattfindende Folgekonferenz tausend Büchsen australischen Bieres einführen wollten, mußten alle Stadien des verzweifelten Kampfes mit der sowjetischen Bürokratie durchleiden, ehe das Bier, gerade noch rechtzeitig und mit ministerieller Sondererlaubnis, seinen Weg auf die Abschlußveranstaltung fand.

Es war aber nicht der fehlende Alkohol, der die Tagung denkwürdig machte, sondern die Supernova SN1987A, die im Mittelpunkt der Konferenz stand. Kaum daß die Nachricht von der Explosion bekannt geworden war, hatten mehrere Forschergruppen ein fieberhaftes Suchprogramm begonnen. Diese Gruppen betrieben in tiefen Erzminen oder in Seitenstollen von Autobahntunneln Nachweisgeräte für Neutrinos. Will man nämlich kosmische Neutrinos nachweisen, dann muß sich das Gerät (der *Detektor*, wie es in der Fachsprache heißt) tief unter der Erde befinden, damit die „gewöhnliche“ kosmische Strahlung weitgehend abgeschirmt wird. An der Erdoberfläche, unter dem permanenten Bombardement durch die normale kosmische Strahlung, würde der Nachweis der seltenen Neutrinoereaktionen der Suche nach der Nadel im Heuhaufen gleichen.

Die Physiker durchforsteten ihre Magnetbänder mit den von Computer erfaßten Meßdaten des 23. Februar nach irgend etwas Ungewöhnlichem. Und sie wurden fündig. Zwei Gruppen meldeten eindeutige Signale: in einem unterirdischen Wassertank in Japan waren zwölf winzige Lichtblitze registriert worden, die mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit auf zwölf Reaktionen von Neutrinos aus der Supernova zurückzuführen waren. Das Resultat wurde durch die Beobachtung von acht Reaktionen in einem ähnlichen Wassertank nahe Cleveland, USA, erhärtet. Eine russische Gruppe, die einen

Neutrino-Detektor in Kauskasus betrieb, meldete drei Signale. Alle diese Signale waren am 23. Februar um 7.35 Uhr registriert worden, also etwa zwei Stunden vor Eintreffen des Lichtsignals. Aus Anzahl und Energie der Neutrinos konnte man auf die Temperatur des kollabierten Sternkernes sowie auf die durch Neutrinos freigesetzte Energie schließen. Erstmals konnte man auf diese Weise die Vorstellungen über den Gravitationskollaps bestätigen, die man aus dem Studium von Supernovahüllen und Modellrechnungen gewonnen hatte. Demnach herrschten in SN1987A Temperaturen von 30-50 Milliarden Grad (zweitausend mal soviel wie im Zentrum der Sonne), und die gesamte durch Neutrinos freigesetzte Energie belief sich auf das Billionenfache dessen, was unsere Sonne in einem Jahr ausstrahlt.

1987 darf mit Fug und Recht als das Geburtsjahr der Neutrinoastronomie bezeichnet werden. Die kombinierte Beweiskraft der japanischen und der amerikanischen Beobachtung war unerschütterlich. Trotzdem kam es auf der Konferenz zur heftigen Disputen. Irritierenderweise hatte nämlich ein sowjetisch-italienisches Experiment im Mont-Blanc-Tunnel ebenfalls etwas gesehen – fünf Signale innerhalb von sieben Sekunden. Allerdings nicht um 7.35 Uhr, sondern viereinhalb Stunden früher, um 2.52 Uhr. Inzwischen wird dieses Signal übereinstimmend als ein statistischer „Ausreißer“ interpretiert. Damals aber standen die Mont-Blanc-Leute den Zweiflern mit geschwollenen Stirnadern gegenüber. Weißhaarige Forscher pochten erbot auf Papierstapel mit seitenlangen Berechnungen, die sie erregt in der Luft umher schwenkten; in den Konferenzpausen brodelten die Diskussionen in kleinen Gruppen. Die Erregung kam nicht von ungefähr. Es ging beileibe nicht nur um einen Prioritätsstreit. Falls es nämlich tatsächlich zwei Pulse gewesen wären, dann wäre der Sternkern zunächst zu einem Neutronenstern zusammengestürzt, einem Gebilde von einigen Kilometern Durchmesser und einer Dichte von 10^{12} bis 10^{14} g/cm³. Die nächtlichen Signale der Mont-Blanc-Gruppe wären dann auf die dabei emittierten Neutrinos zurückzuführen. Die nachstürzenden äußeren Schichten des Sterns hätten danach die Masse des Neutronensterns allmählich so weit erhöht, daß dieser viereinhalb Stunden später zu

einem schwarzen Loch zusammenstürzte, zu einem jener exotischen Objekte also, die selbst das Licht nicht mehr entfliehen lassen. Ehe die Gravitationsfalle jedoch endgültig zuschnappte, wäre es dann zu einem zweiten Neutrinoausstoß gekommen, zu jenem, den die anderen Experimente gesehen hatten. Wir wären also Zeuge der Entstehung eines schwarzen Loches geworden!

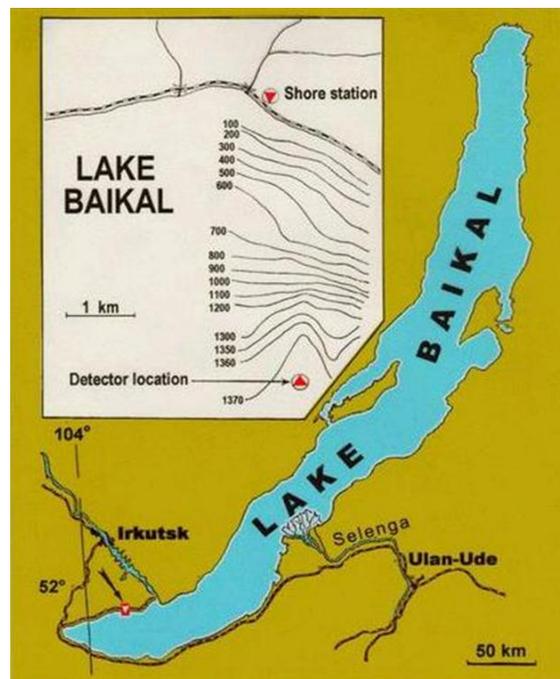
Nun – der Streit ist entschieden; es dürfte aller Wahrscheinlichkeit nach nur *ein* Puls gewesen sein. Die emotionsgeladenen Auseinandersetzungen verdeutlichten mir aber einmal mehr, daß es auf dem Gebiet der Neutrinoastrophysik um grundlegende Fragestellungen ging, die die Aufregung durchaus wert waren. Die Konferenz und insbesondere die spektakuläre Entdeckung der Supernova-Neutrinos bestärkten mich in meinem Wunsch, zukünftig auf diesem Gebiet zu arbeiten. Eines der ausgefallensten Experimente auf diesem Feld wurde im Baikalsee vorbereitet. Und darum stieg ich acht Monate nach der Moskauer Konferenz in Irkutsk in den besagten Kleinbus, der mich zum Ort dieses Experimentes bringen sollte.

Kilometer 106

Von Irkutsk zum Baikalsee sind es etwa 70 Kilometer. An der Asphaltstraße, die sich durch hügeliges Gelände windet, sind die harten Winter nicht spurlos vorbeigegangen. Sie wurde in den fünfziger Jahren gebaut und vielfach mehr schlecht als recht geflickt. Die Straße endet in Listvjanka, der Siedlung am Ausfluß der Angara aus dem Baikalsee. Von hier aus hat man zwei Möglichkeiten, am Ufer zur südlichen Spitze des Sees entlangzufahren.

Im Sommer setzt man über die Angara nach Port Baikal auf der anderen Seite über und steigt dort in einen Kurzzug, der zweimal am Tag verkehrt - auf einem Sackgassengleis, das von Südwesten kommend in Port Baikal endet. Hier fuhr früher die Transsibirische Eisenbahn entlang. Vor 44 Jahren führte jedoch der große Staudamm in Irkutsk zum Anstieg des Wasserspiegels der Angara und damit zur Überflutung der Teilstrecke entlang des Flusses. Die Transsib-Strecke verläuft darum heute weiter nördlich.

Im Winter empfiehlt sich der direkte Weg über das Eis. Der südliche Teil des Baikals friert im allgemeinen im Januar zu. Ab Februar kann man mit schwerer Technik auf das Eis. Wir wählten natürlich den Eisweg. Unser Kleinbus war etwa einen Kilometer über Listvjanka hinaus am Ufer weitergefahren, um Abstand von der unberechenbaren Eisdecke nahe der Angara zu gewinnen. An einer von vielen Rädern zerwühlten Abfahrt zum Ufer stiegen wir aus, und der Fahrer fuhr mit dem leeren Fahrzeug über einige bedenklich krachende Schollenfelder auf das glatte Eis. Dort kletterten wir wieder in unser Gefährt, das nun nach einem großen respektvollen Bogen um den Angara-Ausfluß herum das Nordufer entlang fuhr.



Der „Kilometer 106“ (Pfeil) liegt südwestlich des Angara-Ausflusses. Die Position des Baikar-Teleskops in Bezug auf das Ufer ist in dem kleinen Bild gezeigt.

Für die meisten kleineren Siedlungen oder Häuser entlang der ehemaligen Transsib-Strecke hat es zu einem richtigen Namen nicht gereicht. Stattdessen hat man sie kurz und bündig auf die Streckenlänge bis nach Irkutsk (gerechnet entlang des "alten" Transsib-Gleises) getauft. Die Häuseransammlung am Ort des Neutrinoexperimentes heißt darum *Kilometer-106*. Nach einer knapp

einstündigen Fahrt über das Eis zeichnete sich vor uns, vier Kilometer vom Ufer entfernt, eine Ansammlung von schwarzen Punkten ab, die sich beim Näherkommen als „das Lager“ entpuppte: ein knappes Dutzend Meß- und Wohncontainer auf Schlittenkufen. Der Kleinbus bog jetzt zum Ufer ab und näherte sich in schneller Fahrt dem *Kilometer-106*, dessen Häuser sich hinter den hohen Bahndamm duckten. Mit heulendem Motor und rutschenden Rädern quälte er sich wenige Minuten später die Ufersteigung hinauf und hielt vor einem Holzhaus. Wir stiegen, steif vor Kälte, aus unserem Gefährt und wurden über einige glattgefrorene Stufen und durch einen dunklen Windfang in eine geräumige Küche geführt. An einem großen Tisch saßen einige martialisch aussehende Gestalten in Wattejacken und dicken Filzstiefeln, tranken Tee und rauchten was das Zeug hielt. Bei unserem Eintritt erhob sich einer von ihnen, nahm die Papyrossy - eine typisch russische Zigarette mit Pappmundstück - aus dem Mund und hieß uns willkommen. Es war Grigorij Vladimirovitch Domogatsky, Leiter des Baikalexperiments und Sproß einer alten Moskauer Künstlerfamilie – ein Hintergrund, von dem sein gegenwärtiges Äußeres auf den ersten Blick nichts ahnen ließ. Wir stellten uns dankbar für die Wärme an einen riesigen Herd und schlürften genußvoll den heißen Tee, den er uns anbot.



Die Uferstation am Kilometer 106

Der *Kilometer-106* umfaßt neben dem geräumigen Holzhaus, in dem wir uns nach unserer Ankunft befanden, eine Reihe von Blechbaracken und Containern. Die Gebäude gruppieren sich um einen kleinen Bach, der sich zwischen zwei Bergen in den See

schlängelt. Auf einer Wiese, die sich talaufwärts erstreckt, sind einige Holzschuppen auf Eisenbahnbohlen aufgebockt. In diesen Schuppen können jeweils vier Mann wohnen. Einer davon sollte später über Jahre hinweg die *njemetskaja budka*, die deutsche Bude, werden.

Bei diesem ersten Besuch wohnten mein Kollege Wolfgang Lange und ich in einem Container auf dem Eis. Darum stiegen wir nach einer halben Stunde wieder in den Kleinbus, der uns die vier Kilometer zum Eislager hinausfuhr. Die Fahrt, deren Dauer wir auf einige Minuten veranschlagt hatten, wurde durch einen breiten Spalt, der unseren Weg kreuzte, unterbrochen. Die Eisdecke arbeitet ständig und erschreckt den unkundigen Besucher immer wieder mit langen Rissen, die sich knallend unter seinen Füßen bilden. Im allgemeinen bricht das Eis dabei nicht auseinander. In unserem Fall hatte sich jedoch, parallel zum Ufer, ein viele Kilometer langer Riß gebildet. Das Eis, das bei wärmeren Temperaturen entstanden war, zog sich zusammen, und der Riß wuchs sich zu einem handfesten Spalt aus. Der Spalt froz zwar nachts zu, brach aber tags darauf regelmäßig wieder auf und erreichte nachmittags bis zu einem halben Meter Breite. Er wurde mit breiten Bohlen überbrückt, über die die Fahrer vorsichtig ihre LKWs oder Jeeps hinüberfuhren, ständig gelotst von jemandem, der von draußen aufpaßte, daß kein Rad von der Bohle ins Wasser abrutschte.



Der Spalt

Nachdem wir ausgestiegen waren und die riesigen Bretter in die richtige Lage gezerrt hatten, überquerte unser Fahrer mit russischer Gelassenheit den Spalt. Wir verfolgten das Manöver mit angehaltenem Atem. Nicht ohne Grund: ein Jahr zuvor hatte ein Chauffeur mit knapper Not aus dem Fahrzeug springen können, ehe es zur Hälfte versank. Wie durch ein Wunder verkeilte es sich so im Eis, daß man es noch bergen konnte. Anders bei uns: es ging alles gut. Nachdem wir selbst dem Kleinbus hinterher balanciert waren und unsere Plätze wieder eingenommen hatten, dauerte es nur noch wenige Minuten, bis wir das Eislager erreichten.



Das Eislager vom nahen Ufer aus gesehen

Das Eislager

Das Eislager besteht aus einer Ansammlung von Metall-Containern, Winden und riesigen Kabeltrommeln. Die Container sind eine Militärentwicklung und hermetisch gegen die Außenwelt isoliert – gegen Temperaturen ebenso wie gegen Giftgase. Im gestelzten Amtsrussisch heißen sie *Kusov Universalnyi Germetitsheskij* (Universeller Hermetischer Behälter), kurz *KUNG*. Wolfgang und ich bekamen einen *KUNG* zugewiesen, in dem zwei Bettgestelle mit Matratzen und Bettwäsche, ein Metalltisch mit einer Teekanne und einer Waschschißel sowie mehrere kapitale Heizkörper standen. 1988 dienten die meisten der Container als Wohnunterkunft. Nur einige wenige beherbergten Elektronik-Aufbauten und relativ einfache Computer, mit denen die Meßwerte der Unterwasserinstrumente verarbeitet wurden.



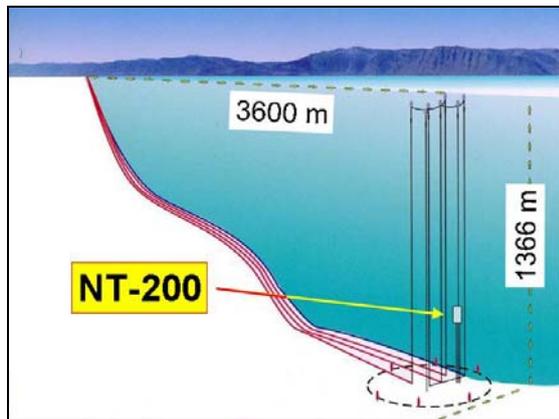
Wohncontainer auf dem Eis

In einer etwas größeren Metallhütte steht ein Dieselmotor, der die Eisstation mit Strom versorgt. Oder auch nicht! – die Generatoren gehörten aufgrund häufiger Ausfälle zu den Schwachstellen des Unternehmens. Glücklicherweise verfügt jeder *KUNG* über einen eigenen kleinen Dieselmotor, mit dem im Ernstfall eine Notheizung antreibt.

Auf dem Eis ist es merklich kälter als am Ufer. Noch im März fallen die nächtlichen Temperaturen häufig unter -25 Grad. Auf den Eisenbolzen, mit denen die hölzernen Dielen der *KUNGS* an das äußere Gehäuse geschraubt sind, setzt sich dann im Innern des Containers eine dicke Reifschicht ab. Trotz der guten Isolierung ist es morgens auch im *KUNG* kaum wärmer als plus fünf Grad. Dann aber kommt die Sonne und wärmt innerhalb von ein, zwei Stunden alles auf komfortable Temperaturen auf. Wenn man in den Morgenstunden den Kopf nach draußen steckt, bietet sich ein Anblick, der für eine durchgefrorene Nacht entschädigt. Das reine, kräftige Blau des Himmels geht nach Süden hin ins Helle über, bis es weit entfernt mit den Gipfeln der Viertausender verschmilzt. Zur anderen Seite hin wölben sich zwei Halbinseln in den See und bilden eine breite Bucht. Das Eislager liegt etwa zwei Kilometer seewärts der Linie, die die Spitzen der beiden Halbinseln verbindet. Im Winter reißt entlang dieser Linie häufig die erwähnte Eisspalte auf. Das Nordufer, das von Nahem so steil und gefährlich aussieht, macht aus dieser Entfernung mit seiner weichen Gipfelinie einen friedlichen Eindruck. Ringsherum aber breitet sich eine einzige weiße Fläche, die nur durch das feine Netz der Fahrzeugspuren zum

Ufer hin strukturiert zu sein scheint. Ruhig brummt der Generator, aus dem Nachbar-*KUNG* klettern russische Kollegen und rufen einem ein verräuspertes *Privjet!* (Grüß Dich) zu. Der Tag beginnt strahlend und schenkt einem von oben herab genügend Optimismus, um den Unwägbarkeiten des Expeditionsalltages ins Auge blicken zu können.

Der Baikal ist unter dem Lager 1366 Meter tief. Der Seegrund, der vom Ufer her zunächst steil abfällt, bildet hier eine Art Plateau. In etwa ein Kilometer Tiefe hängen an einem regenschirmartigen Gestell Kabeltrossen, an denen medizinballgroße Glaskugeln wie an einer Perlschnur aufgereiht sind. In den Glaskugeln sind hochempfindliche Lichtsensoren untergebracht. Dieses seltsame Gebilde ist ein Neutrino-Teleskop.



Das Neutrino-Teleskop NT-200

Wie fängt man Neutrinos?

Die Neutrinos, nach denen das Baikal-Teleskop fahndet, haben hunderttausend mal höhere Energien, als jene von Sonne und Supernova. Die Quellen solcher Neutrinos sind fern. Viel ferner als die Sonne, meistens sogar ferner als SN1987A. Darum sind auch konventionelle Detektoren in Tunneln oder Schächten zu klein, um die schwachen Flüsse dieser Teilchen nachweisen zu können. Viel zu selten verfängt sich in einem Detektor von einigen hundert Kubikmetern Volumen eines der seltenen hochenergetischen Neutrinos, als daß man in akzeptablen Zeiten einige Reaktionen sammeln könnte. Also muß man größere Detektoren bauen, Detektoren, die in keinen Tunnel passen würden, mit Volumina

von vielen Zehntausend Kubikmetern, vielleicht sogar einem Kubikkilometer.

Ich sagte schon, daß die Reaktionsfreudigkeit von Neutrinos entmutigend gering ist. Glücklicherweise wächst sie aber mit der Energie. In unserem Energiebereich etwa prallt schon jedes hundertste Neutrino, das die Erde durchquert, mit einem Atomkern zusammen. Dabei verwandelt es sich häufig in ein Myon, eine Art schweres Elektron. Dieses Myon übernimmt den größten Teil der Energie des Neutrinos und rast in die annähernd gleiche Richtung wie dieses weiter. Myonen werden relativ schwach von Materie abgebremst, viel schwächer als ihre leichteren Brüder, die Elektronen, die schon nach wenigen Metern steckenbleiben. Selbst wenn die Reaktion einen Kilometer weit von dem eigentlichen Detektor stattfindet, hat das Myon darum eine gute Chance, den Detektor doch noch zu erreichen und ihn zu durchqueren. Dabei wird es dann registriert.

Da die Richtung des Myons nur etwa ein Grad von jener des Neutrinos abweicht, aus dem es selbst hervorgegangen ist, weiß man nun auch die Richtung, aus der das Neutrino gekommen ist. Damit hat man ein Teleskop gebaut - in diesem Falle nicht für Licht sondern für Neutrinos. Ein *Neutrino-Teleskop*.

Neutrino-Teleskope, die nach diesem Prinzip funktionieren, sind schon seit vielen Jahren in Betrieb. Sie haben nach Myonen gesucht, die den Detektor *von unten* kommend durchlaufen. Solche Myonen können nur aus Neutrino-Reaktionen stammen, denn kein anderes Teilchen außer dem Neutrino könnte den ganzen Erdball durchqueren. Tatsächlich hat man auch viele Hundert Myonen aus Neutrino-Reaktionen aufgezeichnet. Leider kommen sie nicht bevorzugt aus bestimmten Richtungen, wie man es erwarten würde, wenn sie von extraterrestrischen Quellen stammen, deren Bild am Himmel nur Bruchteile eines Grads überstreicht. Statt dessen kommen die bis jetzt nachgewiesenen Neutrinos fast gleichmäßig verteilt aus allen Richtungen. Es sind zum größten Teil keine extraterrestrischen Neutrinos, sondern solche, die durch die normale kosmische Strahlung beim Auftreffen auf die Erdatmosphäre erzeugt worden sind; in diesem Fall auf die Atmosphäre auf der anderen Seite der Erdkugel (denn man schaut ja nur auf Myonen, die von unten kommen).

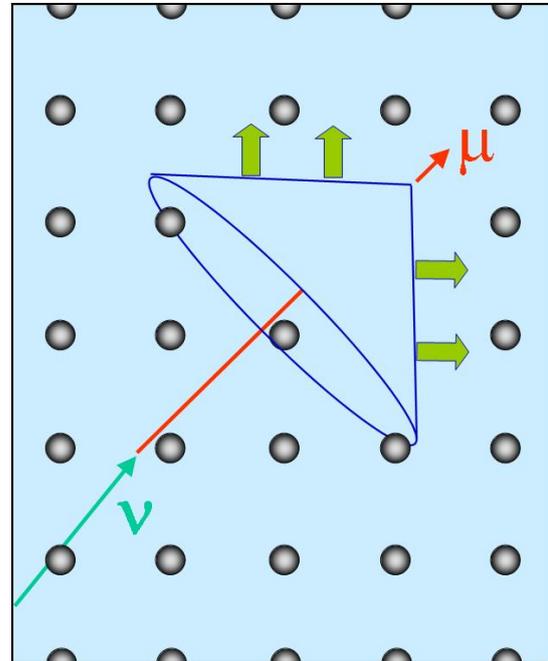
Man nennt diese Neutrinos kurz *atmosphärische Neutrinos*.

Den Grund dafür, daß man „nichts“ sieht, sind die gewaltigen Abstände der Quellen, die möglicherweise hochenergetische Neutrinos erzeugen. Die nächsten Fixsterne sind einige Lichtjahre entfernt. Das ist viel weiter als die Sonne, von der das Licht nur acht Minuten und nicht einige Jahre benötigt, um zu uns zu gelangen. Aber noch viel weiter ist es bis zu jenen exotischen Objekte, um die es uns geht: Doppelsternsysteme, das Zentrum unserer Galaxis, schwarze Löcher oder aktive Galaxien, die gewaltige „Jets“ von Materie in den Raum feuern. Von den Riesenschleudern, die das Universum hervorgebracht hat, trennen uns - zum Glück - gewaltige Zwischenräume: die kosmischen Höllen sind ungefährlich weit. Doch genau darum sind auch die Flüsse der von dort bei uns eintreffenden Neutrinos viel geringer als der Fluß der Sonnenneutrinos. Zwar hilft die hohe Energie beim Nachweis. Aber trotzdem reichen die kleinen unterirdischen Detektoren nicht aus, um die hochenergetischen Neutrinos nachzuweisen. *Offenbar* reichen sie nicht aus, denn sonst wäre man ja schon fündig geworden.

Deshalb also muß man um ein Vielfaches größere Teilchenfallen bauen. Man geht dazu tief ins Wasser oder ins Eis, dorthin, wo es keine begrenzenden Wände gibt. Wieder versucht man, die Myonen aus den Neutrinoereaktionen nachzuweisen. Wenn ein Myon durch Wasser oder Eis fliegt, zieht es einen Lichtkegel hinter sich her, vergleichbar mit dem Überschallkegel eines Düsenflugzeugs. Dieses schwache bläuliche Leuchten, nach seinem Entdecker *Cherenkov-Licht* genannt, muß man aufzeichnen.

Unterwasser-Neutrinooteleskope bestehen aus einer Vielzahl von Lichtsensoren, die auch noch winzigste Lichtblitze in elektrische Signale umwandeln können. Man nennt solche Sensoren *Photomultiplier*, zu deutsch Fotovervielfacher. Die Photomultiplier sitzen in druckfesten Glaskugeln, die gitterförmig ein großes Volumen überspannen. Sie registrieren Stärke und Ankunftszeit des Lichtblitzes. Besonders die Zeitdaten, die auf wenige Milliardstel Sekunden („Nanosekunden“) genau gemessen werden, sind für die Richtungsbestimmung wichtig. Ein Computer vergleicht die Ankunftszeiten der Lichtblitze

an den verschiedenen Photomultipliern und berechnet daraus die Lage des Lichtkegels im Raum. Aus der Lage des Lichtkegels erhält man die Bahn des Myons, und aus dieser die Richtung des Neutrinos.



Funktionsweise eines Neutrino-Teleskops

Warum zum Baikalsee?

Der endgültigen Entscheidung für eine Beteiligung am Baikalexperiment war eine fast zweijährige Erkundungsphase vorausgegangen. Das Institut für Hochenergiephysik in Zeuthen, an dem ich arbeitete, hatte sich 1986 über mehr als zwei Jahrzehnte ausschließlich mit der Erforschung von Elementarteilchen an Ringbeschleunigern beschäftigt. In diesem Jahr begannen wir ernsthaft, uns über die Teilnahme an Experimenten *ohne* Zuhilfenahme von Beschleunigern den Kopf zu zerbrechen.

Geografisch kam für ein neues Tätigkeitsfeld aus politischen Gründen nur "der Osten", also die Sowjetunion, infrage. Die Russen, die in der Beschleunigerphysik hoffnungslos ins Hintertreffen geraten waren, hatten jedoch auf dem Gebiet der Teilchenphysik *ohne* Beschleuniger nicht nur eine gute Tradition, sondern auch eine Anzahl konkurrenzfähiger Projekte vorzuweisen. Die meisten dieser Projekte griffen grundlegende Fragen der

Teilchenphysik und der Teilchen-Astrophysik auf, die an Beschleunigern nicht oder nur schwer zu beantworten waren.

Die Entscheidung für das Baikalexperiment hatte mehrere Gründe. Die Hoffnungen, die in die Neutrinoastronomie gesetzt wurden, hatten durch die Supernova 1987A frische Nahrung erhalten. Das Baikalexperiment entsprach darüber hinaus am ehesten den Fähigkeiten, die mein Kollege Ralf Wischnewski und ich selbst - wir bildeten den Kern der Nichtbeschleuniger-Gruppe - einbringen konnten. Und schließlich erschien uns die Thematik selbst verlockender als die der Alternativprojekte, die häufig auf eine nur einzige (wenngleich fundamentale) Zahl hinarbeiteten. Die Teleskope für hochenergetische Neutrinos dagegen sollten ein völlig neues Fenster zum Universum eröffnen - und nichts lag näher als anzunehmen, daß auch hier so sensationelle Überraschungen, wie man sie bei den ersten Radio- oder Röntgenteleskopen erlebt hatte, ins Haus stehen würden! "Nothing is guaranteed - but history is on our side", wie unser amerikanischer Kollege Francis Halzen schrieb. Die Unbestimmtheit des Erfolges macht das Gebiet eher spannender.

Anfang der achtziger hatten Physiker aus mehreren russischen Instituten begonnen, die Realisierungschancen für ein Neutrino-teleskop im Baikalsee auszutesten. Das kristallklare Wasser des sibirischen Sees bietet optisch gute Möglichkeiten, die Cherenkovblitze über große Entfernungen nachweisen zu können. Die Tiefe des Sees ist wichtig, um die von oben kommenden Myonen weitgehend abzuschirmen. Der Knalleffekt ist jedoch das Eis, das den See in jedem Jahr von Februar bis Anfang April mit einer Dicke bis zu einem Meter überzieht. Es bietet eine ideale Plattform, von der aus man den Detektor in die Tiefe lassen kann.

Die Leitung des Unternehmens war Grigorij Domogatsky vom Moskauer Institut für Kernphysik angetragen worden. Domogatsky ist von hause aus "Theoretiker", also ein Physiker, der eigentlich nur mit Bleistift und Papier, heute auch mit dem Computer arbeitet. Sein Vater war Bildhauer, sein Großvater Maler. Swetlana, seine Frau, ist als Kunsthistorikerin in der Moskauer Tretyakov-Galerie angestellt. Das geräumige alte Quartier

der Domogatsky's im Moskauer Norden ist eine Art Kunstkammer, vollgestopft mit schöner russischer Malerei und feingearbeiteten Plastiken, unter nachgerade grimmiger Auslassung des sozialistischen Realismus und avantgardistischer Kunst. Man spürt eindringlich die Atmosphäre jenes alten russischen Intelligenzadels, der sich über alle Moden und Zwänge hinweg eine innere Unabhängigkeit bewahrt hat und nicht ohne milde Geringschätzung auf alles herabsieht, was sich außerhalb Moskaus abspielt.

Manchmal spielen bei der Entscheidung für ein Experiment menschliche Faktoren eine fast so große Rolle wie die rein wissenschaftlichen. So war es auch hier. Ralf Wischnewski und ich waren beeindruckt von Domogatsky's kultivierter Persönlichkeit, seiner wohlüberlegten, bedachten Art und der Beharrlichkeit, mit der er sein Projekt allen Widrigkeiten zum Trotz vorantrieb. Diese Beharrlichkeit steht in seltsamem Gegensatz zu seinem Äußeren. Domogatsky wirkt eher gebrechlich. Als wir ihn kennenlernten, hatte er, obwohl noch nicht einmal fünfzig Jahre alt, fast alle Zähne verloren. Die Papyrossy, die er fast stets im Munde hielt, klemmte er mit akrobatischem Geschick zwischen zwei der wenigen verbliebenen Vorderzähne. Gelegentlich wurde er von heftigem Husten geschüttelt. Die Sechzehn-Stunden-Tage hatten in seinem zerknitterten Gesicht ihre Spuren hinterlassen. Es erschien es damals eher unwahrscheinlich, daß er noch heute, zwölf Jahre später, ein so aufreibendes Projekt leiten würde, anstatt zu Bleistift, Papier und der theoretischen Physik zurückzukehren.



G.V.Domogatsky

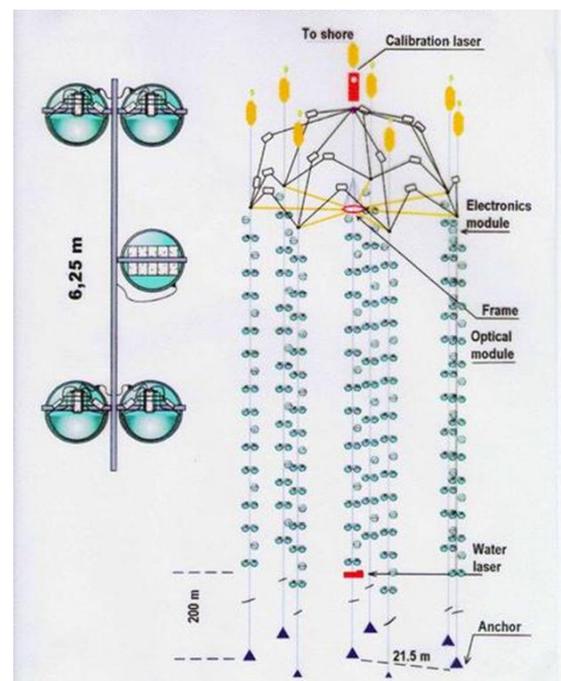
Der Funke zwischen Domogatsky und seinem Stellvertreter Leonid Bezrukov einerseits und Ralf und mir andererseits sprang schnell über und lieferte einen weiteren Grund, in das Baikalsee-Projekt einzusteigen. Nach meiner ersten Erkundungsreise zum Baikalsee im Frühjahr 1988, und nach Arbeitsbesuchen von Ralf und mir in Moskau und 1989 nochmals am Baikalsee unterzeichneten die Direktoren der Institute in Moskau und Zeuthen im Frühjahr 1989 einen „Vertrag über die wissenschaftliche Zusammenarbeit zum Unterwassernachweis von Myonen und Neutrinos am Baikalsee“. Diese vertragliche Bindung wurde von dem renommierten Großforschungszentrum DESY, zu dem das Zeuthener Institut seit 1952 gehört, übernommen und fortgeführt.

Arbeit auf dem Eis

"Der Tag beginnt strahlend und schenkt einem genügend Optimismus, um den Unwägbarkeiten des Expeditionsalltages ins Auge zu blicken." habe ich weiter oben geschrieben. In der Tat gehört der Baikalsee zu den sonnenreichsten Gegenden Rußlands. Das hindert ihn allerdings nicht, sich gelegentlich von einer völlig anderen Seite zu zeigen. Wenn es draußen nicht nur bitterkalt ist, sondern der Himmel verhangen ist und ein steifer Wind messerscharfen Schnee über die Eisfläche treibt, möchten die "Außenarbeiter" ausnahmsweise mit den "Innenarbeitern" tauschen, die in der engen Uferstation an ihren Computern sitzen. Am liebsten würde man dann im Schlafsack bleiben. Aber der nahende Frühling läßt keine Zeit. Unaufhaltsam rückt der Zeitpunkt Anfang April näher, an dem das Eis sich soweit aufgewärmt hat, daß es porös wird und das Lager geräumt werden muß. Bis dahin müssen alle Unterwassergeräte vollständig montiert, getestet und herabgelassen sein.

Nach dem Frühstück, das die meisten in ihren Hütten und Containern selbst bereiten, geht es an die Arbeit. Der größte Teil fährt aufs Eis. Zu Beginn der Saison werden dort über dem Standort des Neutrinooteleskops große Löcher ins Eis gehackt, durch die das Gerät bis dicht unter die Eisfläche gezogen wird.

Das Teleskop befindet sich in etwa ein Kilometer Tiefe. Es besteht aus einem Gestell mit sieben 20 Meter langen Trägerarmen. An den Enden dieser Arme und im Zentrum hängen acht Kabeltrossen, die die Photomultiplier tragen. Diese empfindlichen Sensoren sind in druckfesten Glaskugeln untergebracht und paarweise, mit vertikalen Abständen von fünf bis sieben Metern zwischen den Paaren, angeordnet. Das Gebilde wird durch ein ausgeklügeltes System von Auftriebskörpern (Bojen) in der Balance gehalten. Gewichte auf dem Grunde des Sees, an den unteren Trossenenden, verhindern, daß die ganze Konstruktion nach oben fortschwebt. Vom Teleskop aus führt eine Kabeltrosse aufwärts und endet etwa zwanzig Meter unter der Wasseroberfläche an einem Bündel von Bojen.



Das NT-200 Teleskop

Zum Hochholen des Teleskops läßt man ein Stahlseil durch ein großes Eisloch. Das Seil sinkt herab und legt sich wie ein Lasso in einer riesigen Schlaufe um die Boje. Nun tritt eine kräftige Winde in Aktion, die Schlaufe zieht sich zu, langsam erhöht sich der Zug. Man fühlt förmlich, wie sich tief unten die im Verlauf eines Jahres in den Boden eingesunkenen Gewichte vom Grund

losreißen, und dann - ein Ruck! - bewegt sich das Teleskop nach oben.

Nachdem das Teleskop ruhig und gravitatisch seinen Weg bis unter die Eisfläche zurückgelegt hat, werden die unterschiedlichen Kabel auf die Oberfläche gezogen und entkoppelt. Eine besonders dicke Kabeltrosse ist zu einer zweiten, sechzig Meter entfernten Boje hinübergezogen, auch diese etwa zwanzig Meter unter dem Eis. Von dort aus führt sie wieder zum Seegrund hinab und auf dem Grund entlang bis zum Ufer. Genau genommen sind es drei solcher vieladrigen Kabel, zwei Kupferekabel und ein Glasfaserkabel, die die Verbindung des Teleskops mit dem Ufer sicherstellen. Über diese Kabel wird das Teleskop das ganze Jahr über mit Strom versorgt, und gleichzeitig werden die Daten zum Ufer transportiert.

Nachdem alle Kabel losgestöpselt sind, wird - wieder mit Hilfe einer Schlaufe - das Ende eines Trägerarms nach oben geklappt, so daß man die an diesem Arm hängenden Kugeln nach oben hieven kann. Das ist notwendig, um Komponenten, die im Verlaufe des Jahres "ausgestiegen" sind, austauschen zu können. Langsam, wie geheimnisvolle Zauberwesen, schweben die großen Glaskugeln durch das kristallklare Wasser auf das Eisloch zu. Oben werden sie von uns erwartet, von den Kabeln getrennt und sofort in Kisten verpackt. Die äußerst empfindlichen Photomultiplier dürfen nämlich nicht zu lange der Sonne ausgesetzt werden. Steht gerade keine Kiste zur Verfügung, so wird behelfsweise eine schwarzes Tuch über die lichtempfindliche Seite der Kugeln geknotet, so daß sie von weitem den Eindruck von riesigen, runden Seeräuberköpfen machen. Im Austausch gegen defekte Elektronik oder Photomultiplier werden werden neue oder reparierte Komponenten montiert.

Was sich hier so flüssig und problemlos liest, wächst sich indessen häufig zu tagelangen Kämpfen mit den Tücken der Natur wie auch der Technik aus, die nur durch eiserne Kondition, gepaart mit Erfindungsreichtum und Improvisationstalent, zu gewinnen sind.

Im Jahre 1994 zum Beispiel war eines der Gewichte, die das Teleskop am Boden halten, so tief in den Grund "hineingewachsen", daß es sich nicht löste und die dazugehörige Trosse

kurz unter dem Ende des Trägerarmes, der ja mit dem gesamten Teleskop nach oben gezogen wurde, abriß. Nicht acht, sondern nur sieben Trossen schwebten also mit dem Teleskop in die Höhe. In der Tiefe blieb ein volles Achtel der Instrumente zurück, die über mehrere Jahre mit viel Einsatz gebaut worden waren - ohne schnell verfügbaren Ersatz und zudem in einem Jahr, in dem die wirtschaftliche Lage ohnehin den Bau von Reservekugeln verboten hätte. Was tun?

Es sind genau solche Situationen, die einen echten Sibirier zur Höchstform anstacheln. Nikolaj Budnev, Leiter der Gruppe von der Universität Irkutsk, ist ein solcher Sibirier. Nikolaj ("Kolja") baute aus einer großen Metallplatte, die sich hinter einem Schuppen fand, einen riesigen Flügel. Durch ausgeklügeltes Verbiegen der Platte und eine geeignete Aufhängung erreichte er, daß sein Flügel beim Herablassen sowohl in einem großen Kreis wie auch um seine eigene Achse zu rotieren begann. Kolja hoffte darauf, daß sich die Platte in der unten gebliebenen Trosse verfangen würde, so daß man sie doch noch bergen könnte. Braucht man Gottvertrauen, muß man ein hoffnungsloser Phantast oder vielleicht nur ein dickköpfiger Sibirier sein, um darauf zu rechnen, daß ein solcher Plan aufgeht? Eine Trosse in mehr als einem Kilometer Tiefe, von der nicht bekannt ist, wie weit sie sich zur Seite geneigt hat, ein rotierendes Blech, von dem nicht bekannt ist, ob es nicht weiter unten seitlich wegdriftet - wie groß war da die Chance auf Erfolg?



Kolja Budnev steuert die Winde

Aber die Skeptiker sollten sich getäuscht haben. Kolja ließ nicht locker. Bei grimmiger Kälte, unterstützt von einigen ebenso enthusiastischen Studenten, ließ er ein um das andere Mal seinen Flügel in die Tiefe, holte ihn wieder hoch, hämmerte ihn in eine andere Form, probierte es wieder. Ein paar Dutzend Meter weiter gingen die "normalen" Montagearbeiten weiter. Am dritten Tag hatten man von dort nur noch mitleidige Blicke für die Bemühungen der Irkutsker übrig. Und dann geschah es: der Flügel saß fest! Kolja hatte die Trosse getroffen. Und nicht nur das. Die Platte hatte sich so fest verhakt, daß es gelang, den Rest der Geräte unversehrt herauszureißen.

Unter allgemeinem Jubel wurde die schon aufgegebenen Kugeln auf das Eis gezogen. Kolja Budnev wankte erschöpft in seine Hütte und schlief vierzehn Stunden in einem Stück.

Über die Jahre hinweg hat sich eine Kernmannschaft von Spezialisten gebildet, die mit fast schlafwandlerischer Sicherheit die Montagearbeiten durchführen. Da ist Igor Belolaptikov aus Dubna, eigentlich Softwarespezialist, der Jahr für Jahr für zwei Monate in die Rolle des Vorarbeiters am See schlüpft. Bajarto Lubsandorzhev ist ein Burjate. Es ist in Ulan-Ude südlich des Baikals geboren und arbeitet in Domogatskys Moskauer Gruppe. Er ist für die Photomultiplier verantwortlich. Leonid Kuzmichev ist der Leiter der kleinen Gruppe der Moskauer Universität und hat die Elektronik konzipiert. Hinzu kommen drei, vier Studenten.

Neben der Montage gibt es aber eine Vielzahl von anderen Arbeiten, die einen unterschiedlichen Qualifikationsgrad erfordern. Erstbesucher des Sees werden mit Vorliebe zum Hacken der Eislöcher eingesetzt. Man bekommt eine große Pike und eine Schaufel in die Hand gedrückt und kann dann bis zur Erschöpfung eines der quadratmetergroßen Löcher in das dicke Eis hauen. Andere bedienen die Winden oder lassen Sonden zur Messung der Wassereigenschaften in die Tiefe. Der Arbeitstag wird durch das Mittagessen am Ufer unterbrochen, zu dem man von einem LKW abgeholt wird. Er endet im allgemeinen erst mit dem Einfall der Dunkelheit. Die Abende werden für Besprechungen oder Arbeiten im Uferzentrum

genutzt. Gelegentlich klingen sie mit einem Gelage aus, bei dem eine Gitarre und traurige russische Lieder eine ähnlich wichtige Rolle spielen können wie Wodka, der in erheblichen Mengen aus großen Tassen getrunken wird.



Ein Opfer für Burchan

Ende März wird es warm. Am Tage steigt das Thermometer über Null, die Sonne prallt unbarmherzig auf den See. Der letzte Schnee ist schon längst geschmolzen, und das Eis ist schutzlos den Sonnenstrahlen ausgesetzt. Im Verlaufe des Tages bilden sich immer größere Pfützen. Immer besorgter wird jetzt die Festigkeit des Eises geprüft. Unter der Last der Winden und *KUNGS* biegt sich die weicher werdende Eisdecke nach unten und das Wasser schwappet aus den Löchern. Schließlich kommt der Tag, an dem das Schmelzwasser nicht mehr in Pfützen stehen bleibt, sondern durch das porös gewordene Eis nach unten abfließt. Dieser Zeitpunkt kommt für gewöhnlich in den ersten zehn Tagen des April. Jetzt ist höchste Eile geboten. Noch ein, zwei Tage, und die weiche Eisschicht kann unter der Last der schweren Technik absacken.

Wenn das Teleskop schließlich herabgelassen ist und alle Kabelverbindungen zum Ufer gesteckt sind, wenn nur noch ein einsamer Strick aus dem Loch guckt, der mit der oberen Boje verknüpft ist und in wenigen Minuten abgeschnitten sein wird, wenn man wirklich nur noch beten und hoffen kann, daß alles funktioniert - dann versammeln sich die Expeditionsteilnehmer um das Loch und bringen Burchan, dem Baikalgott, ein Opfer. Egal ob Atheist, Christ oder Buddhist, treten sie nacheinander an das Loch, lassen sich ein kleines Gläschen Wodka einschenken, gießen

ein paar Tropfen in den See und trinken den Rest dann ernst und ohne Witze zu machen aus. Wenn jetzt eine zentrale Komponente des Teleskops ausfiele, zum Beispiel die Datenübertragung, so wären zwei Monate harter Arbeit vergebens und das Teleskop würde ein ganzes Jahr lang nutzlos und tot in der Tiefe hängen. Trotz vieler Ausfälle hat es aber bisher noch nie eine wirklich zentrale Komponente getroffen - Burchan hat uns erhört ...

Nach dieser Zeremonie geht man zu Fuß ans Ufer. Die letzte Winde wird vom Eis gezogen. Am selben oder am nächsten Tag fahren die meisten ab. Nur eine kleine Schar im Uferzentrum bleibt zurück und nimmt über das lange Seekabel das Teleskop in Betrieb, schaltet alle Elektronikkomponenten ein, überprüft die Information, die das Gerät zum Ufer schickt, auf mögliche Fehler und beginnt die ersten physikalisch verwertbaren Daten zu nehmen. Wenn alles stabil läuft, bleiben nur zwei Leute am See, die die erste Schicht-Besatzung bilden. Die Winter-Expedition ist vorüber.

Ein Reich zerbricht

Das Jahr meines ersten Besuches am Baikalsee, 1988, gehörte für viele Menschen im sowjetischen Machtbereich zu der kurzen Periode, in der sie glaubten, auf politische und ökonomische Verbesserungen im Rahmen des existierenden Systems hoffen zu dürfen. Gorbatschow hatte die Welt mit *Glasnost* und *Perestroika* überrascht, und nach Jahren quälender Stagnation geriet nun sichtbar ein ganzes System in Bewegung. Daß diese Bewegung mit der Selbstauflösung des Systems enden würde, ahnten damals nur wenige. Insbesondere war nicht absehbar, daß es gut zwei Jahre später die DDR nicht mehr geben würde und daß andererseits gerade dieser Umstand sich als eine wesentliche Voraussetzung für die weitere Durchführung des Baikalexperiments erweisen sollte.

Vorerst schlugen sich unsere russischen Kollegen mit geradezu grotesken Beschaffungsproblemen herum. Nikolaj Budnev um Beispiel benötigte Elektronikkomponenten, die in Vilnius, der litauischen Hauptstadt, hergestellt wurden. Allerdings waren die Litauer nicht zu bewegen, gegen

Barzahlung zu liefern. Nach langen Verhandlungen einigte man sich schließlich auf Baikal-Zedern als Naturalwährung. Im Sommer 1988 wurde tatsächlich ein ganzer Waggon mit dem hochwertigen Holz vom fernen Sibirien bis zur Westgrenze des Riesenreiches geschickt, und im Gegenzug nahm Budnev zwei Koffer mit Elektronikbausteinen in Empfang. Weniger erfolgreich war ein Kollege aus Moskau, der in Odessa Spezialgeräte kaufen wollte: er hatte keine äquivalenten Naturalien anzubieten und kehrte unverrichteter Dinge wieder zurück.

Immerhin gab es Ende der achtziger Jahre noch einen beträchtlichen Handlungsspielraum für Domogatsky. Dieser Spielraum verengte sich jedoch in den folgenden Jahren dramatisch. Computer und hochwertige Elektronik waren inzwischen in Rußland überhaupt nicht mehr zu erstehen, und es war nur selbstverständlich, daß unser Institut ab 1990 für diesen Teil der Beschaffung zuständig wurde. 1991 hatte sich die Situation aber derart verschlimmert, daß die Durchführung der jährlichen Winterexpedition im Frühjahr 1992 grundsätzlich in Frage gestellt war. Butter, Fleisch, Kaffee, Zucker – alles war zur absoluten Mangelware geworden. Der private Markt, über den man einige Jahre später zu stark überhöhten Preise wieder fast alles bekam, hatte sich noch nicht herausgebildet. Die Versorgung der Expeditionsteilnehmer war ganz offensichtlich aus russischer Kraft allein nicht zu gewährleisten. In diesem wie in den folgenden zwei Jahren lieferten darum die Deutschen den Großteil der knappen Lebensmittel. 60 kg Butter, 40 kg Margarine, 25 Liter Speiseöl, 200kg Zucker, 200 kg Reis, 20 kg Kaffee, 10 kg Tee, 300 Tafeln Schokolade, 50 kg Käse und 300 kg Wurst und Fleischkonserven, dazu Vitaminpräparate und Medikamente verzeichnet mein Packzettel vom Januar 1992. All das wurde in Holzkisten verpackt und nach Rußland geschickt.

Während sich die Situation in Rußland unaufhaltsam verschlechterte, nahmen die Dinge für das Zeuthener Institut eine glückliche Wendung. Im Januar 1992 wurden wir Teil des Deutschen Elektronen-Synchrotrons (DESY), eines Großforschungszentrums, das in Hamburg einen großen Teilchenbeschleuniger betreibt und die

innerste Struktur von Protonen und Neutronen erforscht. Obwohl die Teilchen-Astrophysik nicht zu den Forschungsschwerpunkten des DESY gehörte, konnten wir unsere Baikalkaktivitäten im folgenden nicht nur fortsetzen, sondern sogar noch verstärken.

Daß das DESY über die Dinge hinaus, die wir selbst entwickelten und bauten, auch Computer, kommerzielle Elektronik und Geld für das Baikalexperiment zur Verfügung stellte, war unumgänglich. Die russische Industrie konnte kaum noch etwas von den hochwertigen Materialien liefern, die wir benötigten. Viele Dinge, vom hochspannungsfesten Widerstand bis zum integrierten Schaltkreis, vom temperaturregulierten LötKolben bis zur Lichtleitfaser, mußten in Deutschland besorgt und nach Rußland geschafft werden. In diesem Sinne war das Ende der DDR tatsächlich eine Voraussetzung zur Fortführung des Unternehmens, denn ein DDR-Institut hätte weder die finanziellen Möglichkeiten noch den Zugriff zu moderner Technik gehabt. Übrigens leistete *eine* Institution der DDR durch ihre Abschaffung einen ganz besonderen Beitrag zum Baikalexperiment: die Nationale Volksarmee. Die Bestände der NVA wurden nämlich 1992 aufgelöst und, soweit sie zivil nutzbar waren, an Institutionen des öffentlichen Dienstes oder Gewerbetreibende abgegeben. Mir war es dabei nach einigem Papierkrieg nicht nur gelungen, eine größere Anzahl an Erste-Hilfe-Päckchen und feldtauglichen Operationsbestecken zu erstehen, sondern auch zwei Jeeps sowjetischer Produktion vom Typ UAZ-469. Mit diesen Jeeps fuhren wir im Mai 1992 durch Polen, Weißrußland und Rußland nach Moskau. Sie tun noch heute ihren Dienst – der eine in Moskau, der andere am Baikalsee.



Während es um die Finanzierung der Forschung in Rußland von Jahr zu Jahr trauriger bestellt war, meldete sich ein neuer Akteur auf dem Spielfeld. Es waren die Dunkelmänner und Strukturen, die etwas vereinfacht unter dem Begriff Mafia zusammengefaßt werden. Fast jeder Transport zum Baikalsee gestaltete sich bald zu einem Katz-und-Mausspiel mit Leuten, die selbst die leeren Euter der russischen Akademie der Wissenschaften noch zu melken versuchten. Kaum ein Waggon, der ohne „Schutzgebühr“ auf den langen Weg geschickt wurde, kaum ein Container, der auf dem Rückweg ohne Bestechung aus dem Bahnhof gelotst werden konnte. In einzelnen Fällen schien es fast so, als ob es ausnahmsweise ohne Zusatzzahlungen abgehen würde. So im Jahre 1995, als Grigorij Domogatsky an einen „Beamten“ geriet, der sich dafür zu interessieren begann, was wir am Baikalsee eigentlich machten. Er verwickelte Domogatsky in ein einstündiges Gespräch über Neutrinos, dunkle Materie und den Urknall. Fasziniert von den Urgründen des Seins und gleichzeitig verdattert über Physiker, die sich für so wenig Bezahlung den Strapazen einer Winterexpedition aussetzen, willigte er ein, am nächsten Tag für eine reibungslose Herausgabe der Fracht zu sorgen. Aber ach! – als Domogatsky am nächsten Tag erwartungsvoll den Abfertigungsraum betrat, wurde ihm gemeldet, daß seiner neuer Freund erkrankt sei. An seiner Stelle saß ein junger Mann mit kurzgeschnittenen Haaren, Body-Builder-Figur und dem unbeeindruckten Blick des russischen *Businessmen* und erklärte ihm gelangweilt, daß er so und soviel Zusatzgebühr zu zahlen habe, sofort und an ihn direkt, und damit basta!

Der Mangel an Materialien und Geräten war die eine Seite der Misere – die andere waren die lächerlichen Gehälter, mit denen unsere russischen Kollegen sich durchschlagen mußten. Schon 1988 lebten die DDR-Bürger zweifellos weit besser als die Einwohner der Sowjetunion. Aber der Unterschied war noch faßbar und rief noch nicht jenes Gefühl von unverdientem Glück hervor, das ein Vergleich zwischen dem bundesdeutschen und dem russischen Lebensstandard heutzutage erweckt. Die Löhne der Russen hielten nicht

im Entferntesten mit den rapide ansteigenden Preisen mit. Schon 1992 hatten darum viele unserer russischen Kollegen irgendeine Art von Zweitbeschäftigung. Der eine schrieb Software für eine Bank, der andere nähte Jeans, die er auf einem der Moskauer Märkte verkaufte, ein dritter arbeitete an Wochenenden in einer Baubrigade, die Wochenendhäuser für die *novyije russkije*, die reich gewordenen „Neuen Russen“ aufstellten. Die Gehaltsaufbesserung, die DESY, das deutsche Forschungsministerium oder die Volkswagenstiftung seit 1992 zahlen und die das reguläre Gehalt zuzeiten - je nach Wechselkurs - sogar übertreffen, kann das Problem mildern, aber nicht lösen. Jahr für Jahr kehren darum ein oder zwei Mitstreiter dem Experiment gänzlich den Rücken und versuchen ihr Glück bei Banken oder in der Industrie. Die übriggebliebene Kernmannschaft charakterisierte einer unserer russischen Kollegen in einem Fernsehinterview als „Enthusiasten, deren Arbeitseifer - gemessen an ihren Gehältern - gewisse Zweifel an ihrer Zurechnungsfähigkeit aufkommen läßt“. Man mag einwenden, daß diese Beschreibung ansatzweise auf jeden engagierten Physiker in der Grundlagenforschung zutrifft – für die meisten unserer Freunde aus Moskau und Irkutsk trifft sie den Nagel auf den Kopf.



Kolja Budnev und Grigorij Domogatsky

QUASAR- Klasse im Chaos

Inmitten der bröckelnden russischen Wirtschaft schienen technische Innovationen mit Beteiligung kommerzieller Betriebe nahezu aussichtslos. Uns gelangen aber allen äußeren Mißlichkeiten zum Trotz gleich

mehrere solcher Neuentwicklungen. Die eine betraf die Unterwasserstecker.

Die Geschichte des Baikalexperiments in den achtziger Jahren war – unter anderem - auch eine Geschichte permanent undichter Stecker. Immer wieder kam es zu elektrischen Kurzschlüssen, weil Wasser in die Stecker drang, immer wiederleckte Wasser in die Druckbehälter, weil die Durchführungen der Kabel dem enormen Wasserdruck in einem Kilometer Tiefe nicht standhielten. Nachdem die DESY-Gruppe jedoch 1991 kommerzielle Stecker aus den USA eingesetzt hatte, entwickelten unsere Moskauer Kollegen eine vereinfachte Variante dieser Stecker, die mit den in Rußland verfügbaren Materialien hergestellt werden konnte. Weit über tausend solcher Stecker und die entsprechenden wasserdichten Durchführungen sind seitdem ohne Havarien im Einsatz. Wie bemerkenswert dieser Erfolg ist, wird deutlich, wenn man das Schicksal von *DUMAND* betrachtet. *DUMAND* (Deep Underwater Muon And Neutrino Detector) war unser damaliges, technologisch vermeintlich haushoch überlegenes amerikanisches Konkurrenzexperiment. Es sollte vor Hawaii im Pazifik, in vier Kilometer Tiefe installiert werden. Nachdem die Amerikaner ihren ursprünglichen Fahrplan aber um mehr als fünf Jahre überzogen hatten, scheiterte die entscheidende Installationsphase schließlich an undichten Steckern. Das Experiment wurde 1996 sang- und klanglos eingestellt.

Die bemerkenswerteste technische Entwicklung ist der Photomultiplier des Baikalexperiments, der auf den einprägsamen Namen *QUASAR* getauft wurde. Ein Photomultiplier tut das Umgekehrte wie eine Glühlampe. Während jene aus Strom Licht macht, wandelt dieser Licht in Strom um, und zwar mit einer phänomenalen Effizienz: Photomultiplier reagieren sogar auf einzelne Lichtquanten!

Bei Unterwasser-Teleskopen sind drei Eigenschaften der Photomultiplier wichtig: Sie müssen zum einen sehr groß sein, um möglichst viel Licht einzufangen; sie müssen über einen möglichst großen Winkelbereich empfindlich sein; und sie müssen schließlich die Ankunftszeit des einzelnen Lichtteilchen mit ein bis zwei Milliardstel Sekunden genau bestimmen. Diese drei Forderungen sind schwer gleichzeitig zu erfüllen. Unserem

burjatischen Kollegen Bajarto Lubsandorzhev gelang aber das Kunststück. In Zusammenarbeit mit einem Novosibirsker Werk entwickelte er einen Photomultiplier, der alle drei Bedingungen erfüllt: den *QUASAR*. Bajartos kapriziöses High-Tech-Produkt übertrifft in fast allen Parametern ähnliche Entwicklungen aus Japan und Europa. Wir Deutschen haben ihn durch präzise Vermessung des *QUASARs* und durch Materialbeschaffung unterstützt. Nicht zuletzt ist es uns gelungen, beträchtliche Mittel der Volkswagen-Stiftung einzuwerben, mit denen wir das Produktionsteam in dem Novosibirsker Werk am Leben erhalten konnten – in Zeiten, da ihnen nicht nur keine Gehälter gezahlt wurden, sondern dem Werk sogar das Geld für Heizung und Strom ausgegangen war.



Zu den Eigenentwicklungen der DESY-Gruppe zählt ein „Eich-Laser“. Die Zeiten, die von den *QUASAR*en gemessen werden, müssen miteinander auf eine Milliardstel Sekunde genau abgeglichen – „geeicht“ – werden. Das geschieht, indem man alle *QUASAR*e gleichzeitig mit einem extrem kurzen Lichtblitz beschießt. Dieser Blitz wird durch einen Laser erzeugt, der direkt über dem Teleskop hängt, etwa zwanzig Meter über den obersten Glaskugeln, und in einem druckfesten Glaszylinder untergebracht ist. Der Laser-Modul wurde von meinen Doktoranden Thomas Mikolajski und Ole Streicher entwickelt. Ein kommerzieller Stickstoff-Laser, dessen unsichtbares, ultraviolettes Licht durch einen nachgeschalteten komplizierten Mechanismus ins Sichtbare „verschoben“ wird. Gesteuert wird der Laser durch einen

Mikrocomputer, der seine Befehle über das Kabel vom Ufer her erhält.



Ole und Thomas heben den Laser aus einem LKW

Neben dem Laser entwickelte unsere Gruppe weitere Komponenten für das Baikal-Teleskop. Da ist zunächst eine Anordnung kleiner, parallel arbeitender Mikroprozessoren, die alle in der Uferstation ankommenden Informationshäppchen ordnen und für die Weiterverarbeitung durch *Personal Computer* aufbereiten. Hans Heukenkamp, damals Mitglied unserer Gruppe, hat die komplizierte Software programmiert. Thorsten Thon steuerte dicht bestückte Elektronik-Platinen bei. Und Ralf Wischnewski schrieb ein umfangreiches Programmpaket, mit dem sich der Zustand des Baikal-Teleskop zu jedem Moment genauestens abfragen lässt. Unser Computer-Pool in der unscheinbaren Holzhütte des *Kilometer-106* war damals sicher die leistungsfähigste Rechner-Ballung im Umkreis von tausend Kilometern. Und seit 1996 können wir sogar über eine direkte Satellitenverbindung von Zeuthen und Moskau aus auf die Computer zugreifen und das Teleskop steuern.

Das Drei-Trossen-Rennen

Noch einmal, und nun zu letzten Mal, zurück ins Jahr 1988. Was damals in der Tiefe schwebte, war von einem Neutrino-Teleskop noch weit entfernt – es waren Testanordnungen aus relativ kleinen Photomultipliern. Der *QUASAR* befand sich gerade in einem frühen Entwicklungsstadium.

Erst 1989 begannen Igor Belolaptikov und ich mit Simulationsrechnungen für ein Neutrino-Teleskop aus etwa 200 Photomultipliern. Dieses Teleskop wurde dann später auf den Namen *NT-200* (Neutrino Teleskop mit 200 Photomultipliern) getauft.

Es war klar, daß der Weg zu *NT-200* nicht in einem Schritt zu bewältigen sein würde. Womit also beginnen? Eine Anordnung, mit der man die räumliche Lage einer Myonspur vollständig rekonstruieren kann, muß die Ankunftszeiten des Lichts an mindestens fünf Raumpunkten liefern können, die zudem nicht in einer Ebene liegen dürfen. Dazu benötigt man mindestens drei Trossen – die Punkte entlang zweier senkrechter Trossen liegen ja immer genau in der Ebene, die man durch die beiden Trossen legen kann. Wir nahmen uns also vor, so bald wie möglich drei Trossen zu installieren, jede mit sechs *QUASAR*-Paaren.

Mit dem Ziel, drei Trossen zu installieren, waren wir nicht allein. Ebenso verbissen wie wir arbeiteten unter ihrem Projektleiter John Learned unsere Konkurrenten vor Hawaii an einem ähnlichen Plan. Seit 1991 war darüber hinaus noch eine andere Gruppe in das Rennen eingestiegen. Amerikanische und schwedische Physiker versuchten nämlich unter Federführung von Francis Halzen, einem gebürtigen Belgier, im antarktischen Eis ein Neutrino-Teleskop zu installieren.

Die ersten waren aber dann doch wir. Im Frühjahr 1993, genau zu dem Zeitpunkt, als das Eis begann, unter dem Gewicht unserer Winden nachzugeben, ließen wir unsere drei Trossen hinab. Der riesige Regenschirm mit 36 *QUASAR*en, über denen leise surrend der Zeuthener Laser schwebte, wurde in der Tiefe verankert. Es war schon spät am Nachmittag, und der Wind trieb vereinzelte schwere Flocken über den See – nicht mehr Schnee und noch nicht Regen. Wir brachten Burchan das gewohnte Opfer dar, mit Gefühlen der Sorge und Hoffnung, die diesmal noch nachdrücklicher waren als in anderen Jahren. Dann traten wir eilig den Weg zum Ufer an und drängelten uns in den Computerraum. Die Luft war zum Schneiden dick. Ralf, Hans und zwei russische Kollegen saßen vor den Bildschirmen und schlugen sich mit den ersten Daten herum, die der Detektor ans Ufer sendete. Trotz vieler kleiner unverständlicher

Effekte: die unzähligen Bits fügten sich zu sinnvollen Resultaten. Das Teleskop arbeitete.

Zurückgekehrt nach Deutschland, schickte ich eine *e-mail* mit der frohen Nachricht an Learned und Halzen. Beide freuten sich mit uns über den Erfolg, denn die quälend lange Entwicklungsphase des Unterwasser-Teleskope hatte bei vielen Geldgebern eine gewisse Skepsis an der prinzipiellen Realisierbarkeit dieser Detektoren aufkommen lassen. „Congratulation for winning the three string race!“ antwortete mir John Learned, und er hoffte dabei, daß unser Erfolg auch ihm ein weiteres Jahr Bewährungsfrist für sein Hawaii-Projekt ermöglichen würde. Keine zwei Monate später hatten wir in Moskau wie in Zeuthen einige tausend Myonspuren rekonstruiert, die von oben auf das Teleskop trafen. Im Sommer wurden die Ergebnisse im *CERN-Courier*, dem Mitteilungsblatt der europäischen Teilchenphysiker, veröffentlicht.

Die ersten Neutrinos

Die Myonen, die wir rekonstruiert hatten, waren nicht auf Neutrinos zurückzuführen. Sie waren durch Stöße der kosmischen Strahlung in der Erdatmosphäre über dem Teleskop entstanden. Die Erdoberfläche ist einem permanenten Bombardement dieser Strahlung ausgesetzt, die zum größten Teil aus Protonen und Helium-Kernen besteht. Bei der Reaktion dieser Teilchen in den oberen Schichten der Atmosphäre werden riesige Lawinen aus Myonen, Elektronen und anderen Sekundär-Teilchen erzeugt – darunter auch Neutrinos. Ein kleiner Bruchteil der Myonen dringt bis in ein Kilometer Wassertiefe durch. Unser Teleskop registriert etwa fünfzig von ihnen pro Sekunde. Die *Neutrinos*, die in der Atmosphäre entstehen, erzeugen bei ihren seltenen Reaktionen natürlich auch Myonen, die das Teleskop durchfliegen. Deren Zahl ist aber entmutigend klein: es sind nur einige Hundert pro Jahr, also mehr als eine Million mal weniger als die direkt aus den atmosphärischen Lawinen stammenden Myonen. Wie kann man diese winzige Nadel in dem riesigen Heuhaufen finden?

Die Lösung ist – im Prinzip! – einfach. Man akzeptiert nur Myonen, die das Teleskop von unten treffen. Sie müssen aus Reaktionen eines Teilchens stammen, das den Erdball

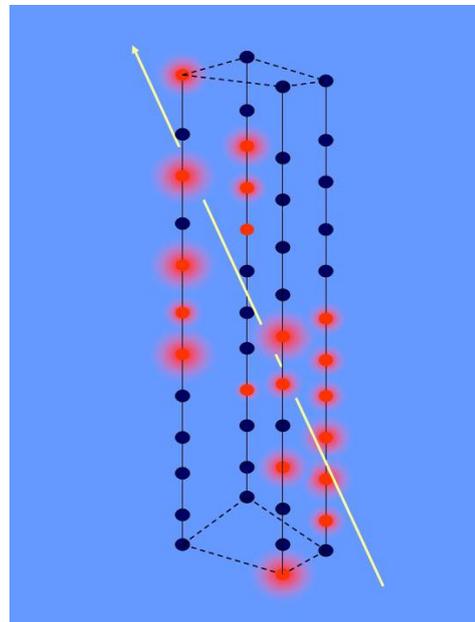
durchqueren kann, und das einzige bekannte Teilchen, das dazu in der Lage ist, ist das Neutrino. So einfach sich die Methode anhört, so viele Schwierigkeiten wirft sie aber in der Praxis auf. Man muß nämlich mit fast absoluter Sicherheit zwischen Oben und Unten unterscheiden können. Wenn man sich einmal auf eine Million Fälle in der Richtung irrt, dann sammelt man etwa genauso viel fälschlich identifizierte wie wirkliche Neutrinoereaktionen. Unsere Hawaii-Kollegen hatten es in diesem Punkt einfacher. Sie wollten in vier Kilometer Tiefe arbeiten, wohin hundertmal weniger Myonen als in ein Kilometer Tiefe herab dringen. Daher betrug in ihrem Fall das kritische Verhältnis statt Eins zu einer Million nur noch Eins zu Zehntausend: ihr „Heuhaufen“ war also hundertmal kleiner als unser. Sie wurden denn auch nicht müde, lauthals zu bezweifeln, daß unser Teleskop jemals eindeutig Neutrinos identifizieren könnte. Das aber sollte sich als Irrtum herausstellen. Es dauerte zwar noch mehr als zwei Jahre, aber schließlich, am neunten November 1995, erreichte mich ein Fax von Domogatsky:

„Lieber Christian, zunächst das Interessanteste: Bei der Analyse der Daten von 1994 trotz ein Ereignis kategorisch allen Tests, und es sieht sehr nach einem Neutrino aus. Natürlich möchte ich nicht entscheiden, ob wir dieses Ereignis als das erste klare Neutrino“ - in einem Unterwasserdetektor – „deklarieren. Aber ein sehr neutrino-ähnliches Ereignis kann man es wohl nennen, und es scheint mir sehr wünschenswert, genau das in zwei oder drei Wochen einer genügend breiten Öffentlichkeit mitzuteilen.“

Tatsächlich waren es dann sogar zwei Neutrinos, die wir – eher unerwartet - mit dem eigentlich dafür viel zu kleinen Teildetektor und seinen nur 36 Photomultipliern identifizieren konnten. Kaum ein halbes Jahr später, im April 1996, begann ein Teildetektor aus 96 Photomultipliern zu arbeiten, und er lieferte dann schon zwölf klar nach oben laufende Myonen. Seit dem Frühjahr 1998 ist das vollständige Teleskop *NT-200* installiert und nimmt nun schon das zweite Jahr Daten.

Fünfunddreißig Jahre nachdem das Prinzip der Unterwasserteleskope zum ersten Mal vorgeschlagen wurde, hat die Methode ihr embryonales Stadium verlassen und ist ins

Leben getreten. Das Prinzip funktioniert praktisch. Nun muß man nur noch die Teleskope so groß bauen, daß man statt der in der Erdatmosphäre erzeugten Neutrinos (und darum handelt es sich vermutlich bei allen bisher identifizierten Neutrinos des Baikalexperiments) auch die mit Sicherheit viel selteneren Neutrinos von entfernten kosmischen Beschleunigern nachweisen kann. In der Tat war *NT-200* ursprünglich als Vorstufe eines weit größeren Detektors gedacht. Aber wie gegenwärtig der Schritt zu einem zehnmal so großen Teleskop im Baikalsee gegangen werden kann, ist unklar. Nicht physikalisch, sondern ökonomisch und politisch.



Eine Bilderbuch-Neutrinoereaktion (1996): Ein Myon durchquert, von unten kommend, den damals aus vier Trossen bestehenden Detektor und „feuert“ dabei 19 Photomultiplierpaare (rot gefärbt).

Kosmische Höllen am Rande der Welt

Der Ursprung der kosmischen Strahlen gehört, immer noch, zu den größten Rätseln der Astrophysik. Dabei wurde dieser stetige Regen geladener Teilchen, der aus dem Kosmos auf die Erdatmosphäre prasselt, schon 1912 entdeckt. Im August jenes Jahres stieg der österreichische Physiker Viktor Hess mit einem Heißluftballon in die Höhe. Er führte ein Elektrometer mit sich, um zu messen, wie

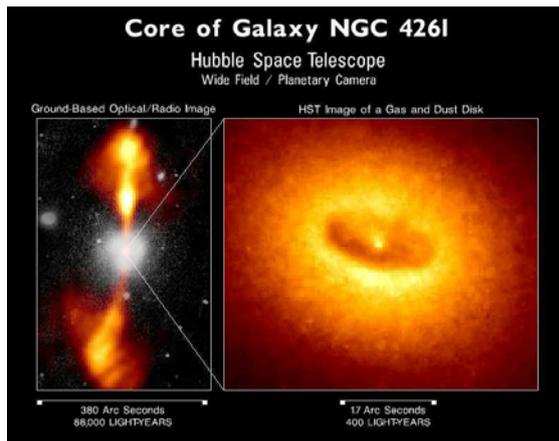
schnell die radioaktive Strahlung des Erdgesteins abfällt, wenn er sich mit dem Ballon von der Erdoberfläche entfernte. Erstaunt stellte Hess fest, daß die Strahlung mit wachsender Höhe nicht abnimmt, sondern, im Gegenteil, stärker wird. Offenbar, so die naheliegende Erklärung, dringt nicht nur aus der Erdoberfläche, sondern auch aus dem Weltraum radioaktive Strahlung zu uns. Je höher Hess flog, um so dünner war die Luftschicht über ihm, und um so weniger dieser Strahlung wurde durch die schützende Atmosphäre abgeschirmt.

Wie schon erwähnt, treten die aus dem Kosmos kommenden „primären“ Teilchen bei ihren Reaktionen in der oberen Atmosphäre regelrechte Lawinen von „sekundären“ Teilchen los. Durch jeden Menschen fliegen etwa zwanzig solcher Teilchen pro Sekunde hindurch. Anders als die ätherischen Neutrinos hinterlassen sie dabei Spuren. Sie ionisieren auf ihrem Weg durch den menschlichen Körper Atome und Moleküle und zerstören damit biologische Strukturen. Im allgemeinen ist das Ergebnis dieser Umwandlung schlechter als der ursprüngliche Zustand. In einer verschwindend geringen Anzahl von Fällen ist das Resultat jedoch ein Fortschritt. Die Natur honoriert diesen Fortschritt manchmal mit einer besseren Überlebens- oder Fortpflanzungschance des betreffenden Individuums. Auf diese Weise tragen die kosmischen Strahlen zu jenem Wechselspiel aus Mutation und Selektion bei, mit dessen Hilfe die Evolution der belebten Natur abläuft. Der kosmische Teilchenregen ist über Millionen Jahre hinweg ein Motor der Prozesse gewesen, die auch uns, die Menschen, hervorgebracht hat.

Bemerkenswert ist die schier unglaubliche Energie von einigen dieser Geschosse. Sie liegt etwa zehn Millionen mal höher als die höchste Energie, die Menschen in ihren ringförmigen Teilchenbeschleunigern, wie etwa dem in DESY, erreicht haben! Irgendwo im Kosmos laufen offenbar Prozesse ab, bei denen phantastische Energiemengen freigesetzt werden, und diese natürlichen Beschleuniger, die das Universum in seiner Milliarden Jahre währenden Geschichte hervorgebracht hat, stellen ihre irdischen Verwandten auf schwindelerregende Weise in den Schatten.

Die Frage ist: *Wo* laufen diese Prozesse ab? Und *wie* laufen sie ab, d.h., wie sind die Objekte beschaffen, in denen die Teilchen auf derart hohe Energien gejagt werden? Die Antwort auf diese Frage steht noch aus. Die geladenen kosmischen Teilchen werden nämlich beim Durchfliegen kosmischer Magnetfelder abgelenkt und verlieren damit die Information über ihre ursprüngliche Richtung. Darum wissen zwar, daß es sie gibt, aber wir wissen nicht, woher sie kommen. Eine Ortung der kosmischen Beschleuniger ist nur mit elektrisch neutralen Informationsträgern wie Photonen (Lichtteilchen) oder Neutrinos möglich, die sich geradlinig ausbreiten.

Natürlich gibt es wohlbegründete Vermutungen über die gesuchten Objekte. Wahrscheinlich zählt das Innere sogenannter aktiver Galaxien dazu, deren Zentralbereiche irgendwann einmal zu schwarzen Löchern kollabiert sind. Die Astrophysiker gehen inzwischen davon aus, daß im Kernbereich jeder Galaxie ein schwarzes Loch sitzt, also auch im Zentrum unserer Milchstraße. Der Unterschied zu den *aktiven* Galaxien, die zumeist aus einer früheren Phase des Universums stammen, liegt in der Masse des schwarzen Lochs. Die Kerne der aktiven Galaxien sind hundert- oder tausendmal schwerer als der Kern unserer eigenen, vergleichsweise ruhigen Galaxis. Wie ein Mahlstrom saugen sie in einem riesigen Strudel Sterne und kosmischen Staub auf. Unvorstellbare Materiemengen „fallen“ auf einer Spiralbahn auf das schwarze Loch zu, um schließlich auf immer darin zu verschwinden. Dabei heizt sich die Materie auf – ähnlich wie die Hände eines Kletterers, der aus großer Höhe an einem Seil herab rutscht und dabei potentielle Energie in Reibungsenergie verwandelt: seine Hände werden brennend heiß. Das schwarze Loch ist eine Art Maschine, die ständig Energie, die in ihrem Schwerfeld steckt, in Wärmeenergie und schließlich in Strahlung umwandelt. Der Strahlungsdruck treibt gewaltige Stoßwellen an, die sich durch das heiße Inferno nach außen fortpflanzen. An den Fronten dieser Wellen werden Teilchen in unzähligen Stößen auf immer höhere Energien beschleunigt, bis sie schließlich irgendwann einmal in die Leere des intergalaktischen Raumes entweichen.



Die Aktive Galaxie NGC 4261: Links die Gesamtansicht mit den Hunderttausend Lichtjahre langen Jets, rechts der Kern, in dessen Zentrum sich ein schwarzes Loch befindet.

Die hellsten unter den verschiedenen Klassen aktiver Galaxien sind die sogenannten Quasare. Die Strahlkraft eines einzigen von ihnen entspricht der von hundert durchschnittlichen Galaxien. Der Name ist eine Verkürzung von „Quasi-Stellar Radio Source“, zu deutsch „sternähnliche Radioquelle“. Quasare gehören zu den am weitesten entfernten Objekten, die die Astronomie bisher identifiziert hat. Kosmische Höllen am Rande der Welt. Je weiter sie entfernt sind, um so länger muß das Licht für seinen Weg von dort bis zu uns gebraucht haben. Darum ist ein Blick auf diese Objekte auch immer ein Blick in die ferne Vergangenheit des Universums. Von allen Akteuren des kosmischen Dramas sind Quasare dem Urknall am nächsten.

Die Astrophysiker wissen nicht hundertprozentig, ob Quasare tatsächlich die dominante Quelle der höchstenergetischen kosmischen Strahlung sind. Wenn sie es aber sein sollten, dann – so die neuesten Berechnungen – sind die Neutrinoflüsse von dort wegen der gewaltigen Entfernung sehr gering. Nicht ausgeschlossen, daß einige Mini-Ausgaben dieser Energiemonster in unserer eigenen Galaxis eine bisher unbemerkte Existenz fristen und uns eines Tages mit einem Neutrinoausbruch überraschen. Wenn man jedoch die Jagd bei den höchsten Energien mit größerer Aussicht auf Erfolg führen will, dann muß man die Teleskope zeh- oder hundertmal größer bauen – ein Plan, der unter

den gegenwärtigen Bedingungen in Rußland kaum zu verwirklichen ist.

Allerdings wird selbst der gegenwärtige *NT-200* -Detektor noch für einige Jahre eine wichtige wissenschaftliche Rolle spielen. Sicherlich wäre die Entdeckung einer extraterrestrischen Neutrinoquelle ein eher unwahrscheinlicher Glücksfall – aber wer weiß? Immerhin können durch die *Nichtbeobachtung* solcher Quellen einige womöglich zu optimistische Abschätzungen widerlegt werden. Damit wird die Palette der möglichen Hypothesen zur Erklärung der kosmischen Strahlung verkleinert. Insofern – das kann man nicht häufig genug betonen - ist auch ein Nullresultat ein Erkenntnisgewinn.

Schwieriger wird es, wenn gleichzeitig anderswo auf der Welt empfindlichere Teleskope entstehen. Dann muß man versuchen, für das kleinere Teleskop ausgewählte Felder zu finden, auf denen es mit den „Großen“ konkurrieren kann. Tatsächlich gibt es inzwischen ein größeres Neutrino-teleskop als *NT-200*. Es heißt *AMANDA* und befindet sich am geografischen Südpol. Die *DESY*-Gruppe arbeitet seit 1995 auch an diesem Projekt mit, und mittlerweile hat sich der Schwerpunkt unserer Aktivitäten vom Baikalsee in die Antarktis verlagert. Aber *AMANDA* kann ebenso wie *NT-200* nur Neutrinos von unten eindeutig als solche identifizieren. „Unten“ heißt bei *NT-200* von Süden, bei *AMANDA* dagegen von Norden. *AMANDA* erforscht also den Nordhimmel, während das Baikal-Teleskop den Südhimmel im Visier hat. Beide Detektoren machen sich darum nicht gegenseitig überflüssig, sondern ergänzen einander.

Dunkle Materie und magnetische Monopole

Eines der Felder, auf denen sich das Baikal-Teleskop und der Antarktis-Detektor ebenfalls ergänzen können, ist die Suche nach dunkler Materie. Wir glauben heute aufgrund vielfältiger Befunde, daß der größte Teil des kosmischen Inventars nicht aus jener Materie besteht, aus der auch wir selbst bestehen – also nicht aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Es scheint so, als wenn die leuchtenden Sterne und Galaxien in einem unsichtbaren See „dunkler“ Materie schwimmen. Die dunkle Materie tritt nur schwach mit der normalen

Materie in Wechselwirkung. Genaugenommen ist sie darin den Neutrinos ähnlich. Vielleicht tragen Neutrinos sogar zur Gesamtbilanz der dunklen Materie bei. Der größte Teil dieses geheimnisvollen Stoffs scheint aber im Vergleich zu Neutrinos sehr schwer zu sein. Darum nennt man die dazugehörigen Teilchen auch WIMPs (Weak Interacting Massive Particles). WIMPs können aufgrund ihrer Masse von der Schwerkraft großer Himmelskörper eingefangen werden und bis in deren Mitte trudeln, dorthin wo die Netto-Schwerkraft praktisch gleich Null ist. Auf diese Weise könnte sich auch im Zentrum der Erde ein dichter Schwarm von WIMPs angesammelt haben, der dort nahezu unbeeinflusst durch die normale Materie als unsichtbare Wolke schwebt. Gelegentlich stoßen zwei WIMPs zusammen und tun das, was ihnen bei den seltenen Reaktionen mit normaler Materie verwehrt ist: sie zerfallen in zwei Bündel normaler Elementarteilchen, darunter auch Neutrinos. Wenn es die sagenhaften WIMPs gibt, dann müßte darum man gelegentlich eines der Zerfalls-Neutrinos aus der Richtung des Erdzentrums beobachten.

Bisher hat man trotz sorgfältiger Suche noch keinen Neutrino-Überschuß aus dem Erdzentrum beobachtet. Empfindlicheren Neutrino-Teleskopen als den bisherigen, die in Tunneln und Höhlen installiert waren, könnte der Nachweis vielleicht dennoch gelingen. Sowohl am Baikalsee wie in der Antarktis suchen wir danach – allerdings auch hier bislang vergeblich. Das Baikal-Experiment hat dabei einen kleinen, vielleicht aber entscheidenden Vorteil vor dem Antarktis-Teleskop. *AMANDA* ist nämlich für geringe Energien blind und springt erst auf ziemlich hochenergetische Myonen an. Die Energieschwelle von *NT-200* ist dagegen etwa dreimal kleiner als die von *AMANDA*. Da aber WIMPs, wenn sie nicht allzu schwer sind, bevorzugt Neutrinos geringer Energie aussenden, könnte *NT-200* hier vielleicht die besseren Karten haben.

Ein anderes exotisches Teilchen, auf das Neutrino-Teleskope reagieren würden, erblickte 1931, ein Jahr nach dem Postulat des Neutrinos, als reine Kopfgeburt das Licht der Welt. Paul Dirac, ein junger englischer Physiker, hatte sich gefragt, warum die Natur magnetische Ladungen nur als Dipole

vorkommen läßt und nicht, wie elektrische Ladungen, auch als Einzelladungen, als „Mono-Pole“. Er fand keinen überzeugenden physikalischen Grund, der das Vorhandensein von magnetischen Monopolen verboten hätte. Da deren Existenz zudem noch den Grundgleichungen des Elektromagnetismus eine ästhetisch befriedigende Symmetrie verleihen würde, ging Dirac noch einen Schritt weiter und berechnete, wie sich diese Exoten bemerkbar machen müßten. Er stellte fest, daß ein magnetischer Monopol die Materie, die er durchfliegt, fast fünftausend mal stärker ionisieren würde als normale Teilchen. Der Cherenkov-Lichtkegel, den er hinter sich herzieht, wäre sogar achttausend mal stärker als der von Myonen. Das ist der Schlüssel zum Nachweis von Monopolen. Falls ein magnetischer Monopol mit annähernd Lichtgeschwindigkeit ein Neutrino-Teleskop durchfliegen sollte, dann wäre es, als wenn man eine kleine Glühbirne durch den Detektor katapultiert. Alle Photomultiplier würden ansprechen und eine Signalkaskade liefern, die jede Verwechslung mit einem weniger exotischen Teilchen ausschloße.

In den siebziger Jahren stellte sich heraus, daß Monopole in großer Zahl während des Urknalls entstanden sein müssen, und daß sie sich nicht nur durch ihre magnetische Einzelladung, sondern auch durch eine gigantische Masse auszeichnen. Ein Monopol dürfte demnach zwischen einer Milliarde und hundert Millionen Milliarden mal so schwer wie ein Proton sein. Wer diese Dinosaurier der Teilchenwelt zweifelsfrei nachwies, dürfte sich der besonderen Aufmerksamkeit des Nobelkomitees sicher sein. Ihre Existenz hätte die tiefgreifendsten Rückwirkungen auf unser Bild vom Urknall, auf die Theorie der Elementarteilchen und auf unser Verständnis der Grundkräfte der Natur. Unnötig zu erwähnen, daß wir bisher noch keine Monopole gefunden haben. Immerhin ergeben die kombinierten Meßdaten des Baikal- und des Antarktis-Teleskops, daß selbst eine Fläche so groß wie ein Fußballfeld von weniger als einem Monopol pro Jahr getroffen wird. Diese Ausschlußgrenze ist etwa zehnmal schärfer als die aller vorherigen Suchprogramme.

Das Neutrino-Teleskop als hydrologisches Labor

Eine der anregenden Besonderheiten unseres Forschungsgebietes besteht darin, daß wir nicht in der kleinen, auf ein ganz begrenztes Forschungsziel zugeschnittenen Welt eines Laborraumes arbeiten, sondern in der offenen Natur. Wir unterliegen dem reizvollen Zwang, Naturwissenschaft im eigentlichen, breiten Sinne zu betreiben zu müssen. Manchmal spielt uns die Natur dabei Streiche, die wir erst langsam zu parieren lernen. So zum Beispiel, als wir zu Beginn der Experimente beobachteten, wie die alljährlichen Frühjahrsgewitter ihre Blitze haargenau auf unsere Metalltrossen lenkten, die senkrecht in dem kristallklaren See hingen. Der Grund besteht in dem ausgeprägten Mangel des Baikals an Mineralsalzen, die für eine gute elektrische Leitfähigkeit vonnöten sind. Das salzarme Wasser ähnelt eher einem Isolator, und in diesem Isolator standen – einsamen Blitzableitern gleich – unsere Trossen. Man kann sich dagegen durch Sicherungsschaltungen schützen – aber Lehrgeld muß man zunächst doch zahlen.

Eine für viele Seen typische Erscheinung ist das feine Leuchten, das Algen, Bakterien und kleine Lebewesen aussenden. Man nennt dieses Leuchten Biolumineszenz. Auch abgestorbene Organismen senden während des Zerfallsprozesses Licht aus. Natürlich können unsere Photomultiplier dieses kaum wahrnehmbare Flimmern aufzeichnen. Und dabei stellte sich heraus, daß die Lichtblitze der Biolumineszenz uns ein völlig neues Forschungsgebiet eröffnen: die Untersuchung der Wasserströmungen in den Tiefen des Baikals.

Wenn zum Beispiel über dem See ein Gewitter tobt und der Regen aus den vielen kleinen Bächen frisches organisches Material in den See spült, dann muß man nicht lange warten, bis die Photomultiplier beginnen, verrückt zu spielen. Zwei oder drei Tage dauert es, bis die absterbenden Organismen bis auf ein Kilometer Tiefe gesunken sind und die Zählraten der empfindlichen Sensoren auf schwindelnde Höhen zu treiben. Dann zeichnet jeder Photomultiplier bis zu einer Million Signale pro Sekunde auf. Manchmal gelangt die leuchtende Front auch schneller in große Tiefen, und zwar dann, wenn sie durch

vertikale Wasserströmungen angetrieben wird. Aus der zeitlichen Verzögerung, mit der erst die oberen, dann die nächsten, übernächsten und schließlich auch die untersten Photomultiplier ansprechen, kann man auf die Geschwindigkeit schließen, mit der die Wolke das Teleskop durchquert.

Vertikale Wasserströmungen sind für den Baikalsee lebenswichtig. Sie transportieren Sauerstoff in die Tiefe und garantieren, daß der See auch auf seinem Grund noch Leben erlaubt. Viele Limnologen („Seenkundler“) arbeiten an Strömungsmodellen, die den Wassertransport im Baikalsee erklären sollen. Unsere Messungen geben ihnen neue Resultate in die Hand, die ihre eigenen Daten ergänzen. Konventionelle Strömungsmesser sprechen nämlich nicht auf langsame Wasser-verschiebungen an. Wenn sich eine senkrechte Wasserfront mit nur einigen Millimetern pro Sekunde fortpflanzt – und das ist der Regelfall in unseren Tiefen – dann zeigen die meisten dieser Geräte einfach „Null“ an. Unsere leuchtenden Wolken sind also ideale *Tracer* (Markiersubstanzen) zum Verfolgen langsamer Wasserbewegungen.

Wir nutzen nicht nur unsere ursprünglich dafür gar nicht vorgesehenen Photomultiplier für die Limnologie, sondern wir setzen auch die konventionellen Meßgeräte der Wasserkundler ein. An unseren Trossen hängen lange Ketten mit Thermometern, die auf ein Tausendstel Grad genau messen, Geräte zur Bestimmung des Salzgehaltes und empfindliche Drucksensoren. Das Bassin vor *Kilometer-106* und die einzigartige Möglichkeit, dort ganzjährig zu messen, lockt inzwischen immer mehr Seenforscher an. Darunter sind auch Wissenschaftler aus anderen Ländern, die sich der Erkundung des Baikals verschrieben haben. Aus der Schweiz erscheint nun schon zum zweitenmal Michael Sturm, um dem See mit dem Standard-Instrumentarium des Umweltforschers zu Leibe zu rücken. Und Hedwig Oberhänsli vom Geoforschungszentrum Postdam läßt durch die Eislöcher mit Hilfe unserer großen Winden ein sperriges Bohrgestänge in die Tiefe. Damit gewinnt sie Bohrkerne aus den Ablagerungen am Seegrund. Die Schichtungen verraten ihr etwas über das frühere Klima in diesem Teil Asiens.

Quo Vadis?

Am Baikal fällt der Abend ein. Die Sonne sendet ihre letzten Strahlen über die Landschaft südwestlich des *Kilometer-106*. Ich sitze mit Ralf Wischnewski und Grigorij Domogatsky an einem blankgescheuerten Holztisch in der Küche. Wir rühren in unserem gezuckerten Tee und blicken auf das andere Ufer, das langsam in der Dunkelheit versinkt.



Die Ruhe des abendlichen Panoramas überträgt sich auch auf uns, und wir unterbrechen unser Gespräch für einen Moment. Bald wird der klare Himmel mit Sternen übersät sein. Wenn wir dann nach oben blicken, können wir unsere Gedanken vom See zu den fernen Welten schweifen lassen, die wir durch unsere Arbeit verstehen wollen. Wir können niemandem einen absehbaren materiellen Nutzen aus der Erforschung des fernen Universums versprechen. Wer aber über den Tellerrand des Alltags hinaus sieht, der mag sich anstecken lassen von der Faszination, die das Weltall seit jeher auf Menschen ausgeübt hat. Die lebensfeindliche, eiskalte Leere, in deren Weite unsere Erde treibt, hat uns selbst, den Menschen, hervorgebracht. Niemand kann schlüssig sagen, ob das Zufall oder Notwendigkeit war. Aber wir sind nun einmal da und können die Frage nach unserem Woher und unserem Wohin stellen. Wir können versuchen, den Ablauf der frühen Sternexplosionen zu ergründen, aus deren Asche wir selbst – Kinder des Weltalls - zum großen Teil bestehen. Wir können die Herkunft der kosmischen Strahlen erforschen, die so nachdrücklich am Rad der biologischen Evolution drehen; oder das Wesen der dunklen Materie ergründen, deren Schwerkraft es anscheinend überhaupt erst möglich gemacht

hat, daß sich Galaxien zusammenklumpen konnten.

Domogatsky zündet sich eine seiner unvermeidlichen Papyrossy an. Während wir den Rest unseren Tees austrinken, entwickelt Ralf, rastlos wie immer, eine Idee, wie man die Datenauslese des Teleskops verbessern könnte. Draußen gehen zwei Moskauer Studenten durch die flachen Pfützen, deren millimeterdünne Eisschicht unter ihren schweren Winterstiefeln krachend zersplittert. Sie wollen noch einmal auf den See, um im Dunkeln eine Messung zu machen, bei der das Tageslicht gestört hätte. Kurz darauf betritt Nikolaj Budnev die Küche und bringt, neben einem Schwall kalter Luft, zwei französische Physiker mit, die hergekommen sind, um sich technologische Kniffe für ihr eigenes Experiment im Mittelmeer abzugucken. Wissenschaftlicher Fortschritt ist ein weltweites Unterfangen.

Es ist nicht klar, ob das Baikal-Teleskop im Konzert der künftigen großen Neutrinoanlagen ein Hauptmotiv oder nur eine Seitenmelodie spielen wird. Die Baikal-Kollaboration hat eine Pionierleistung vollbracht. Inzwischen hat *AMANDA* das Baikalteleskop überholt, ein Erfolg, zu dem auch die DESY-Gruppe maßgeblich beigetragen hat. Im Mittelmeer bereitet eine finanzkräftige Kollaboration unter französischer Führung ein ähnlich großes Teleskop vor. Für die nächsten zwei bis drei Jahre wird aber das größte Neutrinooteleskop auf der Nordhalbkugel der Erde trotzdem noch *NT-200* heißen. Und wie immer der weitere Weg aussehen mag, ob es weltweit ein oder zwei Super-Teleskope geben wird: der *Kilometer-106* mit seinem unscheinbaren Holzhaus war ein markanter Schauplatz dieses Prozesses.

