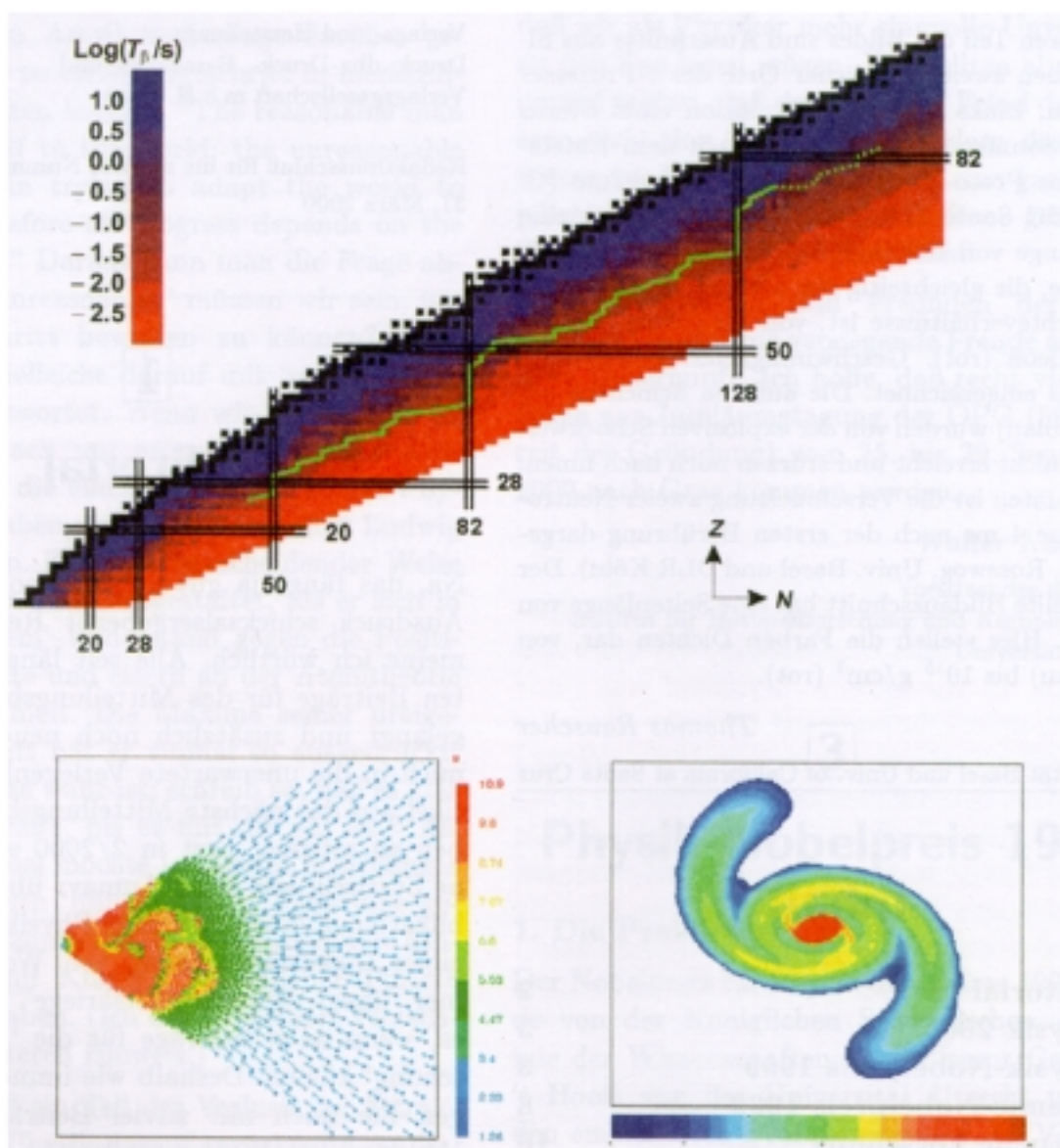




# Mitteilungsblatt

der Österreichischen  
Physikalischen Gesellschaft

Heft 1 / Jänner 2000



**Nobelpreise 1999: Physik und Chemie**  
**Nukleare Astrophysik**  
**Max Auwärter-Preis**

## Beschreibung des Titelbildes:

Oben ist der neutronenreiche Teil der Nuklidkarte zu sehen, die gebundenen Atomkerne von den stabilen Kernen bis zur Neutronabbruchkante, aufgetragen in der Ebene der Neutronenzahlen (N) und Protonenzahlen (Z). Stabile Kerne sind schwarz eingetragen, die Farben geben theoretisch vorhergesagte Halbwertszeiten der instabilen Kerne wieder. Zur besseren Übersicht sind die Zahlen der abgeschlossenen Schalen markiert. Im astrophysikalischen r-Prozeß werden Kerne fern der Stabilität erzeugt. Ein r-Prozeß-Pfad für realistische Bedingungen ist grün eingezeichnet.

Im unteren Teil des Bildes sind Ausschnitte aus Simulationen zweier möglicher Orte des r-Prozesses zu sehen. Links unten die Explosion eines Sterns mit 25 Sonnenmassen, 140 ms nach dem Entstehen eines Proto-Neutronensterns im Zentrum (C. Fryer, UC Santa Cruz). Der Ausschnitt hat eine Seitenlänge von 1000 km. Die Farben kodieren die Entropie, die gleichzeitig ein Maß für Temperatur- und Dichteverhältnisse ist, von 1.2 (blau) bis 10.0  $k_B$ /Nukleon (rot). Geschwindigkeitsvektoren sind ebenfalls eingezeichnet. Die äußeren Schichten des Sterns (blau) wurden von der explosiven Schockwelle noch nicht erreicht und stürzen noch nach innen. Rechts unten ist die Verschmelzung zweier Neutronensterne 4 ms nach der ersten Berührung dargestellt (S. Rosswog, Univ. Basel und DLR Köln). Der dargestellte Bildausschnitt hat eine Seitenlänge von 400 km. Hier stellen die Farben Dichten dar, von  $10^9$  (blau) bis  $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup> (rot).

*Thomas Rauscher*

Universität Basel und Univ. of California at Santa Cruz

## Inhalt

<b>1 Editorial</b>	<b>2</b>
<b>2 Physik 2000</b>	<b>3</b>
<b>3 Physik-Nobelpreis 1999</b>	<b>3</b>
<b>4 Chemie-Nobelpreis 1999</b>	<b>8</b>
<b>5 Aktuelle Forschung</b>	<b>16</b>
<b>6 Fachausschüsse</b>	<b>25</b>
<b>7 Max Auwärter-Preis</b>	<b>27</b>
<b>8 Buchankündigung</b>	<b>28</b>
<b>9 Science Week</b>	<b>28</b>
<b>10 Stellenausschreibung</b>	<b>29</b>
<b>11 Tagungen</b>	<b>29</b>

## Impressum

Herausgeber und Medieninhaber:  
Österreichische Physikalische Gesellschaft  
<http://www.ati.ac.at/0ePG>

Anschrift des Herausgebers:  
Dr. Robin Golser  
Institut für Isotopenforschung und Kernphysik  
Universität Wien  
Währingerstraße 17  
A-1090 Wien

Verlags- und Herstellungsort: Graz  
Druck: dbv-Druck-, Beratungs- und  
Verlagsgesellschaft m.b.H. Graz

Redaktionsschluß für die nächste Nummer:  
31. März 2000

**1**

## Editorial

Na, das fängt ja gut an! Was sonst meist ein Ausdruck schicksalsergebener Resignation ist, meine ich wörtlich. Alle seit längerem geplanten Beiträge für das Mitteilungsblatt sind eingelangt und zusätzlich noch neue. Das bringt mich in die unerwartete Verlegenheit, zwei Artikel auf das nächste Mitteilungsblatt verschieben zu müssen. Erst in 2/2000 werden Sie eine Statistik von Fritz Aumayr über Spitzenpublikationen österreichischer Physiker finden und einen Diskussionsbeitrag von Wolfgang Kummer über 'Wissenschaftskriege'. Schön wäre es, wenn auch Beiträge für die 'Aktuelle Forschung' kämen. Deshalb wie immer: bitte bringen Sie mich mit zuviel Beiträgen ruhig in Verlegenheit! Nicht vergessen möchte ich, auf die 50. Jahrestagung der ÖPG hinzuweisen  
<http://physik.kfunigraz.ac.at/OPG/>  
und auf die ScienceWeek@Austria  
<http://www.scienceweek.at/> .

*Robin Golser*

## Physik 2000

### Unvernunft in der Physik

Der Übergang ins Jahr 2000 hat schon viele Überlegungen über die Zukunft der Physik angeregt. Hier sollen ein paar Gedanken folgen, die sich in das Spektrum der Hoffnungen einreihen.

George Bernard Shaw hat einmal in seiner un-nachahmlichen Art eine Aussage darüber gemacht, wie es zu einem Fortschritt in menschlichen Tätigkeiten kommt: "The reasonable man adapts himself to the world; the unreasonable one persists in trying to adapt the world to himself: Therefore all progress depends on the unreasonable." Daraus kann man die Frage ableiten: Wie 'unreasonable' müssen wir sein, um einen Fortschritt bewirken zu können? Niels Bohr hätte vielleicht darauf mit 'unreasonable enough' geantwortet. Wenn wir in unserem eigenen Land nach 'unreasonable' Personen Ausschau halten, die einen Fortschritt in der Physik bewirkt haben, dann fällt mir sofort Ludwig Boltzmann ein. Er hat in entscheidender Weise die Physik um 1900 mitgestaltet, als er sich in 'unvernünftigem' Widerstand gegen die Positiven auflehnte und eisern an der Atomtheorie der Gase festhielt. Die Maxime seiner ureigenen Unvernunft hat er einmal so ausgedrückt: "Bring vor, was wahr ist; schreib so, daß es klar ist; und verficht's, bis es mit dir gar ist." Als weiteres Beispiel möchte ich Erwin Schrödinger anführen, dessen 'unvernünftige' Einwände gegen die Quantenmechanik – zusammen mit Einstein – viel zur Klärung wesentlicher Punkte beigetragen haben. (Ich danke Herbert Pietschmann für letzteren Hinweis.)

Ich denke, daß ein Teil des Verlusts an Attraktivität in der Physik darauf zurückzuführen ist, daß wir zu 'reasonable' geworden sind. Physik ist nicht nur umfassender – sie ist zum Teil auch langweiliger geworden. Das liegt meines Erachtens unter anderem daran, daß wir offenbar nicht mehr genug 'unvernünftige' Begeisterung ausstrahlen, die auch von der Öffentlichkeit wahrgenommen wird. Andererseits ste-

hen wir aber auch an einer interessanten Wende bezüglich der Unvernunft in der Physik. Unvernunft wird gefährlich, wenn Sie zu Unsinn ausartet. Hier hat sich – nicht nur in der Physik – ein Trend angekündigt, der durch die 'Vercomputerisierung' unserer Welt entscheidend beeinflusst wird. Wenn ich überhaupt einer Vorhersage für die Zukunft zustimme, dann der, daß gegen den Einfluß der Computerentwicklung alles andere verblasen wird.

Mein Wunsch für die Zukunft der Physik ist, daß wir als Physiker mehr sinnvolle Unvernunft an den Tag legen mögen. Wir sollten aber auch darauf achten, daß der wirkliche Feind des Wissens nicht das Nichtwissen, sondern das Halbwissen ist. Hier liegt, meine ich, eine große Verpflichtung aller Naturwissenschaftler – gerade im Zeitalter der Computergesellschaft.

Allen Mitgliedern und Freunden der ÖPG wünsche ich eine nie versiegende Freude an kreativer Unvernunft. Ich hoffe, daß recht viele von Ihnen zur Jubiläumstagung der ÖPG (50 Jahre seit der Gründung) vom 25. bis 29. September 2000 nach Graz kommen werden.

*Walter Kutschera*

Vorsitzender der ÖPG

Institut für Isotopenforschung und Kernphysik der  
Universität Wien

## Physik-Nobelpreis 1999

### 1. Die Preisträger

Der Nobelpreis für Physik des Jahres 1999 wurde von der Königlichen Schwedischen Akademie der Wissenschaften an Professor Gerardus 't Hooft von der Universität Utrecht und an den emeritierten Prof. Martinus J. G. Veltman aus Bilthoven (beide Niederlande) vergeben und zwar – wie es im offiziellen Relativsatz heißt – "for elucidating the quantum structure of electroweak interactions in physics."

In der offiziellen Presseaussendung des Nobelkomitees heißt es weiter: "Die beiden Forscher Gerardus 't Hooft und Martinus J. G. Veltman

erhielten den Nobelpreis dafür, daß sie die Theorie der Elementarteilchenphysik auf festeren mathematischen Grund gestellt haben. Sie haben gezeigt, wie die Theorie zu genauen Berechnungen physikalischer Größen angewendet werden kann. Experimente an den Teilchenbeschleunigerlaboratorien in Europa und den USA haben ihre Theorien weitgehend bestätigt.”

Die beiden Physiker haben seit langem Kontakte zu österreichischen Forschungsgruppen. So war z.B. Gerardus 't Hooft einer der Vortragenden bei einem Triangel-Seminar Mitte der siebziger Jahre im Bundesheim Raach, bei dem auch der spätere Nobelpreisträger Carlo Rubbia vorgetragen hat. Daß mit langjährigen wissenschaftlichen Kontakten auch eine persönliche Freundschaft einhergeht, versteht sich fast von selbst.

Die Verleihung des Nobelpreises für Physik 1999 hat die Fachleute auf dem Gebiet der Elementarteilchenphysik zugleich erfreut und überrascht. Erfreut, weil es unbestritten ist, daß die beiden Theoretiker wesentlichen Anteil an dem großartigen Erfolg des sogenannten ‘Standardmodells’ haben, überrascht deshalb, weil eigentlich die Meinung vorherrschte, daß mit dem Nobelpreis für Physik des Jahres 1979 an S. Glashow, A. Salam und S. Weinberg “for their contribution to the theory of unified weak and electromagnetic interactions between elementary particles, including inter alia the prediction of the weak neutral current” diese Theorie schon mit dem Nobelpreis ausgezeichnet worden war. Damals haben wohl viele Fachleute bedauert, daß die beiden heuer Ausgezeichneten nicht inkludiert werden konnten, da nach dem Testament von Alfred Nobel der Preis niemals an mehr als drei Kandidaten vergeben werden darf.

Der Autor hat zusammen mit dem Experimentalphysiker Dieter Haidt vom DESY im Jahre 1988 einen Band für die Reihe ‘Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik’ veröffentlicht und schon damals folgende Formulierung gewählt<sup>1</sup>:

<sup>1</sup>D. Haidt und H. Pietschmann: *Electroweak Interactions - Experimental Facts and Theoretical Foundation*, Landolt-Börnstein, New Series Group I, Vol. 10, Springer Verlag Berlin (1988) p.13

“Quantum flavourdynamics is the theory of electroweak interactions between fermions and gauge bosons. It was developed by Glashow, Salam, Weinberg and others”; es folgen neun Literaturzitate, je eines von Glashow, Weinberg und Veltman, vier von Salam und zwei von 't Hooft.

Eine ähnliche Situation gab es im Jahre 1965, als der Nobelpreis für die erste Quantenfeldtheorie, die Theorie der Wechselwirkung zwischen Elektronen und Photonen, an F. Tomonaga, J. Schwinger und R. P. Feynman “for their fundamental work in quantum electrodynamics, with deep-ploughing consequences for the physics of elementary particles” vergeben worden war. Damals war der vierte F. Dyson, dessen wesentliche mathematische Beiträge nicht gewürdigt werden konnten. (Allerdings wird der Nobelpreis für rein mathematische Beiträge ja nicht vergeben.) Im heurigen Jahr ist die Situation allerdings anders, weil die Beiträge der beiden Preisträger zwar mathematischer Natur sind, aber doch zu wesentlichen physikalischen Konsequenzen geführt haben. Das müssen wir im folgenden genauer erläutern.

## 2. Eine Erinnerung an die Grundvorlesung aus theoretischer Physik

Wir alle haben während des Physikstudiums einmal gelernt, daß klassische Elektrodynamik durch die Maxwell’schen Gleichungen beschrieben wird. Dabei können wir entweder die physikalisch meßbaren Felder ( $\mathbf{E}, \mathbf{B}$ , relativistisch:  $F^{\mu\nu}$ ), oder aber deren Potentiale ( $\phi, \mathbf{A}$ , relativistisch:  $A^\mu$ ) als Grundgrößen verwenden. Als meßbare Größen sind die Felder eindeutig, während die Potentiale als sekundäre Größen nicht eindeutig gegeben sind. Wir können sie durch eine sogenannte Eichtransformation ändern, ohne daß die Felder dabei geändert werden. Selbstverständlich müssen alle beobachtbaren Größen eindeutig sein, das heißt, sie dürfen von einer Eichtransformation nicht geändert werden. Schreiben wir nun die Maxwell’schen Gleichungen in kompakter, relativistischer Schreibweise an:

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = e \cdot j^\nu$$

Der elektromagnetische Viererstrom  $j^\nu$  ist im Bereich der Elementarteilchenphysik aus den

Wellenfunktionen der geladenen Elementarteilchen zusammengesetzt. Wenn nun das Photon eine Masse hätte, dann sähen die Maxwell'schen Gleichungen folgendermaßen aus:

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} - m^2 \cdot A^\nu = e \cdot j^\nu$$

Es ist sofort ersichtlich, daß dabei eichabhängige Potentiale auftreten, so daß diese Gleichung physikalisch nicht sinnvoll ist. (Heute wird dies als Argument angeführt, warum das Photon streng masselos sein muß, da jede noch so kleine Photonmasse  $m$  die Eichinvarianz zerstören würde.)

### 3. Der Higgs-Mechanismus

Eine der wesentlichen Neuerungen, die zum Nobelpreis von 1979 geführt haben, war die Anwendung des sogenannten Higgs-Mechanismus auf die schwache Wechselwirkung. Der Physiker Higgs hatte nämlich gezeigt, wie man für ein dem Photon analoges Vektorteilchen eine Masse erzeugen kann, ohne die Eichinvarianz in den Grundgleichungen brechen zu müssen. Dazu schrieb er die Maxwell'schen Gleichungen an unter der Annahme, daß der elektromagnetische Viererstrom  $j^\nu$  von einem skalaren geladenen Teilchen  $\phi$  herrührt. Da es sich dabei um ein ganz normales physikalisches Phänomen handelt, muß die entsprechende Gleichung eichinvariant sein. Sie enthält viele Terme, die alle zusammen tatsächlich dieser Forderung genügen. Wir wollen davon nur jenen Term, auf den es hier ankommt, anschreiben:

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = g \cdot A^\nu \phi^* \phi + \dots$$

Wenn wir nun zunächst rein formal annehmen, daß das skalare Feld  $\phi$  eine Konstante enthält, dann können wir diese Konstante abspalten und die Gleichung folgendermaßen umschreiben:

$$\phi = v + \phi'$$

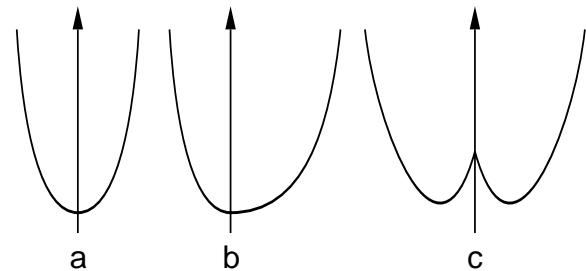
$$\partial_\mu F^{\mu\nu} - m^2 \cdot A^\nu = g \cdot A^\nu \phi'^* \phi' + \dots$$

mit

$$m^2 = g \cdot v^2$$

Wir sehen, daß wir nun formal eine Masse für ein Vektorteilchen erzeugt haben, ohne daß wir

mit einer symmetrieverletzenden Bewegungsgleichung begonnen haben. Freilich haben wir das Problem damit nicht ad hoc gelöst, sondern nur verschoben, nämlich auf die Frage, was denn eine Konstante  $v$  in einem Feld bedeuten könne; im allgemeinen verlangen wir ja, daß der Erwartungswert des Grundzustandes eines Feldes (im Falle der Elementarteilchen der Vakuum-Erwartungswert) verschwindet, woraus sofort folgt, daß die angenommene Konstante  $v$  ebenfalls verschwinden muß. Der Ausweg aus dieser Schlußkette heißt 'spontane Symmetriebrechung'. Ich will gar nicht versuchen, sie hier im Detail verständlich zu machen, da solche Versuche – wenn sie nicht überhaupt mißlingen – bestenfalls zu irrigen Meinungen und Vorstellungen führen. Ich will vielmehr das Wesen einer spontanen Symmetriebrechung plausibel machen und die Unterschiede zu anderen Fällen anführen. Dazu betrachten wir in der folgenden Abbildung drei Potentiale.



Das Potential  $a$  ist symmetrisch, im Grundzustand und im angeregten Zustand. Das Potential  $b$  ist offensichtlich unsymmetrisch, jedoch ist der Grundzustand auch in einer symmetrischen Lage. Hingegen ist das Potential  $c$  zwar symmetrisch, der Grundzustand ist aber entweder links oder rechts von der Symmetrieachse angesiedelt, während höher angeregte Zustände wieder symmetrisch sein können. Einen solchen Fall nennt man spontane Symmetriebrechung, da das Potential (und damit die Lagrange-Funktion) keine Symmetriebrechung zeigt; diese wird erst durch den Grundzustand erzeugt. In diesem Fall enthält das skalare Feld eine Konstante, weil ja nunmehr der Grundzustand nicht verschwindet, der Vakuum-Erwartungswert des Feldes ist also eine von Null verschiedene Konstante.

### 4. Die vereinheitlichte Theorie elektro-

## schwacher Wechselwirkungen

Mit Hilfe des Higgs-Mechanismus konnten Glashow, Salam und Weinberg die Masse der für die schwachen Wechselwirkungen verantwortlichen Vektorfelder genau vorhersagen, so wie wir dies im vorigen Abschnitt gezeigt haben. Darüber hinaus aber mußten sie neben den aus der schwachen Wechselwirkung bekannten geladenen Vektorfeldern  $W^+$  und  $W^-$  (für  $\beta^+$  und  $\beta^-$  Zerfall verantwortlich) auch ein weiteres, neutrales Vektorboson  $Z^0$  postulieren und damit die Existenz sogenannter neutraler schwacher Ströme. Dies sind etwa Streuprozesse von Neutrinos, bei denen sich die Neutrinos nicht in geladene Leptonen verwandeln, sondern selbst ungeladene Neutrinos bleiben.

$$\text{z.B. : } \nu + p \rightarrow \nu + X$$

Die Existenz solcher Wechselwirkungen hatte bis dahin niemand vermutet. Ihre Entdeckung beim CERN im Jahre 1973 ließ daher die Theorie von Glashow, Salam und Weinberg nobelpreiswürdig erscheinen.

Erwähnen möchte ich auch, daß im Jahre 1984 der Nobelpreis an C. Rubbia und S. Van der Meer für den im Jahr vorher gelungenen Nachweis der schwachen Bosonen  $W$  und  $Z$  vergeben worden war (“for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles  $W$  and  $Z$ , communicators of weak interactions”). Die experimentell gefundene Masse stimmte mit den Vorhersagen überein.

## 5. Die elektroschwachen Wechselwirkungen als Quantenfeldtheorie

Um zu verstehen, was nun der besondere Beitrag der Nobelpreisträger des Jahres 1999 war, möchte ich wieder an die Grundvorlesungen in Physik erinnern: Wir alle haben irgendwann gehört, daß die Idee, die Physik des Mikrokosmos mit Hilfe von Streuexperimenten zu erhellen, von Rutherford stammt. Dieser hatte mit dem ersten Streuexperiment im Jahre 1911 ja den Atomkern entdeckt. Die Rutherfordsche Streuformel, der Wirkungsquerschnitt für Streuung von geladenen Teilchen an einem geladenen Target, kann ganz klassisch aus den Hyperbelbahnen berechnet werden und liefert in erster Näherung das richtige Ergebnis.

Wenn wir den Streuquerschnitt quantenmechanisch berechnen, kommt der klassische Rutherfordsche Streuquerschnitt tatsächlich in erster Näherung heraus, es gibt jedoch dazu Korrekturen aus der Quantennatur der Elementarteilchenfelder. Als typisches Beispiel möchte ich nur eine der zahlreichen Quantenkorrekturen genauer beschreiben, die sogenannte Vakuum-Polarisation. Wenn wir das klassische Vakuum als den Zustand verschwindender Energie, verschwindenden Impulses und Drehimpulses usw. beschreiben, dann gibt es dazu wegen der Heisenbergschen Unschärferelation Quantenkorrekturen. Innerhalb der von der Unschärferelation erlaubten Grenze kann spontan Energie und Impuls auftreten, allerdings eben nur während kurzer Zeiten und in begrenzten Räumen. Insbesondere kann diese Energie und dieser Impuls in Form von Teilchen-Antiteilchen-Paaren kurzfristig auftauchen (Teilchen, die nur innerhalb der von der Unschärferelation zugelassenen Grenzen existieren können, nennt man ‘virtuelle Teilchen’).

Wenn solche virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Fluktuationen in der Nähe einer Ladung auftreten, dann werden die gleichnamigen Teilchen abgestoßen und die ungleichnamigen angezogen, das Vakuum wird also wie ein Dielektrikum polarisiert und die Ladung dadurch abgeschirmt.

Zwei wesentliche Beobachtungen sind daran anzuschließen. Zum einen kann die Energie (und der Impuls) virtueller Teilchen über alle Grenzen anwachsen, wenn nur die entsprechende Fluktuationszeit genügend klein wird. Zum anderen können alle Teilchen, die es überhaupt gibt – also auch solche, die wir noch gar nicht im Laboratorium entdeckt haben! –, als solche virtuellen Teilchenpaare auftreten und meßbare Größen beeinflussen.

Der erste Punkt ist unangenehm, der zweite höchst erfreulich! Zunächst zum ersten. Da wir in Berechnungen von Quantenkorrekturen sämtliche Zustände, die zur Vakuum-Polarisation beitragen, berücksichtigen müssen, entstehen dabei divergente Integrale. Das war auch der Grund, warum erst 1948 die erste Quantenkorrektur (das anomale magnetische Moment des Elektrons) errechnet werden konnte. 1948 gilt

seither als Geburtsjahr der Quantenfeldtheorie. Physikalische Größen können selbstverständlich nicht divergieren. Bei einer sogenannten ‘renormierbaren Theorie’ ist es aber immer möglich, sämtliche divergenten Integrale in nur wenigen physikalischen Größen unterzubringen (im allgemeinen Massen und Ladungen) und diese dann durch ein bestimmtes Experiment als gemessene Größe neu zu definieren. Damit sind die Divergenzen aus allen üblichen Meßgrößen verschwunden. Wir können mit Hilfe einer derartigen renormierbaren Theorie (wie etwa der Quantenelektrodynamik) heute Berechnungen bis in die zehnte Dezimale anstellen, die mit entsprechend genauen Messungen tatsächlich in allen Dezimalen übereinstimmen, wie etwa beim magnetischen Moment des Elektrons.

Bei der praktischen Berechnung erhebt sich jedoch noch eine andere Schwierigkeit. Wir können ja nicht einfach unendlich große Integrale stehenlassen, weil die Manipulation mit unendlichen Größen keine eindeutigen Resultate liefert. Daher ist es notwendig, die divergenten Integrale formal zu ‘regularisieren’, das heißt, die hohen Energien durch einen künstlich eingeführten Faktor abzuschneiden. Dabei ist eine Schwierigkeit, daß dabei keine Invarianzen verletzt werden dürfen. Insbesondere müssen die Ergebnisse natürlich relativistisch invariant bleiben. Pauli und Villars<sup>2</sup> und später Feynman<sup>3</sup> haben ein Verfahren angegeben, derartige Manipulationen ohne Verletzung der Lorentz-Invarianz durchführen zu können.

Bei den auf der Eichsymmetrie basierenden komplexen Theorien der elektro-schwachen Wechselwirkungen kommt jedoch noch ein weiteres Problem hinzu, weil ein derartiges Regularisierungsverfahren die Eichinvarianz nicht verletzen darf, und dies ist schon wesentlich schwieriger zu erreichen als die Erhaltung der Lorentz-Invarianz. Die beiden Nobelpreisträger haben dazu ein Verfahren angegeben, das in seiner Kühnheit wohl unübertroffen bleibt<sup>4</sup>. Sie

<sup>2</sup>W. Pauli und F. Villars, Rev. Mod. Phys. 21 (1949) 434

<sup>3</sup>R. P. Feynman, Phys. Rev. 76 (1949) 769

<sup>4</sup>G. 't Hooft und M. Veltman, Nucl. Phys. B44 (1972) 189, B50 (1972) 318

haben vorgeschlagen, die Zahl der Raum-Zeit-Dimensionen ( $3 + 1 = 4$ ) als freien Parameter der Theorie anzusehen und Integrale nicht in 4, sondern z.B. in  $4 + \epsilon$  Dimensionen zu berechnen, wo sie dann keine Divergenzen aufweisen. Nach durchgeführter Integration kann der Grenzwert  $\epsilon \rightarrow 0$  genommen werden, wobei sich die Divergenzen in eindeutiger Weise als Pole isolieren lassen.

Der zweite oben erwähnte – erfreuliche – Punkt erlaubt nun eine gewisse Dualität in der physikalischen Erkenntnis: Wir können neue Einsichten entweder dadurch gewinnen, daß wir bei immer höheren Energien neue Teilchen entdecken, oder dadurch, daß wir bei immer präziseren Messungen immer höhere Korrekturen erfassen, zu denen dann auch unbekannte Teilchen beitragen. Freilich ist dies kein Entweder/Oder, weil erst die explizite Herstellung eines physikalischen Teilchens als Nachweis von dessen Existenz gelten kann.

## 6. Vorhersagen aus präzisen Berechnungen höherer Quantenkorrekturen

Das wohl bedeutendste Anwendungsbeispiel des Gesagten war der Versuch, die Masse des letzten noch nicht beobachteten Quarks, des sogenannten Top-Quarks aus Quantenkorrekturen vorherzusagen. Man hatte vermutet, daß dieses Quark als strukturloses Elementarteilchen wohl nicht wesentlich schwerer sein sollte als die schwersten bis dahin bekannten Teilchen, die  $W$ - und  $Z$ -Bosonen von etwa 80 und 90 GeV (was immerhin der Masse mittelschwerer Atome entspricht). Je genauer die notwendigen Messungen für die Eingabedaten und je präziser die theoretischen Berechnungen wurden, umso höher wurde jedoch die vorhergesagte Masse. Die folgende Tabelle stellt die Vorhersagen und die vom Experiment stammenden unteren Schranken für die Masse bis zum Jahre 1993 dar. 1994 wurde das Teilchen tatsächlich entdeckt. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, daß damals die theoretische Vorhersage in erstaunlicher Weise den experimentellen Wert wiedergeben konnte. Ich habe darüber hinaus auch noch die immer besser werdenden Messungen dieser

Masse bis zum laufenden Jahr angegeben<sup>5</sup>.

Die Masse des Top-Quark		
Vorhersage aus Quantenkorrekturen	Jahr	experimenteller Wert
$141^{+35}_{-42}$ GeV	1990	>53 GeV (90%CL)
$(139-147)\pm 25\pm 20$ GeV	1992	>91 GeV (95%CL)
$164\pm 17\pm 20$ GeV	1993	>108 GeV (95%CL)
$170\pm 13$ GeV	1994	$174\pm 16$ GeV
	1997	$186\pm 10\pm 12$ GeV
	1998	$173,8\pm 3,2\pm 3,9$ GeV
	1999	$174,3\pm 3,2\pm 4,0$ GeV

Da uns diese Vorhersage in so erstaunlicher Weise gelungen ist, können wir nun einen Schritt weitergehen und versuchen, auch die Masse des skalaren Higgs-Bosons vorherzusagen. (Es könnte verwirren, daß ich oben bei der Erklärung des Higgs-Mechanismus von einem geladenen skalaren Teilchen gesprochen habe; das nun vorhergesagte physikalische Teilchen ist aber ein neutrales skalares Boson, die genauere Rechnung in der komplizierteren Eichgruppe zeigt, daß die geladenen Freiheitsgrade bei der Massengeneration verschwinden, da ein massives Vektorboson mehr Freiheitsgrade hat als ein masseloses.)

Die gegenwärtige untere Schranke aus direkten Erzeugungs-Experimenten liegt für die Masse des Higgs-Bosons bei etwas über 100 GeV. Die Berechnungen aus Quantenkorrekturen lassen nun auch eine obere Schranke zu, sie liegt bei etwas über 200 GeV, so daß wir nun die möglichen Massenwerte dieses so überaus interessanten Teilchens doch auf etwa 100 GeV einschränken konnten. Wir dürfen nicht vergessen, daß nach allem, was die gegenwärtige Theorie vorhersagt, das Higgs-Boson verantwortlich ist für die Masse der Elementarteilchen und damit für die physikalische Masse schlechthin. Die Frage "Was ist Masse?" ist ja ein offenes Problem seit den ersten Tagen der Newtonschen Theorie, und wenn sie demnächst einer (vielleicht vorläufigen) Antwort zugeführt wird, so ist dies wohl den beträchtlichen Aufwand wert, der dafür zu treiben ist. Selbst wenn das Higgs-Boson sich anders herausstellt, als die gegenwärtige Theorie vermutet, so ist doch der oben gezeigte großartige Erfolg der Vorhersage

<sup>5</sup>Bei doppelt angegebenen Fehlern ist der erste der statistische und der zweite der systematische.

der Masse des Top-Quarks aufgrund so überaus kühner und mathematisch diffiziler Annahmen würdiger Grund für die Verleihung des Nobelpreises für Physik im Jahre 1999.

*Herbert Pietschmann*

Institut f. theoretische Physik, Univ. Wien

4

## Chemie-Nobelpreis 1999

### Femtdynamik der chemischen Bindung – zum Nobel-Preis für Chemie an Ahmed H. Zewail

Mit Ahmed H. Zewail, Linus Pauling-Professor am California Institute of Technology, Pasadena, Ägypter und US-Bürger, hat ein seit Jahren gehandelter, logischer Favorit und zugleich eine der schillerndsten Persönlichkeiten der internationalen Chemical Physics Community den diesjährigen Nobelpreis für Chemie erhalten.

Zewail arbeitet seit mehr als 20 Jahren an der Front der laser-spektro-kinetischen Forschung und ist der Vater der Femtochemie [1, 2]. Mit diesem Gebiet verbindet man die Femtosekunden(fs)-Dynamik der chemischen Bindung, die ultraschnellen Zeitskalen der Molekülbildung und Fragmentierung sowie die Femtoprozesse chemischer Elementarschritte. Diese extrem schnell ablaufenden Ereignisse bei der Geburt eines Moleküls in der kontinuierlichen Evolution von Reaktanten, über Übergangszustände, zu den Produkten konnten von Zewail und Mannschaft mit Hilfe zeitverzögerter Femtosekunden-Anregungs- und Abfragepulsen (Pump-&-Probe) erstmals in Raum und Zeit sichtbar gemacht werden. Zewail und Mitarbeiter haben dabei weder die fs-Pulse noch die Pump-&-Probe-Superzeitlupe erfunden, und sie haben auch keinen 1 (in Worten: Ein) fs-Puls erzeugt, wie in den Medien fälschlicherweise berichtet. Vielmehr konnten Zewails Arbeitsgruppen auf die Mitte der 80er Jahre schon verfügbaren ultraschnellen Meßtechniken zurückgreifen, für deren Entwicklung das industrielle R & D von opto-elektronischen Bautei-



len in der Halbleiter-Technologie die wohl entscheidende Treibkraft gewesen ist. Zur Zeit der Basis-Femtochemie-Experimente in der Zewail-Gruppe (1987 - 1992) war der sub-50 fs CPM-Laser (Colliding Pulse Modelocking) bereits entwickelt [3], der Titan:Saphir-Laser ab 1990 als Prototyp schon verfügbar [4] und die Pump-&-Probe-Methode zur Realzeit-Erfassung der Bewegungen von Kernen und Elektronen in Molekülen (und Halbleitern) seit langem bekannt [5]. Ebenso war die von den Zewail-Mitarbeitern benutzte Technik der Überschall-Entspannung (ultrasonic jet expansion) zur Erzeugung energie-selektierter, kalter Moleküle und Atome im Strahl eine bereits etablierte Methode [6].

Was macht dann die Zewailschen Experimente so einzigartig und nobelpreis-würdig? Zewail hat erstmals die Kern-Trajektorie(n) einer chemischen Elementarreaktion und, als Krönung dieser Studien, den zwischen Reaktanten- und Produkt-Entwicklung liegenden intermediären Übergangszustand und seine inneren Bewegungsmoden zeitlich und räumlich mit Hilfe der Femtosekundenspektroskopie sichtbar gemacht, oder wie es die Königlich Schwedische Akademie der Wissenschaften in ihrer Begründung populärer formuliert: "...for studies of transition states of chemical reactions by femtosecond spectroscopy,... we can now see the actual movements of individual atoms, we can speak of their motions in time just as we image them - they are no longer invisible" (B. Norden, Nobel Committee for Chemistry).

Der Femtosekunden-Impuls ist dabei ein einzigartiges Vehikel. Er ist zeitlich kürzer als die typischen Perioden molekularer Schwingungen, und er ist zugleich ein ideales Werkzeug für die praktisch unverzögerte Initialisierung vibronischer Kernbewegung im Molekül. Beide Funktionen des fs-Pulses haben Zewails Leute optimal genutzt. Zur Verfolgung einer chemischen fs-Transienten entlang der Reaktionskoordinate verwendeten sie deshalb eine Sequenz von (meist spektral verschiedenen) Anregungs- und Abfragepuls-Paaren (two-color Pump-&-Probe) mit exakt kontrollierbarer Verzögerung, gleichzeitig führten sie diese ultraschnellen,

spektroskopischen Untersuchungen an energie-selektierten, *ultrakalten* Molekülen und Atomen in quasi wechselwirkungsfreien Molekularstrahlen durch. Die Beherrschung solch komplexer Experimente kommt nicht von ungefähr, vielmehr ist dieser hohe Stand der Experimentierkunst bereits an spektakuläre Vorleistungen gekoppelt, die Zewail und seinen Gruppen in dieser Zeit einen deutlichen Vorsprung gegenüber seiner Konkurrenz verschafft haben, sowohl aus der Sicht der meßtechnischen Strategie als auch der theoretischen Konzipierung. Die Weichenstellung für den Erfolg des femtochemischen Ansatzes muß demnach im Kontext mit Zewails Schlüssel-Experimenten zur molekularen *Kohärenz* in der Zeit *vor* 1987 gesehen werden. Unter einem durch eine optische Anregung präparierten, kohärenten Zustand in einem Molekül versteht man die phasenrichtige Überlagerung der Wellenfunktionen von Grund- und Anregungszustand. In den Zeitraum 1981 - 1987 fällt die besonders intensive Phase der kohärenten Pikosekunden(ps)-Anregungen in kalten Molekularstrahlen, die die systematische Untersuchung zustand-selektiver, vibronischer optischer Anregungen und ihrer intramolekularen, vibrationellen Energie-Umverteilung (*intramolecular, vibrational energy-redistribution, IVR*) eröffnete. Diesen Studien zum Verlust der Phase waren grundsätzliche Experimente zur elektronischen Kohärenz in großen Molekülen mit stationären und gepulsten optischen Treibfeldern vorangegangen (*vide infra*).

### **Kohärente molekulare Transienten**

Zewails Gruppe hatte erstmalig, bereits vor 1980, in loser Analogie zu niederfrequenten, kernmagnetischen Spinexperimenten, kohärente optische Anregungen an großen aromatischen Molekülen (Pentazen) in kristalliner Matrix (p-Terphenyl) demonstriert [7] und die zeitliche Entwicklung dieser Kohärenzen unter Heranziehung der optischen Blochgleichungen analysiert. Mittels genügend intensiver und schmalbandiger CW-Laser konnte erstmals die kohärente Signatur des Pentazen-Moleküls nachgewiesen werden: (i) die *Rabi-Frequenz* des kohärenten Zustands aus der optischen *Nutation* und (ii) die optische Trägerfrequenz des elektronischen

Übergangs sowie die phononen-induzierte, intermolekulare Dephasierung aus der Messung des *optischen freien Induktionszerfalls (oFID)*. Zewails grundlegende Arbeiten [8] sind in weiterführender Weise von den ps-Photon-Echo-Experimenten begleitet worden; diese sequentiellen Pulstechniken erlaubten, die inhomogene Bandbreite des elektronischen Übergangs im Probe-Molekül zu unterschreiten und damit erstmals die homogene Dephasierung in der Linienbreite des Lorentz-Profiles auf der Zeit-Domäne abzufragen [9].

Experimente zum innermolekularen Kohärenzverlust dieser Moleküle, also in Abwesenheit von umgebungsbedingten Dephasierungen, wurden Anfang der 80er Jahre unter kohärenter ps-Anregung und ultrakalten, wechselwirkungsarmen Bedingungen im Molekularstrahl fortgeführt. Zewails Gruppe demonstrierte 1981 erstmals intramolekulare *Quanten-Oszillationen* (quantum beats) für ganz bestimmte vibronische Überschußenergien im  ${}^1L_b \rightarrow {}^1A$  Übergang des Anthrazens [10]. Dieses Ergebnis war insofern überraschend, als die anfängliche Kohärenz in gewissen, spektralen Positionen innerhalb der vibrationellen Zustandssumme ganz offensichtlich nur sehr langsam dephasiert wird und der IVR-Prozeß daher nur sehr eingeschränkt wirksam ist (restricted IVR). Daraus schloß Zewail, daß es im quasi-Kontinuum der optisch nicht aktiven Hintergrund-Zustände einige wenige, sogenannte *relevante* Moden geben muß, die mit der lokalen, optischen Anregung (zero-order state) zu einer diskreten Zahl von Eigenzuständen koppeln und dadurch zu deterministischer, oszillatorischer Fluoreszenz (Giga-Hertz-Modulation) auf ns-Skalen veranlassen [11]. Im Fall von moden- und bindungsspezifischer Kopplung zu wenigen relevanten Moden ist die Dynamik der IVR also relativ langsam, der Polarisationsverlust klein und die Relaxation über die Hamilton-Dynamik geregelt. Bei vielen, relevanten Moden innerhalb der Zustandsdichte der Dunkelzustände und starker vibronischer (anharmonischer) Kopplung zur Franck-Condon-Anregung ist die Energie-Umverteilung hingegen streng dissipativ (statistisches Limit) und in kineti-

schon Konstanten beschreibbar. Der Prozeß der Dephasierung durch IVR ist somit ein Kriterium, wie stark in einer bestimmten vibronischen Mode anfänglich lokalisierte Anregungsenergie gegenüber anderen Typen von optisch dunklen Bewegungsmoden gekoppelt ist. In großen Molekülen sind die Quantenbeats des Anthrazens [10] eher die Ausnahme, in diesem Regime dephasieren die Moleküle generell in einem sehr schnellen ps-Prozeß (dissipative IVR) [12].

### Femtosekunden-Anregung und vibronische Wellenpakete

Für kleine Moleküle mit diskreter Niveau-Struktur und wenigen Dunkelmoden ist die IVR ein nur mäßig schneller ps-Prozeß und in jedem Fall viel langsamer als eine molekulare Vibration. Mit diesen grundlegenden Erkenntnissen zur Natur der IVR im Gepäck haben Zewail und Mitarbeiter ab Mitte der achtziger Jahre sub-100fs-Laser zur Anregung kleiner Moleküle benützt. Zum Unterschied von ps-Laserpulsen sind fs-Pulse nicht nur zeitlich kürzer, sondern auch spektral wesentlich breiter. Abb. 1 gibt eine Gegenüberstellung eines ps- und eines fs-Pulses und ihre unterschiedliche Franck-Condon(FC)-Anregungscharakteristik für ein diatomares Molekül.

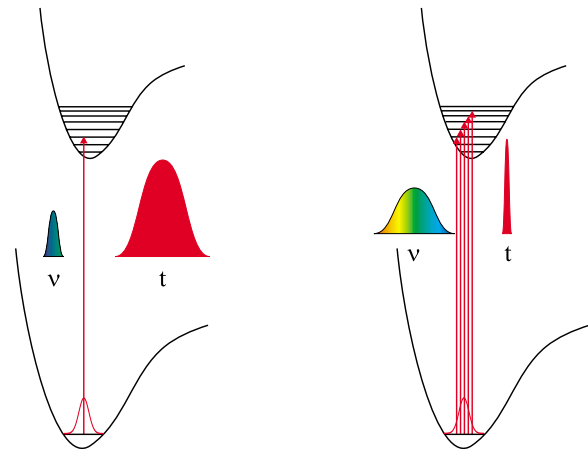


Abb. 1: Pikosekunden- (ps, spektral schmal) und Femtosekunden- (fs, spektral breit) Anregung in einem molekularen System. Der fs-Puls initialisiert eine gleichphasige Vielkomponenten-Oszillation (s. Abb. 2).

Ein ps-Puls mit seiner eher kleinen Frequenzbreite stimuliert in der Regel zustandsselek-

tiv die Anregung eines individuellen molekularen Niveaus und aktiviert damit die Relaxation spezifischer Populationen, induziert aber keine Kernbewegung. Ein sub-100fs-Puls präpariert auf Grund seiner beträchtlichen spektralen Breite (10-100 THz!), vor allem in kleinen Molekülen mit flachen Potentialflächen, eine Superposition von vielen vibronischen Oberschwingungen im angeregten Zustand. Diese Überlagerung von Wellenfunktionen ist *keine* Eigenfunktion des Moleküls, sondern, wie schon von Schrödinger in den Grundsätzen diskutiert [13], ein typisches *Wellenpaket* (WP), das zeitlich und räumlich im bindenden Potential  $V_1$  des Moleküls oszilliert [14]. Die Perioden dieser Vibrationen sind dabei deutlich größer als die zeitliche Breite des sub-100fs-Pulses. Das erlaubt die Erzeugung und Abfrage in sequentiellen Puls-Experimenten.

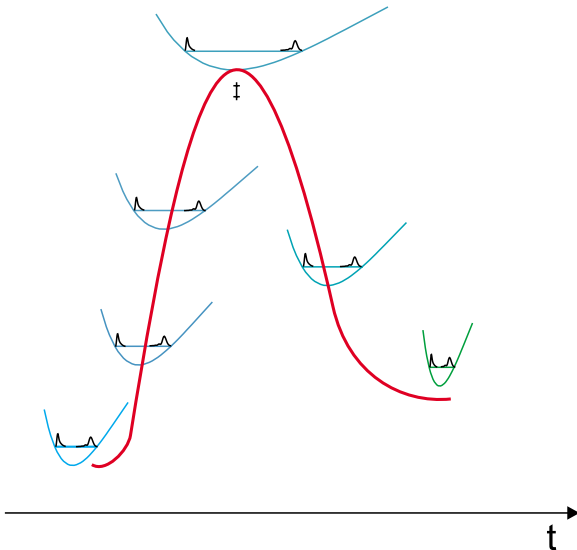


Abb. 2: Das Wellenpaket (WP), generiert durch den Pump-Puls mit der zentralen Frequenz  $\nu_1$ , oszilliert im Potential  $V_1$  des angeregten Zustandes. Es wird mit einem zweiten Puls (Probe-Puls,  $\nu_2, \nu_3$ ) an verschiedenen spatialen Positionen abgefragt. Die WP-Observable ist die laser-induzierte Fluoreszenz (LIF). Modifiziert nach [16].

Zewails Gruppen haben vibrationelle Wellenpakete erstmals aus dem photoangeregten B-Zustand (Potentialkurve  $V_1$  in Abb. 2) des diatomaren  $I_2$ -Moleküls [15] in einer Kombination aus Pump-&-Probe und Fluoreszenz-Detektion (laser-induzierte Fluoreszenz, LIF) Ende der

80er Jahre experimentell nachgewiesen. In diesem Experiment (Abb. 2) präpariert der Pump-Puls (zentrale Frequenz  $\nu_1$ ) das Wellenpaket, während der Probe-Puls (Zentrumsfrequenz  $\nu_2$ ) das propagierende Paket (Populationsamplitude) in das Potential  $V_2$  eines zweiten elektronischen Anregungszustands 'hebt', aus dem es durch Fluoreszenz deaktiviert. Die zeitintegrierte Intensität des LIF-Signals als Funktion der Verzögerungszeit des Probe-Pulses liefert oszillatorische Profile (s. Abb. 5), die auf frühen fs-Skalen direkten Einblick in die periodische Bewegung des WPs zwischen den (klassischen) Umkehrpunkten im Potential  $V_1$  eröffnet [16, 17]. Die Energie des Abfrage-Pulses entspricht im Schema der Abb. 2 genau der Übergangsfrequenz aus dem FC-Raum des WPs in  $V_1$  in den Beobachtungszustand  $V_2$ , der Probe-Puls kann aber auch in Form eines anderen spektralen Fensters, z.B. am Umkehrpunkt, also weit außerhalb der FC-Sphäre gesetzt werden (strichlierte Anregung). Weiters erlaubt die Durchstimmung der Anregungsenergie des Pump-Pulses, daß das Initialpaket an verschiedenen spektralen Positionen im  $V_1$  präpariert werden kann. Die Variation dieser Experimente erlaubte, durch Inversion der WP-Transienten das interatomare Potential des Moleküls zu extrahieren [18]. In Abwesenheit umgebungsbedingter Dämpfungen ist die Wellenpaket-Bewegung auf frühen fs-Zeitskalen periodisch und fast klassisch; wegen der generellen Anharmonizität der molekularen Potentiale dephasiert und zerfließt das Paket auf mittleren Zeitskalen, während es auf langen Zeitskalen in Richtung einer Wiedergeburt des Anfangspakets rephasiert [19, 20, 21].

Die Wellenpaket-Spektroskopie durch kohärente Femtosekunden-Breitband-Anregungs- und Abfrage-Pulse ist im perturbativen Limit der Wechselwirkung mit zwei Feldern das Fourier-Transform-Analogon zur hochauflösenden Absorptionsspektroskopie [22], sie geht aber in einem Punkt weit über den Informationsgehalt des Frequenzraums hinaus: im Wellenpaket-Zeitdomäne-Experiment verläßt das kohärente Initial-Paket den vertikalen Franck-Condon-Konfigurationsraum (Abb. 2) und exploriert durch seine Propagation im interatomaren Po-

tential neue Phasenräume, inklusive jener der klassischen Umkehrpunkte und der quantenmechanischen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten bei Kern-Elongationen  $R > R_e$  ( $R_e$ , Gleichgewichtsabstand).

Diese in der Photochemie besonders wichtigen nicht-spektroskopischen Niveaus (Phantom-Zustände) können mit der schmalbandigen, vertikalen Anregung in der konventionellen Frequenz-Spektroskopie nicht erreicht werden, die WP-Transiente eröffnet also, besonders beim Durchlaufen reaktiver Potentiale, eine gänzlich neue Dimension der Molekülspektroskopie!

### Wellenpakete in reaktiven, chemischen Systemen: fs-Transition-State Spectroscopy

Salopp formuliert, wirkt der fs-Puls wie ein ultraschneller, mechanischer Hammer, der eine Anzahl von unterschiedlich gespannten Saiten eines Musikinstruments trifft und damit eine Überlagerung von synchronen Schwingungen in Phase auslöst. Molekül-orientiert ausgedrückt: eine fs-Anregung mit simultaner Präparation eines materiellen Wellenpakets ist ein praktisch verzögerungsfreier Auslöser für eine *zeitabhängige*, nukleare Quantendynamik in einem Molekül! Zewail hat die Bedeutung dieser Pakete für die Reaktionsdynamik sehr früh erkannt [23]. Für einfache Reaktanten, niedrig-dimensionale Reaktionskoordinaten und vernachlässigbare Molekül-Reservoir-Wechselwirkung dominiert die fs-Dynamik der Wellenpaket-Bewegung generell über den IVR-Prozess. Im Procedere einer chemischen Reaktion, bei der Bindungen elongiert, gebrochen bzw. neu geknüpft werden, also Atome einerseits den Molekülverband durch Homolyse verlassen und andererseits in diesen durch Bindungsbildung eintreten, ist ein primär auf einem Reaktanten präpariertes vibronisches Paket und seine Propagation durch die im Laufe der chemischen Umwandlung zeitabhängigen Potentialhyperflächen (Abb. 3) ein empfindliches Terminal zur Sichtbarmachung der fs-Transienten.

In Abb. 3 ist dieses Szenario schematisch gezeigt. Das WP auf seinem Weg von der Reaktanten- zur Produktseite ändert seine Os-

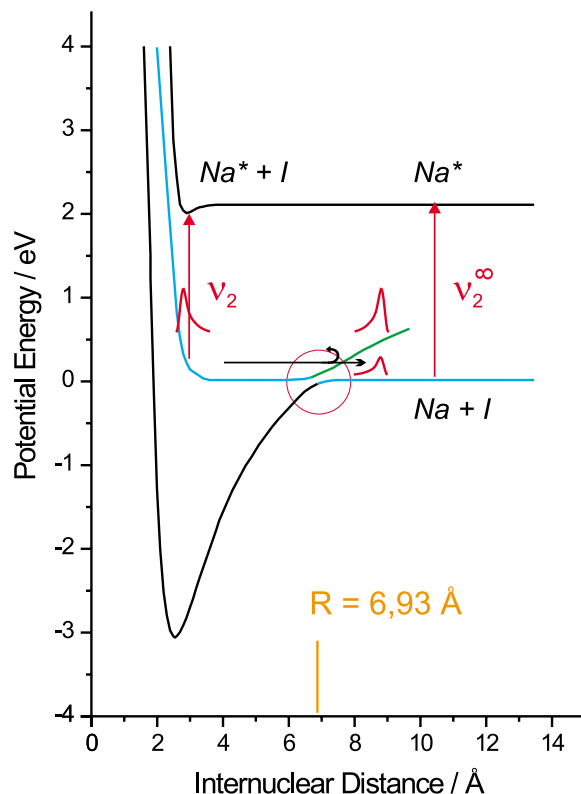


Abb. 3: Zeitabhängige Potentialhyperflächen eines Reaktanten (linke Seite) auf seinem Weg in das Produkt (rechte Seite). Zeitabhängige Umlauffrequenzen und Änderungen der Phasenstruktur des Reaktanten-WPs mit der Treibkraft der Elementarreaktion (schematisch).

zillationsperiode [von *schnell* (ungestörter Reaktant) über *langsam* (aktivierter Komplex) nach *schnell* (ungestörtes Produkt)], seine Phasenstruktur (Frequenz-Chirp des WP) und im Falle von Tunnelprozessen durch die Barriere auch seinen Amplitudenwert (*vide infra*, Abb. 4).

Die Wellenpaket-Propagation und ihre Details unter dem Trigger der zeitlich veränderlichen Potential-Topologie eines reaktiven Systems (nicht-adiabatisches Limit) visualisiert daher die chemische Dynamik des Moleküls, und die Verfolgung des Wellenpakets mit dem Abfragepuls, entweder direkt auf der Reaktanten- oder auf der Produktseite, reflektiert die chemische Transformation!

Ein besonders eindrucksvolles Experiment der Zewail-Gruppe ist der Nachweis und die Sichtbarmachung des eindimensionalen Übergangs-

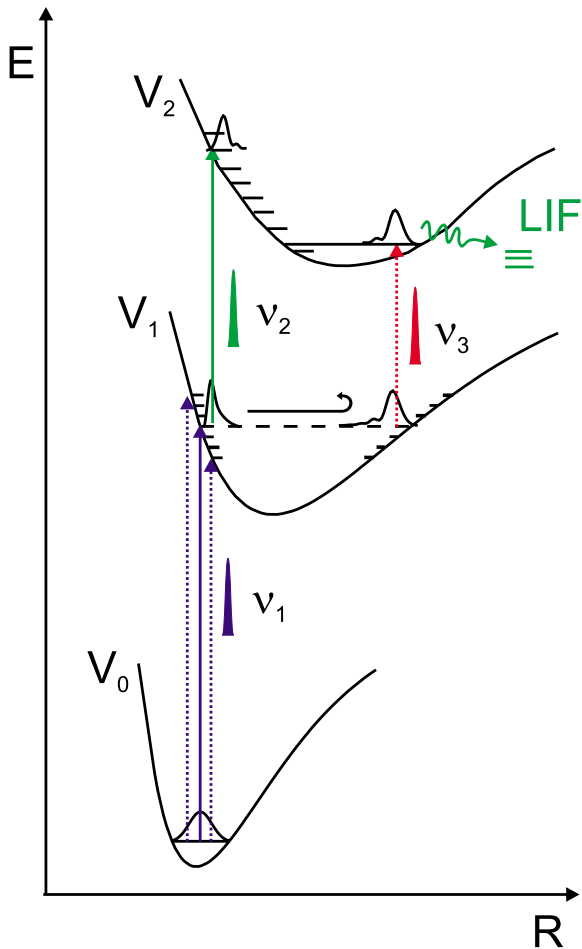


Abb. 4: Wellenpaket-Szenario bei der chemischen Reaktion  $\text{Na}^+\text{I}^- \rightarrow \text{Na} + \text{I}$ . Simultane Erfassung des 'getrappten' WPs und des kohärent freigesetzten Na durch Synchronisation der Probe-Pulse ( $\nu_2, \nu_2^\infty$ ). Modifiziert nach [24].

zustands in der Dissoziation des NaI:  $\text{Na}^+\text{I}^- \rightarrow \text{Na} + \text{I}$  [24]. Die Potentialtopologie des NaI war aus Strahlexperimenten des früheren 'Alkali Age' relativ gut bekannt. Im nichtadiabatischen Bild weichen der ionische und der kovalente Ast der NaI-Potentialkurven im Bereich von  $R = 6.9 \text{ \AA}$  einer adiabatischen Kreuzung aus (self-avoiding). In diesem sogenannten Landau-Zener(LZ)-Regime [25] kann ein klassischer Bildpunkt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit deshalb von der ionischen Struktur des Natriumiodids in den nichtbindenden Ast der freien Na- und Jod-Atome übergehen, sodaß dieser Bereich mit dem Übergangszustand der chemischen Reaktion  $\text{Na}^+\text{I}^- \rightarrow \text{Na} + \text{I}$  zu identifizieren ist. Wegen der Eindimensio-

nalität weist diese Reaktion keine Sattelpunkt-Charakteristik auf, die Abfrage des 1-D-Übergangszustands mit Hilfe des *coherent imprinting* Konzepts ist deshalb aber nicht weniger spektakulär.

Zwei Herausforderungen stellten sich den Zewail-Gruppen in ihren Pump-&-Probe-LIF-Experimenten: (i) die Abfrage des WPs, das nach Vertikalanregung bei  $R_e = 2.8 \text{ \AA}$  gebildet, vom kovalenten Potentialast seine Bewegung startet und dann durch Tunneln durch den LZ-Bereich in die Koordinaten der ionischen Struktur gelangen kann. Die besondere Potentialkonstellation läßt daher erwarten, daß das WP zwischen kovalentem und ionischem Ast in einem quasi-bindenden Potential 'gefangen' ist und in dem weiten Bereich zwischen kovalentem ( $R = 2.8 \text{ \AA}$ ) und dem extremen ionischen Umkehrpunkt hin und her schwingt. Die femtochemische Detektion des oszillierenden Wellenpakets und (ii) der zusätzliche Nachweis der systematischen Amplitudendämpfung mit jeder durchlaufenen (klassischen) Periode der WP-Oszillation ist deshalb eine glänzende Bestätigung für die Richtigkeit dieser aus quantenchemischen Berechnungen folgenden Potentialtopologie [26]. Ein kritischer Punkt stellt sich nämlich für die WP-Bewegung beim Kernabstand  $R = 6.9 \text{ \AA}$ , also im Zentrum des LZ-Übergang-Regimes. Hier besteht eine große Wahrscheinlichkeit für das WP, in Richtung des dissoziativen Astes der Na+I-Bildung zu deaktivieren (exit-channel), wodurch ein bestimmter Teil der Intensität des Pakets bei jedem Umlauf verloren geht. Der Teil des durchtretenden WPs hört aber – infolge der Dissoziation in die freien Atome Na und I – auf, ein Paket zu sein, und die Frage lautet: Ist der nach diesem Szenario die WP-Oszillation begleitende 'burst' von Na-Atomen (und I-Atomen) als synchronisierter Prozeß mit der Amplitudendämpfung des WPs in Realzeit nachweisbar? Der kohärente Ausstoß von freien Na-Atomen während des Schwingungsprozesses zwischen dem kovalenten und ionischen Phasenraum, im Gleichschritt mit der Wiederkehrperiode des WPs, wäre demnach der direkte Nachweis der quantenmechanischen Signatur des Übergangszustandes!

Abb. 4 enthält auch schematisch das experimentelle Konzept der Zewail-Gruppen zur Spektroskopie dieses Übergangszustands. Das Experiment beruht wieder auf einem Pump-&-Probe-LIF-Aufbau, bei dem jetzt zwei synchronisierte Abfrage-Pulse mit leicht verschiedenen Zentralfrequenzen  $\nu_2$  und  $\nu_2^\infty$  verwendet werden. Während das durch den Pump-Puls auf dem kovalenten NaI erzeugte WP in Richtung des ionischen Umkehrpunkts propagiert und mittels des ersten Probe-Pulses ( $\nu_2$ ) in den fluoreszierenden (schwach bindenden!) Beobachtungszustand transferiert wird, wird der periodisch austretende ‘burst’ der (nicht-angeregten) Na-Atome mit Hilfe des zweiten, synchronisierten Abfrage-Pulses ( $\nu_2^\infty$ ) über die (leicht kürzerwellige) Fluoreszenz der freien  $\text{Na}^*$  detektiert.

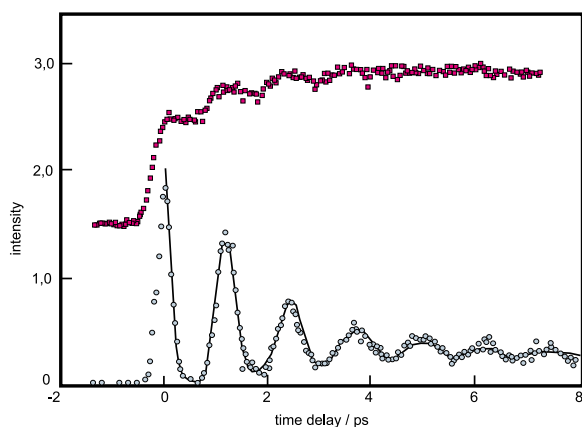


Abb. 5: Fs-Dynamik der Na-I Bindung;  $\circ \dots$  Muster der  $\text{NaI}^* \leftrightarrow \text{Na}^+\text{I}^-$ .  $\square \dots$  multiple Stufenfunktion der Na-Atom Bildung. Dämpfung der WP-Amplitude und ‘burst’ der Na (und I) Atome laufen synchron (s. Text). Modifiziert nach [24].

Abb. 5 zeigt das Ergebnis. Die Oszillation ist in der Tat die kinetische Signatur des *getrappten* Wellenpakets, das die Existenz eines bindenden Potentials im Kreuzungsbereich zwischen kovalenten und ionischen Potentialästen eindrucksvoll beweist. Die sukzessive Abnahme der Amplitude des WPs pro Vibrationszyklus und die simultane oszillatorische Freisetzung der Na-Atome sind die Highlights dieses genialen Experiments: die synchrone Balance zwischen Schwingungsdämpfung und quasi-kohärenter Evolution des dissoziierenden Na bei

der magischen Koordinate  $R = 6.9 \text{ \AA}$  ist genau der *Fingerabdruck* des Übergangszustands und ein Zeugnis für die Einmaligkeit dieser femtochemischen Messungen [26].

Die WP-Abfrage entlang einer kompletten, kollisionsinduzierten Sattelpunktstrajektorie (Abb. 3) ist – bis jetzt – wegen der *timing-* und *gating-*Probleme zwischen dem Atom- und Molekülstrahl noch nicht wirklich gelungen. Bessere Voraussetzungen für femtochemische Studien finden sich in den sogenannten ‘half-collision’ aktivierten Komplexen, die durch Photoanregung eingeschaltet werden und dadurch einen ganz bestimmten Produkt-Kanal in der Femtodynamik aufmachen [27]. In einer Reihe von femto-spektrokinetischen Experimenten sind mittlerweile auch größere Moleküle von den Zewail-Gruppen untersucht worden, eindrucksvolle Aufnahmen zur fs-Realzeit-Entwicklung existieren zwischenzeitlich für die Trajektorien einer ganzen Reihe von Reaktionsklassen [2]. Neuere bzw. neueste Untersuchungen betreffen die Diels-Alder-Retro-Reaktion [28], die cis-trans-Isomerisierung [29] und die innere Umwandlung (Internal Conversion) über konische Intersektionen [30]. Umgekehrt hat der Sensor der innermolekularen Wellenpaket-Bewegung und Relaxation am Beispiel von einfachen diatomaren Molekülen in Gegenwart von optisch-inaktiven Kollider-Gasen variierender Dichte grundlegende Experimente zur Natur der intermolekularen Wechselwirkung oder, allgemeiner, zur Chemischen Physik der System-Reservoir-Kopplung möglich gemacht [31].

Zum Schluß noch ein Ausschnitt aus der Laudatio des Nobel-Komitees. B. Norden [32] hat die ganz spezielle Leistung Zewails für die Chemie auf den Punkt gebracht: “...to use a fs-pulse to, so to say, blow the whistle to start all the molecules at the same time and at the same point of their vibration cycles. A consequence of the synchronization of the molecules (coherent preparation of the system) is that although the measurement by the later probe pulse will include a huge number of molecules, typically millions, their behavior will not have blurred out but, thanks to coherence, be like that of a classical vibrator, like a vibrating spring. In turn this ena-

bles observation of the movements of the nuclei during the vibration and thus a characterization of the transition state with high spatial resolution.”

*Christian Warmuth, Franz Milota, Andreas Tortschanoff und Harald F. Kauffmann*

Institut für Physikalische Chemie der Universität Wien

## Literatur

- [1] A. H. Zewail, *Femtochemistry - Ultrafast Dynamics of the Chemical Bond*; Vol 1 + 2, World Scientific, Singapore (1994)
- [2] A. H. Zewail, in: *Femtochemistry: Concepts and Applications, Femtosecond Chemistry*, J. Manz und L. Wöste, Hsg., Band 1, S. 15, VCH, Weinheim (1995)
- [3] R. L. Fork, B. I. Greene und C. V. Shank, *Appl. Phys. Lett.* 38, 671 (1981); R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker und C. V. Shank, *Opt. Lett.* 12, 483 (1987)
- [4] D. E. Spence, P. N. Kean und W. Sibbett, *Opt. Lett.* 16, 42 (1991)
- [5] C. V. Shank und E. P. Ippen, *Appl. Phys. Lett.* 26, 62 (1975)
- [6] R. E. Smalley, L. Wharton und D. H. Levy, *Acc. Chem. Res.* 10, 139 (1979); D. H. Levy, *Ann. Rev. Phys. Chem.* 31, 197 (1980)
- [7] T. E. Orłowski und A. H. Zewail, *J. Chem. Phys.* 70, 1390 (1979)
- [8] A. H. Zewail, *Acc. Chem. Res.* 13, 360 (1980)
- [9] R. W. Olson und M. D. Fayer, *J. Phys. Chem.* 84, 2001 (1980); W. H. Hesselink und D. A. Wiersma, *J. Chem. Phys.* 74, 886 (1981); D. A. Wiersma, *Adv. Chem. Phys.* XLVIII, 421 (1981)
- [10] W. R. Lambert, P. M. Felker und A. H. Zewail, *J. Chem. Phys.* 75, 5958 (1981); *ibid.* 81, 2217 (1984)
- [11] N. Bloembergen und A. H. Zewail, *J. Phys. Chem.* 88, 5459 (1984)
- [12] P. M. Felker und A. H. Zewail, *J. Chem. Phys.* 82, 2975 (1985); P. M. Felker und A. H. Zewail, *Adv. Chem. Phys.* LXX, 265 (1988)
- [13] E. Schrödinger, *Die Naturwissenschaften* 14, 664 (1926)
- [14] I. R. Khundkar und A. H. Zewail, *Ann. Rev. Phys. Chem.* 41, 15 (1990)
- [15] R. M. Bowman, M. Dantus und A. H. Zewail, *Chem. Phys. Lett.* 161, 297 (1989)
- [16] M. Gruebele und A. H. Zewail, *J. Chem. Phys.* 98, 883 (1993)
- [17] M. Dantus, R. M. Bowman und A. H. Zewail, *Nature* 343, 737 (1990)
- [18] R. Bernstein und A. H. Zewail, *Chem. Phys. Lett.* 170, 321 (1990)
- [19] Klassische Recurrences und quantenmechanische Revivals wurden erstmals in den elektronischen Wellenpaketen von atomaren Rydberg-Systemen [20] beobachtet und theoretisch analysiert. Obwohl Zewail das durch Selbst-Interferenz dominierte Langzeit-Verhalten (rotational Revivals) in diatomaren Molekülen systematisch studiert hat, hat er die Terminologie der Revivals in seinen grundlegenden Arbeiten nicht verwendet. Erst Vrakking et al. [21] haben einige Jahre später in gezielten, hochauflösenden Experimenten vibrationelle Revivals in einem energie-selektierten, diatomaren Molekül (I-Br) nachgewiesen.
- [20] J. Parker und C. R. Stroud Jr., *Phys. Rev. Lett.* 56, 716 (1986)
- [21] M. J. J. Vrakking, D. M. Villeneuve und A. Stolow, *Phys. Rev. A* 54, R 37 (1996)
- [22] S. Mukamel, *Principles of Nonlinear Optical Spectroscopy*, Oxford University Press, New York (1995)
- [23] A. H. Zewail, *Science* 242, 1645 (1988)
- [24] T. S. Rose, M. J. Rosker und A. H. Zewail, *J. Chem. Phys.* 91, 7415 (1989); *ibid.* 88, 6672 (1988); M. J. Rosker, T. S. Rose und A. H. Zewail, *Chem. Phys. Lett.* 146, 175 (1988)
- [25] z.B. in: R. D. Levine und R. B. Bernstein, *Molecular Reaction Dynamics und Chemical Reactivity*, Oxford University Press, New York (1987)
- [26] A. Mokhtari, P. Cong, J. L. Herek und A. H. Zewail, *Nature* 348, 225 (1990)
- [27] M. Dantus, R. M. Bowman, M. Gruebele und A. H. Zewail, *J. Chem. Phys.* 91, 7437 (1989)
- [28] A. A. Heikal, J. S. Baskin, L. Bañares und A. H. Zewail, *J. Chem. Phys.* 101, 572 (1987)
- [29] E.W.-G. Diau, S. de Feyter und A. H. Zewail, *Chem. Phys. Lett.* 304, 134 (1994)
- [30] D. Zhong, E. W.-G. Diau, Th. M. Bernhardt, S. de Feyter, J. D. Roberts und A. H. Zewail, *Chem. Phys. Lett.* 298, 129 (1998)
- [31] A. Materny, Ch. Lienau und A. H. Zewail, *J. Phys. Chem.* 100, 18650 (1996)
- [32] B. Norden, *Extended Internet Version of the Press Release, Nobel Committee for Chemistry*, 12. Okt. 1999

## Aktuelle Forschung

### Nukleare Astrophysik als Schlüssel zum Verständnis der Elementerzeugung

#### Historisches

Auf dem Gebiet der Nuklearen Astrophysik gibt es gerade heute große Aktivität. Obwohl die Ursprünge in das erste Drittel des 20. Jahrhunderts zurückverfolgt werden können, haben nennenswerte Entwicklungen erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts stattgefunden. Erst in den letzten 20 Jahren ist das Gebiet stark gewachsen und gereift.

Mit Entdeckung der Kernreaktionen und des quantenmechanischen Tunneleffekts Anfang des 20. Jahrhunderts konnte die bis dahin mysteriöse Energiequelle unserer Sonne prinzipiell verstanden werden. Jedoch erst in den 30er Jahren wurde eine detailliertere Erklärung der in der Sonne stattfindenden Kernprozesse durch Hans Bethe gegeben. Nachdem nun die Fusion leichter Atomkerne wie Protonen, Deuterium und Tritium zu Helium als Energielieferant im Zentrum der Sonne erkannt war, stellte sich weiter die Frage, ob dies für alle Sterne gleich welcher Masse gelte. Die Verschmelzung leichterer Spezies zu schwereren warf außerdem die Frage nach der Zukunft der Sonne auf, wenn das fusionsfähige Material aufgebraucht sein wird. Dies zeichnete den Weg zu immer komplexeren Sternentwicklungsmodellen vor, die nicht ohne ein detailliertes Verständnis der Kernphysik auskommen.

Über die Energieerzeugung hinaus können die nuklearen Prozesse auch Aufschluß über die Herkunft aller in der Natur gefundenen Elemente schwerer als Helium geben, aus welchen unser Planet und letztendlich auch alle Lebewesen aufgebaut sind. Frühe Versuche von Bondi, Gamow und von Weizsäcker, den Ursprung aller Elemente zu verstehen, beruhten auf der Idee eines Urknalls und der damit verbundenen Elementsynthese während der Abkühlung des ex-

pandierenden Universums. Diese Modelle waren aber zum Scheitern verurteilt, weil in der aus einem homogenen Urknall erzeugten protonenreichen Materie nicht genügend Kernreaktionen stattfinden, die die nur instabile Isotope enthaltenden Massenzahlen  $A = 5$  und  $A = 8$  überbrücken können. Somit können auch keine schweren Elemente erzeugt werden. Diese Restriktion wurde in jüngster Zeit in den Modellen des sogenannten inhomogenen Urknalls wieder aufgehoben, jedoch können selbst in den optimistischsten Modellen keine signifikanten Mengen an schweren Elementen erzeugt werden.

Das Jahr 1957 markiert einen Wendepunkt und könnte als Geburtsjahr der modernen nuklearen Astrophysik bezeichnet werden. Unabhängig von einander postulierten zwei Gruppen die Idee der Nukleosynthese in *Sternen*. Die in den Arbeiten von Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle (oft auch als B<sup>2</sup>FH bezeichnet) und Cameron skizzierten Prozesse zur Erzeugung von Isotopen verschiedener Massenregionen wurden zum größten Teil bis heute bestätigt. Fowler wurde für seine hauptsächlich kernphysikalischen Beiträge zum Verständnis der Elementsynthese 1983 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Es ist historisch bemerkenswert, daß die Arbeit B<sup>2</sup>FH durch die Ablehnung der Idee eines Urknalls motiviert war.

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte in der Modellierung der Prozesse nicht nur durch verbesserte Computerleistungen, sondern auch durch das in Theorie und Experiment verbesserte Verständnis der Kernphysik ermöglicht. Nicht zuletzt liefern verbesserte astronomische Beobachtungen und chemische Untersuchungen von meteoritischem Material aus der Entstehungsphase unseres Sonnensystems wertvolle Hinweise auf die an der Elementsynthese beteiligten Prozesse. Die Untersuchungen wurden – ausgehend von den klassischen Szenarien der Elementsynthese und Energieerzeugung in Sternen – auf immer exotischere Modelle ausgedehnt, wie etwa die Nukleosynthese in der bei Neutronensternverschmelzungen ausgestoßenen Materie oder hochenergetische Strahlungsausbrüche in Akkretionsscheiben um schwarze Löcher.



## Definition

Das Gebiet der nuklearen Astrophysik ist ein stark interdisziplinäres Gebiet, das Beiträge und Resultate sowohl der beobachtenden Astronomie und Astrophysik als auch der experimentellen und theoretischen Kernphysik sowie der Teilchenphysik vereint. Nicht zuletzt besteht einer der Triumphe des Standardmodells des Urknalls in der Vorhersage von genau drei schwach wechselwirkenden Neutrino-Generationen. Diese Voraussage wurde erst wesentlich später durch Experimente am CERN bestätigt. Die seit kurzem postulierte mögliche Existenz eines sterilen Neutrinos – sollte es wirklich existieren – hätte keine großen Auswirkungen auf das Standardmodell des Urknalls, könnte jedoch gewisse inhomogene Szenarien modifizieren. Die aufwendigen Simulationen der Astro-, aber auch der modernen Kernphysik können durchaus auch dem neuen Gebiet der ‘computational physics’ zugeordnet werden. Das Studium der wichtigen Kernreaktionen hat auch kosmologische Konsequenzen, wie in den Urknallmodellen gezeigt. Man benötigt eine detaillierte Kenntnis der subatomaren Prozesse, um das Universum auf großen Skalen zu verstehen. Aus den Häufigkeitsmustern der Elemente können wir etwas darüber lernen, wie diese entstanden, und mit ihrer Hilfe kann man versuchen, den Ursprung und die Entwicklung des Weltalls zu verfolgen.

Astrophysik und Kernphysik haben mehrere gemeinsame Interessen, nämlich das Verständnis

- der Kernreaktionen, welche die Synthese und die in der Natur gefundenen Häufigkeitsmuster der Atomkerne erklären;
- der Energiequelle von verschiedenen stellaren Vorgängen, von statischem zu explosivem nuklearem Brennen;
- des Verhaltens von Kernmaterie bei extremen Dichten, d.h. bei Kerndichten und darüber hinaus; dies ist wichtig bei Schwerionenkollisionen, aber auch für das Verhalten der nuklearen Zustandsgleichung bei Typ II Supernova-Explosionen und in Neutronensternen.

Wichtige Fortschritte wurden hauptsächlich in den ersten beiden Punkten durch das experi-

mentelle Studium von Kernreaktion und Kerneigenschaften erzielt. Die Abhängigkeit zwischen Astrophysik und Kernphysik ist stark und der Austausch rege. Astrophysiker benötigen nukleare Informationen, um ihre Szenarien zu entwickeln und zu testen. Andererseits sind die Anforderungen der Astrophysik ein starker Anreiz für die Kernphysik-Gemeinschaft, ihr Wissen auf Kerne und Kernreaktionen bei astrophysikalisch wichtigen Energien und fern der Stabilität anzuwenden. Dies führt zu neuen Einsichten bezüglich Kernstruktur und sowohl zu einer Verfeinerung der gängigen Theorien als auch zur Entwicklung neuer experimenteller Techniken. Astrophysikalische Untersuchungen können sogar Hinweise auf Schwächen der Kernmodelle liefern, wie durch das Beispiel der Nukleosynthese im sogenannten r-Prozeß (siehe später) belegt, wo durch Kratz et al. Hinweise darauf gefunden wurden, daß die Energieabstände der Neutronenschalen bei sehr neutronenreichen Kernen abnehmen (*shell quenching*).

Für den Astrophysiker ist das Verständnis der nuklearen Prozesse in vielerlei Hinsicht wichtig: sie beeinflussen Energieerzeugung und Sternstruktur und ändern den inneren Aufbau, aber auch direkt beobachtbare Eigenschaften der Sterne, wie z.B. die Emission der solaren Neutrinos; die durch Nukleosynthese erzeugten Isotope können durch verschiedene Prozesse in das interstellare Medium gelangen und führen zu einem chemischen Entwicklungsprozeß von Galaxien; verschiedene beobachtete Ereignisse können nur durch die damit verbundene nukleare Energieerzeugung und Nukleosynthese verstanden werden, z.B. die Unterschiede zwischen den verschiedenen Sternklassen, Novae, Supernovae, Röntgenstrahlausbrüche, Lichtkurven von explosiven Prozessen.

## Vorgangsweise

Als Beobachtungsdaten stehen vor allem astronomische Beobachtungen in einem weiten Bereich des elektromagnetischen Spektrums zur Verfügung, von Radiowellen bis zu hochenergetischen  $\gamma$ -Strahlen, die Auskunft über die Energieverhältnisse und Zeitskalen geben. Aus Sternspektren können direkt Element- und in manchen Fällen auch Isotopenhäufigkeiten be-

stimmt werden. Immer mehr Bedeutung bekommen auch Isotopenbestimmungen mit chemischen und massenspektroskopischen Methoden in Meteoriten. Spezielle Meteoriten bergen Einschlüsse aus dem ursprünglichen Material, aus dem das Sonnensystem gebildet wurde.

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten, zu Schlußfolgerungen zu gelangen:

1. Die direkte Methode: Man wählt ein astrophysikalisches Szenario und versucht, es so komplett wie möglich zu verstehen und zu simulieren. Dies führt zu den Bedingungen wie Dichten und Temperaturen, unter denen die elementerzeugenden Prozesse ablaufen. Die daraus resultierenden Häufigkeiten können nun mit den Beobachtungsdaten verglichen werden.
2. Die indirekte Methode: Aus den beobachteten Häufigkeitsmustern versucht man (z.B. mit Hilfe von parametrisierten Reaktionsnetzwerken), die benötigten Bedingungen herzuleiten, die zu diesen Mustern führen.

Meistens wird eine Kombination der beiden Methoden hilfreich sein. Es würde diesen Rahmen sprengen, den Versuch zu unternehmen, eine detaillierte Beschreibung auch nur der gängigsten Szenarien der Nukleosynthese und Energieerzeugung und der damit verbundenen Kernphysik zu geben. Als Beispiel sei deshalb an dieser Stelle nur die Erzeugung von schweren Elementen in explosiven Prozessen vorgestellt. Viele weitere wichtige und interessante Probleme, wie Urknall, Sternentwicklung, Novae, andere Typen von Supernovae, Röntgen- und Gammastrahlausbrüche oder das solare Neutrinoproblem, können leider nicht diskutiert werden.

### Nukleosynthese (r-Prozeß)

Ausgehend von der beobachteten Häufigkeitsverteilung der Isotopen in unserem Sonnensystem kann man Schlüsse auf deren Ursprung ziehen. Die Häufigkeitsverteilung ist in Abb. 1 zu sehen. Zur Orientierung ist auch die Position des einzigen stabilen Goldisotops eingezeichnet. Die Verteilung zeigt charakteristische Strukturen, die zum größten Teil durch die zugrunde-

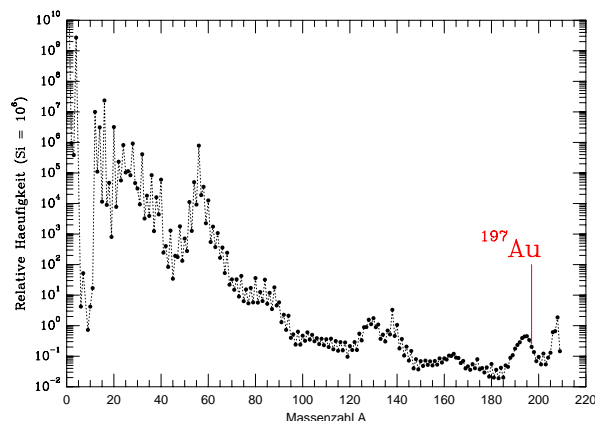


Abb. 1: Solare Häufigkeitsverteilung, willkürlich auf  $\text{Si}=10^6$  normiert.

liegende Kernphysik bedingt sind. In verschiedenen Massenbereichen wirken unterschiedliche Erzeugungsmechanismen. Die stark gebundenen leichtesten Elemente wie H und He dominieren die Häufigkeiten (man beachte die logarithmische Skala). Die Isotope dieser Elemente sowie Spuren von Li wurden im Urknall erzeugt. Die kernphysikalisch leicht zu zerstörenden Kerne der leichten Elemente Li, Be und B sind eindeutig unterrepräsentiert. Man nimmt an, daß Be und B durch Spallation schwerer Kerne in der hochenergetischen kosmischen Strahlung erzeugt werden. Die weiteren Elemente bis zu Fe werden in verschiedenen stellaren Prozessen erzeugt. Das Eisenmaximum markiert das kernphysikalisch am stärksten gebundene Isotop  $^{56}\text{Fe}$ . Sowohl bei der Fusion als auch der Spaltung von  $^{56}\text{Fe}$  wird netto Energie verbraucht. Nach dem Eisenmaximum fallen die Häufigkeiten mehr oder weniger exponentiell ab, jedoch fallen 3 Strukturen von lokalen Doppelmaxima bei den Neutronenzahlen 28, 50 und 82 auf. Diese Neutronenzahlen markieren Kerne mit abgeschlossenen Neutronenschalen, die spezielle Eigenschaften haben.

Bei der Nukleosynthese von Kernen leichter als Fe spielen Reaktionen mit geladenen Teilchen, hauptsächlich Protonen und  $\alpha$ -Teilchen, eine dominierende Rolle. Man sieht jedoch schnell, daß jenseits des Eisenmaximums diese Reaktionen wegen der zu großen Coloumbabstoßung durch die geladenen Kerne keine Wir-

kung mehr haben können. Dort kann man nur noch nennenswerte Reaktionsraten durch ungeladene Teilchen, also Neutronen, erzielen. Dadurch ist bereits eine Eigenschaft der Synthesorte festgelegt: sie müssen genug Neutronen über die benötigte Zeitspanne liefern können, um auch die schwersten Elemente aufzubauen. Die Entstehung der Strukturen der lokalen Maxima kann ebenfalls dadurch erklärt werden. Der Aufbau immer schwererer Isotope findet durch Neutroneneinfänge und nachfolgenden  $\beta^-$ -Zerfall statt. An abgeschlossenen Neutronenschalen sind die Neutroneneinfänge behindert, dadurch bauen sich bei den entsprechenden Isotopen überhöhte Häufigkeiten auf. Doch warum Doppelmaxima? Läuft der Synthesepfad entlang der stabilen Kerne, d.h., sind die Neutroneneinfänge langsam, dann bilden sich die Überhöhungen direkt an den Neutronenzahlen der abgeschlossenen Schalen (den sog. *magischen Zahlen*) aus. Finden die Neutroneneinfänge so häufig statt, daß ein Kern mehrere Neutronen einfangen kann, bevor das Produkt wieder  $\beta^-$  zerfällt, so bewegt sich der Synthesepfad weg von der Stabilität zu neutronenreichen Isotopen. Der Pfad trifft die magischen Zahlen dann bei Isotopen mit niedrigerer Masse, und die Überhäufigkeiten bilden sich dort aus. Nach dem Ende des Prozesses bewegen sich die Produkte durch eine Reihe von Zerfällen zurück zur Stabilität, wodurch ein Maximum erzeugt wird, das gegenüber den (stabilen) magischen Zahlen um einige Einheiten zu leichteren Massen verschoben ist. Dies ist genau, was man beobachtet. Durch die Position der Maxima kann man in Rechnungen mit Reaktionsnetzwerken die Bedingungen, wie Plasmatemperatur, Neutronenhäufigkeit und Zeitdauer des Syntheseprozesses, indirekt bestimmen.

Tatsächlich unterscheidet man heute zwei hauptsächlich bestimmende Prozesse in der Synthese der schweren Elemente (Abb. 2). Der *s-Prozeß* (slow neutron capture) läuft entlang der Stabilität und findet in Sternen verschiedener Masse in Helium-, Kohlenstoff- und Neonbrennen über lange Zeitspannen von Jahren bis Jahrhunderten statt. Der *r-Prozeß* (rapid neutron capture) läuft über Kerne fern der Stabi-

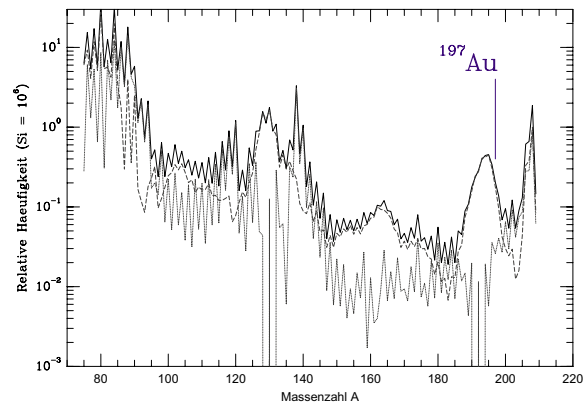


Abb. 2: Durch den s-Prozeß (gepunktete Linie) und den r-Prozeß (strichlierte Linie) erzeugte totale Häufigkeiten (durchgezogene Linie) der schweren Elemente.

lität und hat eine Zeitdauer im Bereich von 1-2s. Er ist durch hohe Neutronendichten ( $n_n \approx 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ) und Temperaturen ( $T > 10^9 \text{ K}$ ) gekennzeichnet. Dies deutet auf einen explosiven Synthesort hin. Um die Bedingungen genau festlegen zu können, muß man die Kernphysik fern der Stabilität verstehen, um präzise Vorhersagen von Neutroneneinfangraten und  $\beta^-$ -Zerfallsraten machen zu können. Die Mehrzahl der Kerne ist experimentell nicht zugänglich. Die Position des r-Prozeßpfades sowie vorhergesagte Halbwertszeiten sind oben am Titelblatt zu sehen. Die extremste Position des Pfades am Anfang des r-Prozesses ist entlang von Kernen mit Neutronenseparationsenergien  $S_n = 2 - 3 \text{ MeV}$ , also weit weg von der Stabilität und nahe der Neutronenabbruchkante, an der die neutronenreichen Kerne ungebunden werden.

Die Suche nach dem Ort des r-Prozesses ist noch nicht zu Ende. Wie vorher erwähnt, sucht man nach einem Ort, wo die benötigten Bedingungen erzeugt werden können. Darüber hinaus muß das entstandene Material in das interstellare Medium gelangen können. Über lange Zeit wurden daher gigantische Sternexplosionen, sog. Typ II Supernovae, favorisiert. Dies sind Spätphasen massiver Sterne (zwischen etwa 8 bis 25 Sonnenmassen und eventuell mehr). Nach einer Reihe verschiedener Brennphasen ist solch ein Stern zwiebelschalenartig aus Schichten verschiedener Elemente aufgebaut, mit ei-

nem Eisenkern im Zentrum. In den stabilen Brennphasen ist ein Stern eine heiße Gaskugel, im hydrostatischen Gleichgewicht zwischen kontrahierender Gravitation und dem nach außen wirkenden Gas- bzw. Strahlungsdruck. Letzterer wird durch die durch Kernreaktionen freigesetzte Energie aufrechterhalten. Beginnend mit Wasserstoff, über Helium, Kohlenstoff, Neon, Sauerstoff und Silizium werden in jeder Brennphase immer schwerere Isotope fusioniert. Mit zunehmender Masse bzw. Ladung sind dazu immer höhere Temperatur und höherer Druck notwendig. Am Ende jeder Brennphase, wenn (vereinfachend gesprochen) das Fusionsmaterial im Sterninneren erschöpft ist, kontrahiert der Stern so weit, bis das Brennen wieder zündet und der Kontraktion entgegenwirkt (gleichzeitig kann außerhalb des Zentrums das sog. Schalenbrennen stattfinden). In Sternen geringer Masse (wie unserer Sonne) kann nicht die ganze Fusionsreihe bis Eisen durchlaufen werden, und der Sternkern erkaltet langsam, nachdem das nukleare Feuer erloschen ist.

Ist ein Eisenkern genügend großer Masse entstanden, so wird dieser unter seinem eigenen Gewicht kollabieren. Der Kollaps kann nicht mehr durch freigesetzte Kernenergie gestoppt werden, und wegen der großen Masse wird der Kern bis auf nukleare Dichten komprimiert. Erst durch die Entartung des Elektronengases wird genügend Druck aufgebaut, um den Kern zu stabilisieren, ein Neutronenstern entsteht. Bei Neutronensterndichten wird die Zustandsgleichung der entarteten Materie plötzlich sehr starr, und es ergibt sich ein Rückpralleffekt (*core bounce*). Die äußeren, auf den Kern stürzenden Schichten des Sterns werden gestoppt, und es beginnt eine Schockwelle nach außen zu laufen, in der die Sternmaterie extrem aufgeheizt wird. Gleichzeitig wird die bei der Entstehung des Neutronensterns freiwerdende Gravitationsbindungsenergie von  $\approx 10^{53}$  erg in Form von Neutrinos freigesetzt. In der Schockwelle werden die vorher gebildeten Atomkerne durch Photodisintegrationen wieder zerstört. Dadurch verliert der Schock etwa 4-7 MeV/Nukleon, wird dadurch abgeschwächt und wäre daher nach heutigem Verständnis alleine nicht imstande, den

Stern zur Explosion zu bringen. Obwohl Neutrinos extrem schwach mit Materie wechselwirken, können sie dennoch ungefähr 1% ihrer Energie in den äußeren Sternschichten deponieren. Dies reicht aus, um die Schockwelle zu beschleunigen und die Explosion herbeizuführen. Eine Typ II Supernova strahlt für kurze Zeit ungefähr so viel Energie ab wie alle anderen Sterne einer Galaxie zusammengenommen.

Nahe der Neutronensternoberfläche dampfen etwa  $10^{-4} - 10^{-6}$  Sonnenmassen an Material ab, und es entsteht hinter der Schockfront eine 'Blase' beschleunigter, sehr heißer und relativ dünner Materie, die neutronenreich ist. Diese Blase hoher Entropie expandiert und kühlt im Neutrinowind, und es beginnen neuerliche Kernreaktionen, die – von Protonen und  $\alpha$ -Teilchen ausgehend – wieder schwerere Isotope erzeugen können. Man nimmt an, dies sei der Ort des r-Prozesses. Die Abbildung unten links am Titelblatt zeigt die nach außen laufende Schockwelle 150 ms nach dem core bounce eines Sterns mit 25 Sonnenmassen (hydrodynamische Simulation von Fryer und Heger, UC Santa Cruz, USA). Die Farben kodieren die Entropie, die Pfeile geben Geschwindigkeitsvektoren an (ganz außen stürzt das Material immer noch nach innen, die Schockfront hat es noch nicht erreicht).

Das oben beschriebene Szenario ist die Modellvorstellung, die bisher aber noch in keinem Computermodell vollständig simuliert werden konnte. Die gleichzeitige Simulation des Kernkollapses, der Hydrodynamik der Explosion, des Strahlungstransports sowie der dabei stattfindenden Kernreaktionen übersteigt die Fähigkeiten aller derzeit verfügbaren Computer. Man muß sich daher darauf beschränken, Teilbereiche zu simulieren und zu versuchen, diese zu einem vernünftigen Gesamtbild zusammensetzen. Zusätzlich hat man noch mit weiteren Unsicherheiten zu kämpfen, z.B. in der Kenntnis der Zustandsgleichung für Neutronensterne, die den Kernkollaps und Rückpralleffekt bestimmt. Dennoch ist man heute zu einem bemerkenswert konsistenten Gesamtbild gelangt. Jedoch zeigt sich, daß in solchen direkten Simulationen auch in der Hochentropieblase nicht die für den r-Prozeß notwendigen Dichten (Entropien) er-

zielt werden können. Da der Unterschied nur etwa einen Faktor 5 beträgt, könnte man dies einfach der immer noch mangelhaften Simulation zuschreiben. Allerdings zeigen verschiedene Studien von mehreren Gruppen weltweit ähnliche Ergebnisse.

In jüngster Zeit mehren sich auch andere Befunde, daß Typ II Supernovae nicht der Ort bzw. nicht der einzige Ort des r-Prozesses sein können. So wurde in unserer Gruppe an der Universität Basel die Zeitentwicklung des r-Prozesses in der expandierenden Hochentropieblase mit Hilfe eines Reaktionsnetzwerks studiert, in welches der Dichte- und Temperaturverlauf parametrisiert eingegeben wurde. Dabei wurde eine adiabatische Expansion der Blase angenommen. Nimmt man die nuklearen Eigenschaften der Kerne fern der Stabilität als bekannt an, ist die Nukleosynthese dann nur mehr eine Funktion der Entropie und der Neutronenhäufigkeit. Letztere bestimmt, wieviel freie Neutronen für die Neutroneneinfänge zur Verfügung stehen und wieviel der Neutronen in  $\alpha$ -Teilchen gebunden sind, aus denen wiederum die 'Saatkerne' des r-Prozesses bis zum Eisenmaximum aufgebaut werden. Man findet dabei, daß bei Entropien, welche die Ausbildung auch des Häufigkeitsmaximums bei den schwersten Kernen ermöglichen, mittelschwere Kerne (oberhalb von Eisen, aber mit Massenzahl  $A < 110$ ) immer überproduziert werden. Obwohl in einer realistischen Explosion Zonen verschiedener Entropien vorhanden sein werden, gibt es keine mögliche Kombination, die sowohl die mittelschweren als auch die schweren Kerne in den beobachteten Häufigkeiten erzeugen kann, selbst wenn man das Problem der falschen Dichten in den 'konsistenten' Simulationen lösen sollte.

Die Schlußfolgerung daraus ist, daß entweder in Typ II Supernovae nur ein Teil der r-Prozeß-Kerne entsteht, oder daß man einen völlig anderen Ort suchen muß. Wegen der extremen Bedingungen werden recht exotisch anmutende Szenarien diskutiert, die aber astrophysikalisch durchaus Sinn machen, wie etwa Nukleosynthese in Akkretionsscheiben und Jets um schwarze Löcher oder Verschmelzung von Neutronen-

sternpaaren. Letztere werden auch in Basel studiert. Ungefähr die Hälfte oder etwas mehr aller Sternsysteme sind Doppelsterne. Durchlaufen beide Sternpartner ihren Entwicklungspfad bis zu Neutronensternen, können durchaus Neutronensternpaare entstehen. Es ist noch nicht völlig klar, wie häufig solche Systeme entstehen, da der bei einer Supernova gebildete Neutronenstern durch asymmetrische Neutrinoabstrahlung eine starke Impulsänderung erfährt und daher aus einem gebundenen Doppelsystem ausgestoßen werden kann. Jedoch wurden bereits gebundene Neutronensternsysteme gefunden. Hulse und Taylor haben 1993 für ihre Untersuchungen eines solchen Doppelsystems den Nobelpreis erhalten.

Das beschriebene Doppelsystem aus Neutronensternen verliert Energie durch Abstrahlung von Gravitationswellen. Über einen Zeitraum von Millionen von Jahren bewegen sich die beiden Partner auf Spiralbahnen aufeinander zu und kollidieren schließlich. Rechts unten am Titelblatt ist das Ergebnis einer hydrodynamischen Simulation von Stephan Rosswog (damals Universität Basel, heute am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln) zu sehen, die die Situation 4 ms nach der ersten Berührung zeigt. Farblich dargestellt ist die Dichte. (Zu beachten ist die unterschiedliche Größenskala der beiden Bilder unten.) Materie an den Enden der Spiralarms ist ungebunden, wird also aus dem System ausgestoßen. Erste Untersuchungen gemeinsam mit Ch. Freiburghaus (Basel) zeigen, daß diese wesentlich neutronenreichere Materie als in Supernovae auch bei den wesentlich niedrigeren Entropien der Neutronensternverschmelzungen schwere Elemente durch einen r-Prozeß erzeugen kann. Somit ist dieses Modell eine echte Alternative zum bzw. mögliche Ergänzung des r-Prozesses in Typ II Supernovae.

Neueste Beobachtungen mit dem Hubble Space Telescope finden r-Prozeßelemente auch in den ältesten Sternen unserer Galaxie, den Halo-Sternen. Diese sind gewöhnlich sehr arm an mittelschweren und schweren Elementen, was eine Analyse des Spektrums äußerst stark erschwert. Die neuen Beobachtungen zeigen aber, daß zwar

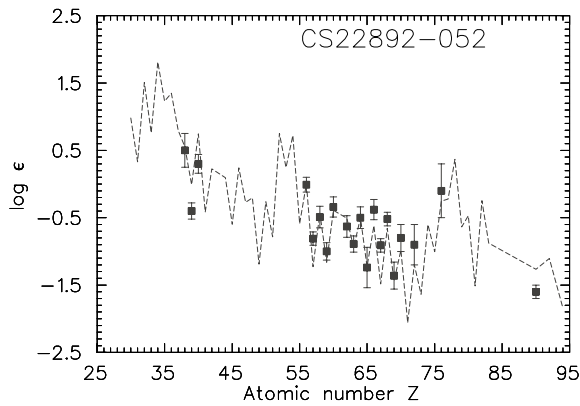


Abb. 3: In einem Halo-Stern beobachtete Häufigkeiten (Cowan et al., Quadrate); die Kurve ist das skalierte Ergebnis einer Parameterstudie des r-Prozesses. Die Differenz zur Häufigkeit des langlebigen  $^{232}\text{Th}$  ( $Z = 90$ ) bietet eine neue Möglichkeit der Altersbestimmung.

quantitativ wesentlich weniger schwere Elemente in solchen Sternen vorhanden sind, daß jedoch die relativen Häufigkeiten gut mit dem r-Prozeß-Muster übereinstimmen (siehe Abb. 3). Damit ist die Robustheit des r-Prozesses gezeigt. Obwohl die solaren Häufigkeiten über vergangene Zeiten summierte Häufigkeiten aus verschiedenen Quellen (d.h. mehrere Supernovae und/oder Merger bzw. etwaige andere Phänomene) darstellen, scheint jeder einzelne Beitrag exakt die gleichen Häufigkeitsverhältnisse wiederzugeben. In älteren Sternen, die weniger Beiträge enthalten, sind daher die Absolutwerte geringer, aber die Verhältnisse gleich den solaren. Dies bestätigt die früheren Parameterstudien, auch wenn noch keine voll konsistente Simulation, z.B. in Supernovae, gelungen ist.

Bis vor kurzem konnte man nur die Elemente oberhalb von Barium in Halo-Sternspektren erkennen. Kürzlich ist es aber gelungen, den Bereich zu etwas leichteren Elementen zu erweitern. Diese scheinen von der r-Prozeßkurve abzuweichen, sie sind unterrepräsentiert. Das würde auf mindestens zwei Quellen für den r-Prozeß hindeuten, die zeitlich verschoben sind. Ähnliche Schlüsse wurden schon früher aus Analysen von Isotopenhäufigkeiten in primordialen Einschlüssen in Meteoriten gezogen. Dies macht eine Kombination zweier Szenarien wahrscheinlich, wie etwa Typ II Supernovae als Produzen-

ten der Kerne mit  $A > 110$  (wobei die Ejektion des leichteren Massenbereichs unterdrückt werden muß) sowie Neutronensternmerger zur Produktion der restlichen Elemente. Weitere Beobachtungen metallarmer, alter Sterne werden eindeutige Hinweise liefern.

In diesem Kapitel habe ich kurz den derzeitigen Kenntnisstand bezüglich des r-Prozesses skizziert. Darüber hinaus ist es hoffentlich gelungen, das Zusammenspiel sowohl der verschiedenen Fachgebiete (Kernphysik, Astrophysik, Astronomie) als auch der verschiedenen Zugangsweisen (direkt, indirekt) beispielhaft darzustellen.

## Probleme

Die auftretenden Probleme bei der Behandlung der Themen der nuklearen Astrophysik stellen gleichzeitig die Herausforderungen in diesem interessanten Gebiet dar. Sie lassen sich in zwei grobe Gruppen – Kernphysik und Astrophysik betreffend – einteilen.

Obwohl sich die Temperaturen der stellaren und explosiven Plasmen in den Größenordnungen von Millionen bis Milliarden Kelvin bewegen, sind die daraus folgenden Wechselwirkungsenergien der Kernreaktionen für kernphysikalische Begriffe äußerst niedrig, von thermischen Energien bis maximal wenige MeV. Dies stellt sowohl in theoretischer als auch in experimenteller Sicht ein Problem dar. Bisher schenkte man diesem Energiebereich von theoretischer Seite her wenig Beachtung. Experimente mit geladenen Teilchen werden durch die Energien unterhalb der Coulombschwelle stark erschwert, da die Wirkungsquerschnitte äußerst klein und der Untergrund entsprechend groß sind. Ein berühmtes Beispiel ist die Reaktion  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ , die die Sternentwicklung wesentlich beeinflusst. Im astrophysikalisch wichtigen Energiebereich wird der Wirkungsquerschnitt durch die Ausläufer von zwei Resonanzen unterhalb der  $\alpha$ -Kanalschwelle bestimmt, deren Beiträge man mit hoher Genauigkeit kennen mußte. Experimentell ist diese Reaktion wegen der Coulombbarriere aber noch nicht zugänglich. Weitere Reaktionen mit Protonen, Deuteronen und  $^3\text{He}$  zeigen ebenfalls resonante Beiträge bei niedriger Energie, die noch nicht ver-

messen sind. Im LUNA-Experiment, das zur Reduktion des durch kosmische Strahlung erzeugten Untergrunds im Inneren des Gran Sasso Massivs in Italien aufgebaut ist, wird versucht, solche Reaktionen direkt zu messen. Doch selbst bei größtmöglicher Unterdrückung des Untergrunds bleibt das Problem der extrem niedrigen Zählraten bestehen.

Ein anderes Problem stellt die Voraussage von Kerneigenschaften und Reaktionsraten für instabile Kerne dar. Nicht nur im  $r$ -Prozeß sind Kerne weit von der Stabilität involviert, auch in anderen Szenarien sind solche instabilen Kerne wichtig. Auf der protonenreichen Seite stellt der  $rp$ -Prozeß (rapid proton capture) das Extrem dar. Er findet in thermonuklearen Explosionen in von einem Begleitstern auf einem Neutronenstern akkretierten Material statt und erklärt am Himmel beobachtete Röntgenstrahlensausbrüche. Der Pfad des  $rp$ -Prozesses läuft von leichten Kernen entlang der Protonabbruchkante und kann, je nach vorhergesagten Kerneigenschaften, bis zu Massen von  $A \approx 100$  führen. Vorhersagen von Halbwertszeiten und Massen sind für instabile mittelschwere bis schwere Kerne immer noch mit großen Unsicherheiten behaftet, da alle Modelle nur an Kernen entlang der Stabilität angepaßt wurden. Gleiches gilt für Kerneigenschaften, welche benötigt werden, um Wirkungsquerschnitte und damit die in der Astrophysik benötigten Reaktionsraten zu berechnen. Es gibt zwar gute phänomenologische Modelle für einzelne Kerne oder verschiedene Regionen entlang der Stabilität, aber kaum globale Modelle für einen großen Massen- und Energiebereich. Schon allein die schiere Anzahl der möglichen Reaktionspartner und Reaktionen (etwa 5000 gebundene Kerne mit mehr als 30000 möglichen, bedeutenden Reaktionen) beschränkt die Anwendbarkeit von verfügbaren, aber rechenzeitintensiven mikroskopischen Modellen und fordert eine verbesserte globale, wenn auch phänomenologische, Behandlung. Neben den Reaktionen der starken Wechselwirkung sind auch Raten der schwachen Wechselwirkung bei extremen Temperatur- und Druckbedingungen von Bedeutung.

Im Labor gemessene Wirkungsquerschnitte sind

auch nur bedingt für die Berechnung von Kernreaktionen und Reaktionsraten in stellaren Plasmen geeignet. Da sich die Atomkerne mit dem Sternplasma im thermischen Gleichgewicht befinden, sind sie angeregt. Die im Labor gemessene Reaktion an einem Zielkern im Grundzustand muß daher auf thermisch angeregte Zielkerne umgerechnet werden. Dies ist möglicherweise ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet. Ein weiterer Effekt, der die Raten in einem Plasma verändert und Laborraten von stellaren Raten unterscheidet, ist die Abschirmung der Coulombpotentiale der Kerne durch die freien Elektronen im Plasma. Durch die Abschirmung verringert sich die effektive Ladung der Zielkerne, was zu erhöhten Reaktionsraten im Vergleich zu den gemessenen führt. Der Abschirmeffekt in stellaren Plasmen ist noch nicht vollständig verstanden. In Laborexperimenten kann man bereits Auswirkungen einer Variante des Abschirmeffekts sehen. Bei Energien weit unterhalb der Coulombbarriere ist der gemessene Wirkungsquerschnitt durch die Wirkung der Atomelektronen erhöht im Vergleich zu den Resultaten, die man für nackte Kerne erwarten müßte. Die Abschirmung durch atomare Elektronen ist theoretisch gut verstanden, unterscheidet sich aber von den beschriebenen Effekten in einem Plasma. Auch  $\beta$ -Zerfälle und Elektroneneinfang sind durch die Plasmabedingungen beeinflusst, und daher unterscheiden sich terrestrische Halbwertszeiten von stellaren.

Eine weitere kernphysikalische Unsicherheit stellt ein Problem für die Untersuchung von Supernovae und Neutronensternen dar: die Zustandsgleichung von Materie endlicher Ausdehnung bei Kernmateriedichte und darüber hinaus. Je nach theoretischem Modell für die Zustandsdichte ergeben sich unterschiedliche Bereiche für mögliche Neutronensternradien und -massen. Der eigentliche Explosionsmechanismus von Typ II Supernovae ist stark davon abhängig und damit verbunden die Frage nach dem *mass cut*, d.h., wieviel und welche Materie bei der Explosion ausgeworfen wird und wieviel davon im Neutronenstern verbleibt. Dies hat weitreichende Konsequenzen. Einerseits für die Frage nach der Isotopenzusammensetzung des

ausgeworfenen Materials, andererseits auch für das untere Limit der Masse, bei der noch eine Typ II Explosion stattfinden kann, sowie der Frage, ob sehr massive Sterne in ihrem Inneren schwarze Löcher bilden und ob es dabei auch zu einem explosiven Ausstoß von Hüllenmaterial kommt.

In der Astrophysik sind auch die Simulationen der explosiven Szenarien äußerst schwierig. Sternentwicklung und explosive Prozesse müssen in hydrodynamischen Rechnungen untersucht werden. Dies gestaltet sich numerisch anspruchsvoll, insbesondere durch die in solchen Prozessen extremen Bedingungen, die noch dazu über sehr kurze Zeiträume über mehrere Größenordnungen schwanken können. Je nach untersuchtem Fall verwendet man verschiedene Methoden, z.B. SPH (smoothed particle hydrodynamics) oder PPM (piecewise-parabolic method) u.a., zur Lösung der entsprechenden Gleichungen. Gleichzeitig mit den hydrodynamischen Gleichungen muß man die Energieänderung durch stattfindende Neutrino-Kern- und Kern-Kern-Reaktionen mitführen. Auch die richtige Behandlung des Strahlungstransports ist schwierig. Dies ist derzeit nur mit einem sehr beschränkten Reaktionsnetzwerk möglich. Wie auch die Abbildung links unten auf dem Titelbild zeigt, sind Turbulenzen in den Schockfronten von Bedeutung, die die Berechnung zusätzlich erschweren. Rotationseffekte führen zu neuen Symmetrieachsen. Aus all diesen Gründen ist eine mehrdimensionale Behandlung notwendig, die je nach verwendeter Methode und den gemachten Vereinfachungen oft auf den Einsatz von Supercomputern mit hoher Rechenleistung angewiesen ist. Vollständig an die Hydrodynamik gekoppelte Reaktionsnetzwerke sind derzeit nicht möglich, daher muß man z.B. die Häufigkeiten der erzeugten schweren Elemente in externen Netzwerken im post-processing-Verfahren berechnen. Entsprechend schwierig gestaltet sich auch die Behandlung von Akkretionsscheiben und Jets um Objekte wie Neutronensterne oder schwarze Löcher.

### **Zukünftige Entwicklungen**

Die zukünftigen Verbesserungen in den Modellen der Nukleosynthese und dem Verständnis

der Probleme der nuklearen Astrophysik werden vor allem auf drei Säulen ruhen. Sehr wichtig für die Theorie wird die zu erwartende Verbesserung in den Leistungen der Computer sein. Dies ist sowohl bedeutend für die hydrodynamischen Simulationen als auch für globale Vorhersagen durch mikroskopische Modelle der Kernphysik.

Die zweite Säule werden zukünftige Experimente der Kernphysik sein. Dazu zählen erstens 'klassische' Kernphysik-Experimente bei niedrigen Energien, die Wirkungsquerschnitte und Kerneigenschaften an stabilen Kernen direkt vermessen. Systematische Studien bei astrophysikalisch relevanten Energien werden die für die theoretische Berechnung der Wirkungsquerschnitte wichtigen Parameter studieren. Sowohl in den USA als auch in Europa laufen diesbezügliche Projekte bzw. sind in Planung. Auch Experimente wie LUNA, die versuchen, Wirkungsquerschnitte bei stellaren Energien direkt zu messen, versprechen interessante Ergebnisse. Neue Detektor- und Analyseentwicklungen könnten hier bedeutende Verbesserungen in unserem Kenntnisstand bringen. Hochfluß-Neutronenspallationsquellen wie LANSCE (USA) oder die geplante ESS (European spallation source) werden es ermöglichen, für den s- und r-Prozeß relevante Effekte zu studieren. Neutrino-Kern-Wirkungsquerschnitte werden bei Experimenten wie KARMEN und LSND bestimmt. In einer ganzen Reihe von Experimenten rund um den Erdball versucht man, das solare Neutrino-Problem zu lösen und die Natur der Neutrinooszillationen zu verstehen.

Die zweite Klasse kernphysikalischer Experimente konzentriert sich auf die Erforschung von instabilen Atomkernen. Dazu zählen Fragmentseparatoren und ISOL-Anlagen, wie z.B. CERN-ISOLDE (Schweiz/Frankreich), SPIRAL-GANIL und LISE-GANIL (Frankreich), GSI (Deutschland), NSCL-MSU (USA) und RIKEN (Japan). Dort können Halbwertszeiten und Massen von Kernen fern der Stabilität vermessen und sogar erste kernspektroskopische Untersuchungen vorgenommen werden. Geräte mit radioaktiven Ionenstrahlen werden es ermöglichen, direkt auch Reaktionen mit stark instabilen Zielkernen durchzuführen (wenn auch lei-



der nicht so weit entfernt von der Stabilität, wie für den r-Prozeß benötigt). Ein wichtiges Hilfsmittel dabei ist der Einsatz von Coulomb-Dissoziationstechniken. Weitere Anlagen sind an mehreren Stellen in Europa, Japan und USA geplant. Nicht zu vergessen sind die Experimente mit Schwerionenstößen bei GSI, RHIC und LHC, welche das Quark-Gluon-Plasma und die Zustandsgleichung von Kernmaterie studieren können.

Die dritte Säule der zukünftigen nuklearen Astrophysik werden natürlich auch wesentlich verbesserte astronomische Daten sein. Bereits heute liefern Boden- und Satellitenbeobachtungen im gesamten elektromagnetischen Spektrum wertvolle Hinweise, wie etwa Hubble, ROSAT und das Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO). Auch die Vermessung der kosmischen Strahlung durch ULYSSES, HEGRA und KASCADE ist hier zu nennen. Eine Anzahl von verbesserten Teleskopen und Satellitenexperimenten (wie etwa AXAF und CHANDRA im Röntgenbereich und die kürzlich erfolgte Reparatur und Verbesserung von Hubble) werden dafür sorgen, daß der Datenfluß auch in Zukunft nicht abreißen wird. Verbesserungen schließen sowohl die Erhöhung in der Auflösung als auch eine Erweiterung des beobachtbaren Wellenlängen- und Teilchenspektrums mit ein.

All dies stellt sicher, daß die nukleare Astrophysik auch in den kommenden Jahren ein fruchtbares und interessantes Forschungsgebiet bleiben wird. Der Zugang zu Ressourcen in internationalen Kooperationen und Hochleistungsrechenzentren ist aber für ein Mitmischen an vorderster Front unumgänglich.

*Thomas Rauscher*

Universität Basel und  
University of California at Santa Cruz

### Ausgewählte Literatur

- E. M. Burbidge et al.: [B<sup>2</sup>FH] Rev. Mod. Phys. 29 (1957) 547  
A. G. W. Cameron: Atomic Energy of Canada, Ltd., CRL-41 (1957)  
J. J. Cowan et al.: Astrophys. J. 480 (1997) 246  
C. Freiburghaus et al.: Astrophys. J. 516 (1999) 381  
C. Fryer, A. Heger: Astrophys. J., eingereicht  
F. Käppeler, F.-K. Thielemann, M. Wiescher: Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 48 (1998) 175  
K.-L. Kratz et al.: Astrophys. J. 402 (1993) 216  
T. Rauscher, F.-K. Thielemann, K.-L. Kratz: Phys. Rev. C 56 (1997) 1613  
C. E. Rolfs, W. S. Rodney: *Cauldrons in the Cosmos*, University of Chicago Press, 1988  
S. Rosswog et al.: Astronomy & Astrophysics 341 (1999) 499  
F.-K. Thielemann et al.: in *Nuclear and Particle Astrophysics*, eds. J. Hirsch., D. Page (Cambridge University Press, Cambridge 1998), p. 27; astro-ph/9802077

## 6

## Fachausschüsse

### Fachausschuß ATOM-, MOLEKÜL- UND PLASMAPHYSIK

Als neuer Vorsitzender des Fachausschusses AMP für die Jahre 2000 und 2001 möchte ich die Gelegenheit zu einer kurzen Vorstellung nutzen. Ich leite seit vielen Jahren die Arbeitsgruppe Gasentladungs- und Plasmaphysik am Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz und beschäftige mich derzeit vorwiegend mit Fragen der raum- und zeitaufgelösten Plasmadiagnostik. Neben diversen interferometrischen Methoden bis hin zur optischen Tomografie finden dabei zunehmend nichtlineare optische Prozesse als hochauflösende plasmaspektroskopische Verfahren Verwendung. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Verbesserung und Entwicklung einer Reihe von Laborplasmen. Als Beispiel seien experimentelle Untersuchungen im Hinblick auf die Realisierung von entladungsgepumpten 'table-top'-Lasersystemen im Bereich vakuumultravioletter bzw. weicher Röntgenstrahlung genannt.

Meine wesentliche Aufgabe für die nächsten zwei Jahre sehe ich in einer optimalen Information der Fachauschussmitglieder über wichtige Tagungen, Veranstaltungen und weitere relevante Aktivitäten. Einen Großteil davon werden Sie nach wie vor der homepage des Fachausschusses

<http://www.iap.tuwien.ac.at/www/AMP/> entnehmen können, deren Verwaltung dankens-

wernerweise nach wie vor Fritz Aumayr vom Institut für Allgemeine Physik der TU Wien wahrnehmen wird.

Dringend erscheinende Mitteilungen lassen sich zweifellos am schnellsten und kostengünstigsten über e-mail abwickeln. Daher ergeht meine Bitte an alle Fachausschußmitglieder, mir ihre e-mail-Adressen zu übermitteln bzw. Kolleginnen und Kollegen zu ersuchen, dies zu tun. Der derzeitige Stand an verfügbaren e-mail-Adressen (siehe homepage des Fachausschusses) ist noch sehr gering.

Schließlich möchte ich Sie noch erinnern, daß im kommenden Jahr die Jahrestagung in Form einer Jubiläumsveranstaltung aus Anlaß des 50jährigen Bestehens der ÖPG in Graz stattfinden wird und aus diesem Grunde die Fachausschußaktivitäten in die Haupttagung integriert werden sollen. Für diesbezügliche konstruktive Vorschläge, wie auch für jegliche nützliche Hinweise bin ich sehr dankbar. Bitte richten Sie diese an:

Ao. Univ. Prof. DI Dr. Theo Neger  
Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz  
Petersgasse 16, A-8010 Graz  
Tel. +43 316 873-8147  
Fax +43 316 873 8655  
e-mail: [t.neger@iep.tu-graz.ac.at](mailto:t.neger@iep.tu-graz.ac.at)

Mit den besten Wünschen für das Neue Jahr

*Theo Neger*

◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇◇

Um interessierten Lesern die Möglichkeit zu geben, mit den Vorsitzenden der Fachausschüsse Kontakt aufzunehmen, werden im folgenden die Adressen angegeben.

**Bitte beachten Sie, daß seit 1. Jänner 2000 in einigen Fachausschüssen neue Vorsitzende tätig sind!**

**Fachausschuß AKUSTIK:**

Prof. Dr. Werner A. Deutsch  
Forschungsstelle für Schallforschung der ÖAW  
Liebiggasse 5  
A-1010 Wien

Tel. (01) 4277 29501  
Fax (01) 4277 9296  
e-mail: [wad@kfs.oeaw.ac.at](mailto:wad@kfs.oeaw.ac.at)

**Arbeitskreis ENERGIE**

DI Dr. Norbert Pillmayr  
KELAG-Zentrale  
Arnulfplatz 2  
A-9020 Klagenfurt  
Tel. (0463) 525-1420  
Fax (0463) 525-1995  
e-mail: [norbert.pillmayr@kelag.at](mailto:norbert.pillmayr@kelag.at)

Ao.Univ. Prof. DI Dr. Günter Wiesinger  
Institut für Experimentalphysik  
Technische Universität Wien  
Wiedner Hauptstraße 8-10 / 131  
A-1040 Wien  
Tel. (01) 58801-13155  
Fax (01) 58801-13199  
e-mail: [wiesinger@xphys.tuwien.ac.at](mailto:wiesinger@xphys.tuwien.ac.at)

**Fachausschuß FESTKÖRPERPHYSIK:**

Univ. Prof. Dr. Walter Steiner  
Institut für Angew. u. Technische Physik, TU Wien  
Wiedner Hauptstraße 8-10 / 137  
A-1040 Wien  
Tel. (01) 58801 5636  
Fax (01) 58 68 814  
e-mail: [steiner@tuwien.ac.at](mailto:steiner@tuwien.ac.at)

**Arbeitskreis FRAUEN IN DER PHYSIK:**

Univ. Prof. Dr. Günther Bauer  
Institut für Halbleiterphysik  
Johannes Kepler Universität Linz  
Altenberger Straße 69  
A-4040 Linz-Auhof  
Tel. (0732) 2468-9601, -9600 (Sekt.)  
Fax (0732) 2468-650  
e-mail: [g.bauer@hlphys.uni-linz.ac.at](mailto:g.bauer@hlphys.uni-linz.ac.at)

**Fachausschuß KERN- UND TEILCHENPHYSIK:**

Ao. Univ. Prof. DI Dr. Anton Rebhan  
Institut für Theoretische Physik  
Technische Universität Wien  
Wiedner Hauptstraße 8-10 / 136  
Tel. (01) 58801-13626  
Fax (01) 58801-13699  
e-mail: [rebhana@tph.tuwien.ac.at](mailto:rebhana@tph.tuwien.ac.at)

**Fachausschuß LEHRKRÄFTE AN HÖHEREN SCHULEN:**

Univ. Prof. Dr. Helmut Kühnelt  
Institut für Theoretische Physik, Univ. Wien  
Boltzmanngasse 5  
A-1090 Wien

Tel. (01) 31367-3415  
Fax (01) 3172220  
e-mail: kuehn@doppler.thp.univie.ac.at  
http://doppler.thp.univie.ac.at/~vfpc

Prof. Mag. Hans Haimo Tentschert  
BG Rein, A-8003 Rein  
Tel. (03124) 51622, Fax (03124) 51622-23

**Fachausschuß MEDIZINISCHE PHYSIK, BIOPHYSIK  
UND UMWELTPHYSIK:**

Univ. Doz. Dr. Günther Schaubberger  
Institut für Medizinische Physik  
Veterinärmedizinische Universität  
Josef Baumann-Gasse 1  
A-1210 Wien  
Tel. (01) 25077 4306  
Fax (01) 25077 4390  
e-mail: gunther.schaubberger@vu-wien.ac.at

**Fachausschuß PHYSIK - INDUSTRIE - ENERGIE:**

Univ. Doz. Dr. Peter W. Krempf  
AVL List GmbH  
Hans List-Platz 1  
A-8020 Graz  
Tel. (0316) 787 539  
Fax (0316) 787 591  
e-mail: peter.krempf@avl.com  
http://pie.avl.com

**Fachausschuß FORSCHUNG AN NEUTRONEN- UND  
SYNCHROTRONSTRAHLUNGSQUELLEN:**

Univ. Prof. Mag. Dr. Peter Fratzl  
Institut für Metallphysik  
Montanuniversität Leoben  
Jahnstraße 12  
A-8700 Leoben  
Tel. (03842) 402-465  
Fax (03842) 45511-16  
e-mail: fratzl@unileoben.ac.at

**Fachausschuß POLYMERPHYSIK:**

Univ. Prof. Dr. Peter Zipper  
Institut für Physikalische Chemie  
Universität Graz  
Heinrichstraße 28  
A-8010 Graz  
Tel. (0316) 380 5415  
Fax (0316) 380 9850  
e-mail: peter.zipper@kfunigraz.ac.at

**Fachausschuß QUANTENELEKTRONIK, ELEKTRODY-  
NAMIK UND OPTIK:**

Dr. Alfred Leitner  
Institut für Experimentalphysik

Karl-Franzens-Universität Graz  
Universitätsplatz 5  
A-8010 Graz  
Tel. (0316) 380 5201  
Fax (0316) 380 9816  
e-mail: alfred.leitner@kfunigraz.ac.at

7

## Max Auwärter-Preis

### Ausschreibung für den Max Auwärter-Preis 2000

Die MAX AUWÄRTER-Stiftung in Balzers, Fürstentum Liechtenstein, vergibt grundsätzlich alle zwei Jahre statutengemäß den MAX AUWÄRTER-Preis an Studierende und jüngere Mitarbeiter/Mitarbeiterinnen der Universitäten, Hochschulen und Fachhochschulen, die auf den Gebieten der Oberflächenphysik, der Grenzflächenchemie und der anorganischen sowie organischen dünnen Schichten eine besonders wichtige wissenschaftliche Arbeit als Alleinautor veröffentlicht haben.

Der MAX AUWÄRTER-Preis 2000 ist mit öS 100.000,- (das sind ca. 7.270.- Euro) dotiert. Eine Aufteilung des Preises unter mehreren Bewerbern ist möglich. Von einer Preiszuerkennung kann Abstand genommen werden, falls keine preiswürdigen Arbeiten eingereicht werden.

Eine wiederholte Verleihung des MAX AUWÄRTER-Preises an ein und dieselbe Person ist nicht vorgesehen.

Zur Bewerbung um den MAX AUWÄRTER-Preis 2000 werden die zu prüfende Arbeit (4-fach) sowie ein Lebenslauf mit Darstellung der bisherigen wissenschaftlichen Tätigkeit (ebenfalls 4-fach) bis

**30. April 2000**

an die Adresse:

Univ. Prof. Dr. Hannspeter Winter  
Institut für Allgemeine Physik  
Technische Universität Wien  
Wiedner Hauptstraße 8-10/134  
A-1040 Wien  
Fax +43 (1) 58801 13499

mit dem Vermerk:

‘Max Auwärter-Preis 2000’

erbeten. Eine Erstreckung der Frist ist nicht möglich. Anträge auf Verleihung können auch von dritter Seite eingereicht werden.

Über die Vergabe entscheidet ein Preisgericht, dessen Zusammensetzung der Stiftungsrat bestimmt. Das Preisgericht kann erforderlichenfalls auch Gutachten anderer Fachleute einholen. Die Mitglieder des Preisgerichtes und die Gutachter sind zur Verschwiegenheit verpflichtet. Die Entscheidung des Preisgerichtes ist endgültig und unterliegt keinerlei Anfechtung, insbesondere auch nicht vor Gericht.

Die Überreichung des MAX AUWÄRTER-Preises 2000 ist anlässlich der ordentlichen Jahreshauptversammlung der Österreichischen Gesellschaft für Vakuumtechnik vorgesehen.

*Hannspeter Winter*

**8**

## Buchankündigung

**Epistemological and Experimental Perspectives on Quantum Physics**, herausgegeben von *Daniel Greenberger*, *Wolfgang L. Reiher* und *Anton Zeilinger*, erscheint demnächst in der Reihe ‘Vienna Circle Institute Yearbook’ bei Kluwer Academic Publishers, Holland, 388 pp., Preis NLG 295,-. Nähere Informationen finden Sie

unter <http://www.wkap.nl/series.htm/VCIY> und <http://www.wkap.nl/series.htm/VICC>.

**9**

## Science Week

### ScienceWeek @ Austria 2000

Wie Sie vielleicht bereits gehört haben, findet vom 19. bis 28. Mai 2000 in ganz Österreich die SCIENCEWEEK @ AUSTRIA 2000 mit freundlicher Unterstützung des Wissenschafts- und des Unterrichtsministeriums statt.

Diese Woche der Öffentlichkeitsarbeit für die Wissenschaften steht unter dem Motto ‘Eine Vergnügungsreise durch die Wissenschaft’ mit dem Ziel, Interesse und Neugierde für Forschung und Wissenschaft bei einem breiten Publikum in ganz Österreich zu wecken.

Im Rahmen der SCIENCEWEEK @ AUSTRIA 2000 sind Universitäts- und Forschungsinstitute, wissenschaftliche Vereine und Unternehmen, Fachhochschulen, Schulen und Museen aufgerufen, ihre Leistungen und Erkenntnisse in allgemein verständlicher Weise mit interaktiven Methoden zu präsentieren, möglichst mit Kooperationspartnern – und möglichst auch außerhalb der üblichen Gebäude, z.B. in Bahnhöfen, Kaufhäusern, Autosalons, Foyers von Banken oder Theatern, in Krankenhäusern, Museen etc. Solche ‘Science Weeks’ haben in anderen Ländern wie Australien, Frankreich, Großbritannien, Kanada, Irland, Niederlande und USA bereits Tradition.

Die Teilnahme erfolgt kostenlos und freiwillig, auf eigene Initiative und Verantwortung. Jeder Veranstalter kann selbst über Ort, Aufwand, Art und Weise der Präsentation entscheiden – wir beraten und unterstützen gerne – mit PR, Präsentationsberatung, Anregungen für Kooperationen mit Schulen, Unternehmen etc.

Alle an Universitäten gelehrten Wissenschaftszweige können präsentiert werden: von Astronomie, Archäologie bis Musikwissenschaft, von Medizin bis Soziologie, von Teilchenphysik bis zur Wirtschaft – auch interdisziplinäre Kombinationen. Durch die Veranstaltungen während der SCIENCEWEEK @ AUSTRIA hat die Öffentlichkeit die Möglichkeit, sich ein Bild von der Arbeit und von den Leistungen der österreichischen Wissenschaftler/innen zu machen. Die SCIENCEWEEK @ AUSTRIA richtet sich an alle Wähler/innen und Steuerzahler/innen, kurz an alle Mitbürger/innen, an Interessierte aller Altersstufen.

SCIENCEWEEK @ AUSTRIA ist ein Aufruf an Institutionen und Unternehmen, sich an dieser Woche der Öffentlichkeitsarbeit für die Wissenschaften solidarisch zu beteiligen, eine PR-Aktion, die nur ein weiteres Instrument im Kon-

zert anderer Wissenschafts-PR-Aktivitäten sein will – und diese nur unterstützen und jedenfalls nicht verdrängen will. Da es sich erstmals um eine für ganz Österreich geplante PR-Aktion für die Wissenschaften handelt, sind schon jetzt die wichtigsten Medien, allen voran der ORF, informiert und interessiert.

Wir laden Sie und Ihre Institution ein, sich mit einer eigenen Veranstaltung zu beteiligen. Neben Aufführungen, Ausstellungen oder Vorführungen können das auch Vorträge bzw. Vortragsreihen in dieser Woche sein. Auch Neuartiges: Aus Frankreich kommt die Idee des ‘Cafe des Sciences’, des Wissenschafts-Kaffeehauses, wo in einem Kaffeehaus einige Wissenschaftler über Ideen und Erkenntnisse diskutieren. Auch Zusammenarbeit: Besonders bewährt haben sich Kooperationen mit Schulen, Unternehmen oder Lokalen. Auch in ‘Verschränkungen’: Beispiel: Ein Institut wird sich in einem Autosalon präsentieren, wobei das Unternehmen für professionelle, lokale Werbung sorgt – und vielleicht auch ein Fahrzeug für künftige Messungen zur Verfügung stellt.

Ihre erste Anmeldung erfolgt entweder per Internet (Anmeldeformular und bereits angemeldete Veranstalter auf [www.scienceweek.at](http://www.scienceweek.at), auch unter LINKS) oder per e-mail an [office@scienceweek.at](mailto:office@scienceweek.at). Wir benötigen dazu den Namen des Instituts/Unternehmens, der Kontaktperson (mit allen Kontaktdaten), einen Arbeitstitel der Veranstaltung und ev. eine Kurzbeschreibung.

Näheres – und auch Anregungen (Informationen für Veranstalter) – erfahren Sie bei uns und auf unserer Homepage

[www.scienceweek.at](http://www.scienceweek.at).

Fragen beantworten wir gerne auf  
[office@scienceweek.at](mailto:office@scienceweek.at)

oder per Tel. 01 9411241,  
Mobiltel. 06991 9411241.

*Peter Rebernik*

PHAROS International  
Bureau for Cultural Projects

**10**

## Stellenausschreibung

**Karl-Franzens-Universität Graz**

Am Institut für Experimentalphysik der Karl-Franzens-Universität Graz wird die Stelle eines Universitätsassistenten / einer Universitätsassistentin öffentlich ausgeschrieben (Nachfolge Prof. Dr. A. Hohenester). Mit dieser Stelle sind folgende Tätigkeiten verbunden:

Koordination der fachdidaktischen Ausbildung der Lehramtskandidaten/innen für Physik, Lehrtätigkeit im Rahmen der fachdidaktischen Ausbildung sowie administrative Aufgaben des Instituts für Experimentalphysik, insbesondere Öffentlichkeitsarbeit.

Aufnahmebedingung ist ein abgeschlossenes Studium aus Physik. Erwünscht sind ein Doktorat aus Physik sowie fachdidaktische Erfahrung (wissenschaftliche Publikationen, gehaltene Vorlesungen) bei der Ausbildung von Lehramtskandidaten/innen. Ein wissenschaftliches Naheverhältnis zu den Forschungsschwerpunkten des Instituts für Experimentalphysik (Oberflächenphysik, Optik- und Lasertechnik) wird erwartet. Bewerbungen sind bis längstens 15. 3. 2000 an die zentrale Verwaltung - Personalabteilung  
Karl-Franzens-Universität Graz  
Halbärthgasse 8  
8010 Graz  
zu richten.

**11**

## Tagungen

**39. Internationale Universitätswochen für Kern- und Teilchenphysik**

26. Februar - 4. März 2000, Schladming

Organizing Committee 39. IUKT

Institut für Theoretische Physik

Karl-Franzens-Universität Graz

Universitätsplatz 5

A-8010 Graz, Austria  
Tel. +43 (316) 380 5225  
Fax +43 (316) 380 9820  
Telex 311 662  
e-mail: theor.physik@kfunigraz.ac.at

**7th European Particle Accelerator Conference** 26. - 30. Juni 2000

Austria Center Vienna  
Organisation: Meinhard Regler (Susanne Kalina)  
Institut für Hochenergiephysik ÖAW  
Nikolsdorfer Gasse 18  
A-1050 Wien, Austria  
Tel. +43 (1) 544 73 28 42 (41)  
Fax +43 (1) 544 73 28 54  
e-mail: epac@hephy.oeaw.ac.at  
<http://www.cern.ch/epac/Vienna/Welcome.html>

**8th Conference TXRF 2000, Total Reflection X-Ray FLuorescence Analysis and Related Methods**

25. - 29. September 2000  
University of Technology Vienna  
Organizing Committee: H. Aiginger, C. Strel, P. Wobrauschek  
Atominstitut d. Österr. Universitäten  
A-1020 Wien, Stadionallee 2  
Tel. +43 (1) 58801 14101  
Fax +43 (1) 58801 14199  
e-mail: wobi@ati.ac.at

