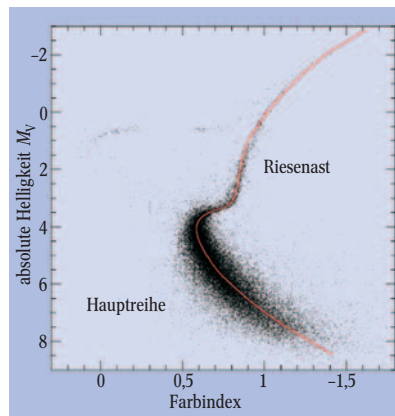
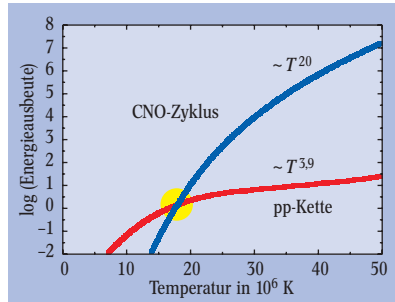


## Revidierte Energieausbeute

*Der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus trägt weniger zur Energieproduktion der Sonne bei als bisher gedacht.*

Die Sonne ist ein gewaltiger Fusionsreaktor, der seine Energie durch die Verschmelzung von vier Protonen zu einem  $^4\text{He}$ -Kern erzeugt und dabei 620 Millionen Tonnen Wasserstoff in der Sekun-

Die Energieerzeugung über den pp- bzw. CNO-Zyklus hängt stark von der zentralen Sterntemperatur ab (oben). Der Übergang vom pp- zum CNO-Zyklus führt zu einem Abknicken der Entwicklungslinie der Hauptreihensterne zum Rote-Riesen-Ast im Hertzsprung-Russell-Diagramm (unten, hier für den Kugelsternhaufen NGC 5904) und ist ein Maß für das Alter des Sternhaufens. (Quelle: EP III, Uni Bochum)



de in seinem Inneren verbrennt. Das Wasserstoffbrennen geschieht hauptsächlich durch die Fusion von Wasserstoff (p) zu Helium ( $^4\text{He}$ ) im sog. pp-Zyklus. Einen geringen Bruchteil zur Energiegewinnung steuert auch der CNO-Zyklus bei, bei dem Kohlenstoff als Katalysator wirkt, aus dem durch wiederholten Protoneneinfang zunächst Stickstoff und Sauerstoff (CNO) entsteht und daraus über einen  $\beta$ - und  $\alpha$ -Zerfall wieder der Kohlenstoff sowie ein Helium-Kern. Einige dieser Reaktionen erzeugen Neutrinos, die auf der Erde gezählt werden können. Dabei gelang es in den letzten Jahren nicht nur, Neutrino-Oszillationen nachzuweisen, sondern auch den totalen Fluss der Sonnen-Neutrinos zu bestimmen. Dieser stimmt mit Vorhersagen der Sonnenmodelle – wie vorher schon detaillierte helioseismologische Messungen – überein und wird als Bestätigung dieser Modelle, aber auch der kernphysikalischen Raten im Sonneninneren angesehen [1].

Wie ein Experiment am Teilchenbeschleuniger LUNA im Gran-Sasso-Untergrundlabor nun gezeigt hat, wurde der Wirkungsquerschnitt der im CNO-Zyklus vorkommenden Reaktion  $^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$  bislang jedoch um einen Faktor zwei zu hoch angenommen – mit wichtigen Konsequenzen für die Astrophysik [2].

Zur experimentellen Bestätigung des Sonnenmodells müssen die berechneten Wirkungsquerschnitte der Kernreaktionen bei der im Sterninneren effektivsten Energie (Gamow-Energie) gemessen werden. Die Gamow-Energie liegt im keV-Bereich und hängt von der Sterntemperatur und den Kernladungen der Reaktionspartner ab. Wegen der Coulomb-Abstoßung der geladenen Fusionspartner sind diese Wirkungsquerschnitte extrem klein. Dies garantiert auf der einen Seite die lange Lebensdauer der Sonne, macht aber auf der anderen Seite die Experimente extrem schwierig und langwierig. Erst vor wenigen Jahren und nur bei den im pp-Zyklus vorkommenden Fusionsreaktionen  $\text{p} + \text{d} \rightarrow ^3\text{He} + \gamma$  sowie  $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + 2\text{p}$  gelang es einer Kollaboration von Wissenschaftlern der Ruhr-Universität Bochum mit italienischen Kollegen, die Wirkungsquerschnitte an der Gamow-Energie direkt am Teilchenbeschleuniger LUNA zu messen. Die Messung bei diesen Energien war nur dank der ca. 2 km dicken Abschirmung von kosmischer Höhenstrahlung durch das Gran-Sasso-Bergmassiv möglich.

Solche direkten Messungen waren bislang bei allen anderen Reaktionen des pp- und CNO-Zyklus nicht möglich, sodass man darauf angewiesen war, die benötigten niedrigen Wirkungsquerschnitte aus Daten zu extrapolieren, die bei höheren Energien gewonnen wurden. Aufgrund der komplexen Kernreaktionsprozesse ist diese Extrapolation oft sehr unsicher. Ein gutes Beispiel dafür ist die langsamste Reaktion des CNO-Zyklus, die  $^{14}\text{N} + \text{p}$ -Fusion in den Compoundkern  $^{15}\text{O}$ , die dessen Effizienz bei der Energiegewinnung bestimmt. Diese Reaktion wurde in den letzten 50 Jahren bei Energien der Fusionspartner zwischen 240 und 3300 keV untersucht. Die Ergebnisse wurden dann zur Gamow-Energie von ca. 26 keV extrapoliert, wobei zwei Komponenten etwa gleichstarke Beiträge lieferten:

Protonen-Einfang in angeregte Zustände im Compoundkern  $^{15}\text{O}$ , die dann kaskadenartig durch  $\gamma$ -Emission zum Grundzustand zerfallen, sowie ein direkter Einfang ( $\gamma$ -Übergang) in den  $^{15}\text{O}$ -Grundzustand. Dieser direkte Einfang hängt sehr stark von einem Zustand knapp unterhalb der  $^{14}\text{N} + \text{p}$ -Schwelle ab. Jüngere Untersuchungen dieses Zustands haben angedeutet, dass sein Einfluss überschätzt wurde. Die LUNA-Kollaboration hat dies nun in einer direkten Messung des Wirkungsquerschnitts bis hinunter zur Energie 80 keV eindrucksvoll bestätigt [2]. Die Extrapolation der LUNA-Messdaten ergibt nun einen  $^{14}\text{N} + \text{p}$ -Wirkungsquerschnitt, der bei der Sonnenenergie um einen Faktor 2 kleiner als bislang angenommen ist. Noch unveröffentlichte und unabhängige Messungen am LENA-Beschleunigerlabor der University of North Carolina bis hinunter zu 140 keV bestätigen eindrucksvoll die LUNA-Resultate.

Diese Ergebnisse haben interessante Konsequenzen nicht nur für das Verständnis unserer Sonne, sondern auch allgemein für das Wasserstoffbrennen in Sternen, und bis hin zu kosmologischen Fragen bezüglich der Galaxienentwicklung im frühen Universum.

Da die Energiegewinnung im CNO-Zyklus proportional zur  $^{14}\text{N} + \text{p}$ -Rate ist, muss dieser Zyklus weniger zur Energieproduktion in der Sonne beitragen als bislang gedacht (nun 0,8 %). Andererseits ist die totale Leuchtkraft der Sonne sehr genau bekannt, sodass diese Reduktion im Sonnenmodell durch eine gesteigerte Energieproduktion im pp-Zyklus kompensiert werden muss. Dies ist zum Beispiel durch eine geringfügige höhere Temperatur im Sonneninneren möglich. Da die Energieerzeugung stark von der Temperatur abhängt und die verschiedenen Kernreaktionen unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten aufweisen, ändern sich auch die Vorhersagen für die Neutrinoflüsse im Sonnenmodell. Die Reduktion der  $^{14}\text{N} + \text{p}$ -Fusionsrate impliziert schließlich, dass die Modelle für die Sonnen-Neutrino-Detektoren aus Chlor und Gallium einen um etwa 3 % kleineren Fluss vorhersagen [3].<sup>1)</sup>

Die Temperaturabhängigkeit der Energieausbeute im pp-Zyklus (gegeben durch die der langsamsten Reaktion p+p) ist deutlich geringer ( $\sim T^{3,9}$ ) als die des CNO-Zyklus

1) Allerdings führen verbesserte Analysen der chemischen Zusammensetzung der Sonnenoberfläche in den neuesten Sonnenmodellen zu gleich wichtigen Revisionen der Neutrino-flüsse [3].

( $\sim T^{20}$ ), die durch die  $^{14}\text{N}+\text{p}$ -Reaktion gegeben wird (Abb., oben). Der CNO-Zyklus dominiert also über die pp-Ketten, falls die Temperatur nur geringfügig höher ist als im jetzigen Sonneninneren ( $T \sim 15,72 \cdot 10^6 \text{ K}$ ). Dies ist zum Beispiel in Sternen der Fall, die etwas massereicher als die Sonne sind, und wird auch in der späteren Entwicklung der Sonne gelten, wenn der Wasserstoffvorrat im Sonneninneren zu Ende geht. Dann wird die Energieausbeute aus dem Wasserstoffbrennen für die Energiebalance der Sonne nicht mehr ausreichen und das Sonneninnere wird sich gravitativ zusammenziehen, um die Energiegewinnung durch eine höhere Temperatur zu steigern. Das Wasserstoffbrennen geht dann vom pp-Zyklus zum CNO-Zyklus über. Im Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sternentwicklung ist das durch einen markanten Abknickpunkt gekennzeichnet, an dem der Stern die Hauptreihe verlässt und in den „Roten-Riesen-Ast“ übergeht (Abb., unten). Die Leuchtstärke an diesem Punkt hat sich als ein guter Indikator für die Altersbestimmung erwiesen und wurde zum Beispiel benutzt, um das Alter von Kugelsternhaufen, den ältesten Objekten in unserer Galaxie, zu bestimmen. Durch die replizierte  $^{14}\text{N}+\text{p}$ -Rate steigt das implizierte Alter dieser Kugelsternhaufen nun von ca. 13 Milliarden Jahren um etwa 0,7 bis 1 Milliarde Jahre [4, 5], da der CNO-Zyklus erst etwas später in der Sternentwicklung über den pp-Zyklus dominiert. Bei bekannter Leuchtstärke und Entfernung von Kugelsternhaufen ist das aus dem Abknickpunkt deduzierte Alter also nun größer als vorher angenommen. Da dies eine untere Schranke für das Alter unserer Milchstraße und des Universums darstellt, hat die verbesserte Altersbestimmung der Kugelsternhaufen interessante Konsequenzen für die Kosmologie und verstärkt die Notwendigkeit einer positiven kosmologischen Konstanten [4].

KARLHEINZ LANGANKE UND  
MICHAEL WIESCHER

- [1] T. Kirsten, Phys. Bl. September 2001, S. 23
- [2] A. Formicola et al., (LUNA), Phys. Lett. B **591**, 61 (2004)
- [3] J. N. Bahcall und M. H. Pinsonneault, PRL **92** (2004) 121301
- [4] G. Imbriani et al., Astron. & Astrophys. **420**, 625 (2004)
- [5] S. Degl'Innocenti et al., Phys. Lett. B **590**, 13 (2004)

## Der Beugung ein Schnippen schlagen

**Experimente mit verschränkten Photonen und Ionen zeigen den Weg zu verbesserter Auflösung unterhalb des Beugungslimits**

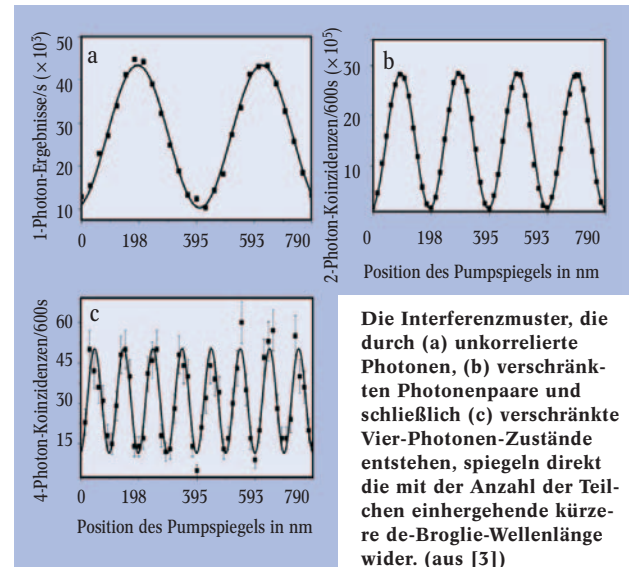
Verschränkung und Superposition bilden die Grundlage für eine Vielzahl faszinierender Effekte in der Quantenwelt, die uns in der klassischen Physik verborgen bleiben. Neben der Quanteninformation kann auch die Metrologie diese neuen Phänomene nutzen. So lässt sich bei Messungen mit verschränkten Vielteilchensystemen die Auflösungsgrenze deutlich senken und in der Präzisionspektroskopie das Signal/Rauschverhältnis wesentlich verbessern. Drei vor kurzem durchgeführte Experimente mit verschränkten Ionen [1] und Photonen [2, 3] demonstrieren dies in beeindruckender Weise.

Besonders deutlich werden die Vorteile von verschränkten Zuständen bei interferometrischen Messungen, bei denen zum Beispiel eine Positionsänderung oder eine Frequenzdifferenz durch die Messung einer Phase bestimmt wird. Jede Messung ist mit einer bestimmten Unsicherheit behaftet. Wiederholen wir die Messung  $N$ -mal oder führen sie gleich mit  $N$  unabhängigen Teilchen durch, so sinkt diese Unschärfe (Varianz) der beobachteten Phase um einen Faktor  $1/\sqrt{N}$ . Diesen Fall erhält man, wenn sich  $N$  Teilchen, z. B. Photonen, in einem Mach-Zehnder-Interferometer unabhängig voneinander in einer Superposition auf den Wegen A und B ausbreiten.

Gelingt es hingegen, diese  $N$  Photonen in einem verschränkten Zustand zu präparieren, in dem die Photonen entweder alle im Weg A oder alle im Weg B gefunden werden, so beobachtet man den  $N$ -fachen Phasenschub. Vereinfachend lässt sich das Verhalten dieser  $N$  verschränkten Teilchen mit einem „Molekül“ aus eben diesen  $N$  Teilchen vergleichen. Da die Phasendifferenz in einem Interferometer auch von der Wellenlänge der interferierenden Teilchen abhängt, verwendet man oft das Bild der um den Faktor  $1/N$  verkürzten de Broglie-Wellenlänge. Aufgrund der  $N$ -fachen Verstärkung der Phasenänderung ist die Unschärfe um  $1/N$  kleiner verglichen mit der Messung an einem einzelnen Teilchen, bzw. um den Faktor  $1/\sqrt{N}$  ver-

glichen mit einer Messung an gleich vielen, unkorrelierten Teilchen.

Erste Experimente mit zwei verschränkten Photonen oder Ionen zeigten bereits die verbesserte Auflösung [4]. Die beobachtete Verbesserung der Messunschärfe hängt allerdings stark von der Qualität der Zustandspräparierung ab. Für sinkenden Verschränkungsgrad steigt die beobachtete Unschärfe



Die Interferenzmuster, die durch (a) unkorrelierte Photonen, (b) verschränkten Photonenpaare und schließlich (c) verschränkte Vier-Photonen-Zustände entstehen, spiegeln direkt die mit der Anzahl der Teilchen einhergehende kürzere de-Broglie-Wellenlänge wider. (aus [3])

sehr schnell auf die Schrotrauschgrenze an [5].

Zur Erzeugung von verschränkten Photonenpaaren mit Wellenlänge  $\lambda$  benötigt man obendrein einen Laser mit der halben Wellenlänge  $\lambda/2$ . Und damit erhält man natürlich die gleiche Auflösung wie mit dem verschränkten Photonenpaar. Daher war es das erklärte Ziel einiger Arbeitsgruppen, Experimente mit mehr als zwei Teilchen durchzuführen und so das Beugungslimit zu durchbrechen.

Durch konsequente Weiterentwicklung der experimentellen Methoden gelang es nun Mitchel et al. [2] sowie Walther et al. [3], die verkürzte de-Broglie-Wellenlänge von verschränkten Drei- bzw. Vier-Photonen-Zuständen zu demonstrieren. Im Drei-Photonen-Experiment wurde die Verschränkung in der Polarisation erzielt [2]. Die drei Photonen, die sich im gleichen Strahl ausbreiten, hatten entweder alle horizontale oder vertikale lineare Polarisation, und ein Quarzplättchen erzeugte daher den dreifachen Phasenschub als es seiner Doppelbrechung bei der tatsächlichen Wellenlänge der Photonen von 810 nm entspricht. Das Vier-Photonen-Experiment der Wiener Gruppe erzeugt mittels gepulster parametrischer „down

Prof. Dr. Karlheinz Langanke, Institute of Physics and Astronomy, University of Aarhus, Ny Munkegade, 8000 Aarhus C, Dänemark; Prof. Dr. Michael Wiescher, Dept. of Physics, University of Notre Dame, USA