

■ Knick in der Gammaoptik

Ein bislang vernachlässigter Effekt liefert unerwartet hohe Brechkraft bei Gammastrahlen.

In optischen Geräten sind refraktive Linsen für sichtbares Licht allgegenwärtig. Für harte elektromagnetische Strahlung im Röntgen- und Gammabereich gibt es jedoch keine vergleichbaren Linsen, da diese Strahlung in Materie kaum gebrochen wird und das mit zunehmender Energie immer schwächer. Daher schien es bis vor kurzem aussichtslos, Gammastrahlen mit Hilfe von brechenden Optiken abzulenken oder zu fokussieren. Kürzlich hat aber Dietrich Habs gemeinsam mit Kollegen in Garching und Grenoble gezeigt, dass die Brechung von Gammastrahlen in Silizium sehr viel höher ist als erwartet und dass sie auf der bisher in diesem Zusammenhang vernachlässigten Delbrück-Streuung beruht [1]. Das ist die Streuung von Gammaphotonen an virtuellen Elektron-Positron-Paaren, die durch Vakuumpolarisation im starken Coulomb-Feld eines Atomkerns entstehen [1, 2]. Damit sind erstmals eine Vielzahl von neuartigen Experimenten an modernen Gammaquellen denkbar.

Bereits Wilhelm Conrad Röntgen versuchte, seine X-Strahlen an optischen Elementen wie Prismen und Linsen zu brechen [3]. Da ihm dies nicht gelang, kam er zu dem Schluss, „dass man mit Linsen die X-Strahlen nicht concentriren kann“ [3]. Die sehr schwache Bre-

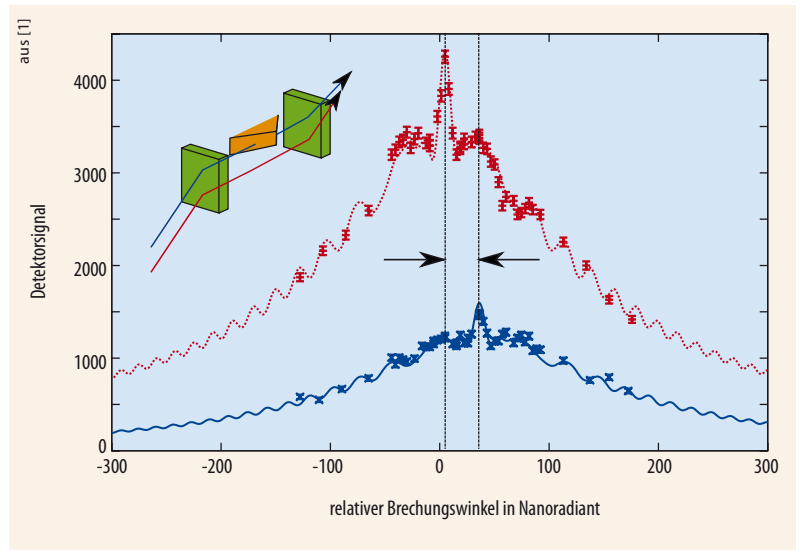


Abb. 1 Wird Gammastrahlung durch ein Doppelkristallspektrometer geleitet, so ist die Transmission am höchsten bei einer relativen Winkellage der Kristalle von null, d. h. parallelen Kristallen (rot).

Ein Siliziumkeil (orange) im Strahlengang verschiebt das Maximum der Transmission um einen kleinen Winkel, der der Brechung im Silizium proportional ist (blau).

chung von Röntgen- und Gammastrahlung in Materie lässt sich zweckmäßig durch den Brechungsindex in der Form $n = 1 - \delta + i\beta$ beschreiben. Die kleine Größe $\delta > 0$ beschreibt dabei die Refraktion, der Imaginärteil β die Abschwächung der Strahlung in Materie.

Verantwortlich für die Brechung von Röntgenstrahlung in Materie ist die elastische Streuung der Photonen an den Elektronen der Atomhülle (virtueller Photoeffekt). Da die Frequenz der Röntgenstrahlung ($\nu \approx 10^{18}$ Hz) weit oberhalb der

Resonanzfrequenzen der meisten Elektronen in den Atomen liegt, ist die Streuamplitude sehr klein ($\propto 1/\nu^2$) und das gestreute Licht um ca. 180° phasenverschoben. Letzteres bewirkt $\text{Re}(n) < 1$, sodass die Röntgenstrahlung beim Eintritt in Materie vom Lot weggebrochen wird.

Die sehr schwache Brechung erschwert es erheblich, refraktive Röntgenoptiken herzustellen. Um dies zu kompensieren, bestehen refraktive Röntgenlinsen meist aus einem Stapel von N bikonkaven Einzellinsen [4]. Die Brennweite eines solchen Linsenstapels beträgt $f = R/(2N\delta)$, wobei R der Krümmungsradius einer einzelnen Linsenfläche ist. Da δ mit steigender Photonenenergie stark abnimmt ($\propto 1/E^2$), muss die Zahl N der Einzellinsen quadratisch mit der Energie zunehmen, um die Brennweite konstant zu halten. So sind für Röntgenenergien von 100 keV bereits hunderte von Linsen nötig, um eine Brennweite von einigen Metern zu erhalten. Für Energien zwischen 5 und 250 keV kommen solche Röntgenlinsen heute routinemäßig zum Einsatz [4, 5]. Da im Gammabereich um 1 MeV zigttausende Linsen nötig wären, galt die

KURZGEFASST

■ Kryptons Ursprung aufgespürt

Krypton (Kr) und Xenon (Xe) gehören zu den seltensten chemischen Elementen auf der Erde. Man nimmt an, dass sie jeweils zur Hälfte bei Supernova-Explosionen massereicher Sterne und in Sternen mittlerer Masse wie unserer Sonne entstanden. Nun ist es Astrophysikern der Universität Tübingen und der NASA gelungen, mit Hilfe des NASA-Weltraumteleskops FUSE Krypton und Xenon in einem weißen Zwerg im ultravioletten Bereich spektroskopisch nachzuweisen. Dies ist der erste direkte Beleg dafür, dass die beiden Elemente tatsächlich in Sternen erzeugt werden.

K. Werner et al., *ApJ* 753 L7 (2012)

■ Molekulare Haftkraft messen

Jülicher Physiker haben mit einem Rasterkraftmikroskop erstmals direkt die Haftkraft einzelner Moleküle an Oberflächen gemessen. Die Forscher vom Peter-Grünberg-Institut nutzen dafür u. a. aus, dass die verschiedenen Bindungskräfte unterschiedlich schnell mit der Distanz von der Oberfläche abfallen und schließlich nur noch die Van-der-Waals-Kraft übrig bleibt. Bei einem einzelnen PTCDA-Molekül (Perylenc-tracarbonsäuredianhydrid) wurde eine Bindungsenergie an eine Gold-Oberfläche von rund 2,5 eV gemessen und nicht wie vorhergesagt 2,0 eV.

Ch. Wagner et al., *Phys. Rev. Lett.* 109, 076102 (2012)

Fokussierbarkeit von Gammastrahlen bisher als nicht möglich.

Dietrich Habs und Kollegen haben nun gezeigt, dass die Delbrück-Streuung einen wesentlichen Beitrag zur Brechung von Gammastrahlung leistet [1]. Als Gammaquelle dienten die Gammalinien der Isotope ^{158}Gd (182 keV) und ^{36}Cl (512 keV, 786 keV, 1165 keV und 1951 keV), die an der Neutronenquelle des Institut Laue-Langevin in Grenoble hergestellt wurden. Nach Kollimation wurden die Gammastrahlen durch ein Doppelkristallspektrometer geleitet, wahlweise durch einen Siliziumkeil oder daran vorbei, und anschließend mit Hilfe eines energiedispersiven Germaniumdetektors registriert (Abb. 1). Bei 182 und 512 keV wurde eine negative, für alle höheren Energien jedoch eine positive Winkelabweichung gemessen, d. h. δ wechselt das Vorzeichen und wird negativ.

Bei niedrigen Energien dominiert der Beitrag δ_{photo} des virtuellen Photoeffekts. Oberhalb einer gewissen Energie drehen sich jedoch die Verhältnisse um, und der Beitrag $|\delta_{\text{pair}}|$ aufgrund der Streuung an virtuellen Elektron-Positron-Paaren übersteigt $|\delta_{\text{photo}}|$ um rund eine Größenordnung für Silizium. Das umgekehrte Vorzeichen von δ_{pair} erklärt sich aus der starken Zunahme des Wirkungsquerschnitts für die Paarbildung mit zunehmender Energie.

Der Wirkungsquerschnitt des Delbrück-Effekts skaliert stark mit der Kernladungszahl Z ($\propto Z^4$ [2]), sodass auch die Brechung mit wachsendem Z stark zunimmt [1]. Habs und Kollegen erwarten daher eine um Größenordnungen erhöhte Brechung von Gammastrahlung für schwerere Elemente. Dies soll in Kürze mit refraktiven Gammalinsen aus Gold nachgewiesen werden. Sollte sich diese Vermutung bewahrheiten, sind viele optische Elemente für Gammastrahlung denkbar. Dazu gehören neben fokussierenden Linsen und Prismen für die Ablenkung von Gammastrahlen

auch zumindest kurze Spiegel und Wellenleiter auf Basis innerer Totalreflexion. In Kombination mit Kristalloptiken wären auch effiziente γ -Monochromatoren möglich. Dies eröffnet viele neue Anwendungsfelder, von der Mikroskopie mit kernspektroskopischem Kontrast (z. B. Abbildung des Transports von ^7Li in Batterien), über die Herstellung neuer medizinischer Radioisotope bis hin zur nuklearen Photonik.

Christian G. Schroer

- [1] D. Habs, M. M. Günther, M. Jentschel, und W. Urban, Phys. Rev. Lett. **108**, 184802 (2012)
- [2] M. Schumacher, Radiat. Phys. Chem. **56**, 101 (1999)
- [3] W. C. Röntgen, Sitzungsberichte der physikal.-medizin. Gesellschaft, S. 132, (1895)
- [4] C. G. Schroer und B. Lengeler, in Handbook of Lasers and Optics, 2. Ausgabe, hrsg. von F. Träger, Springer, Berlin, (2012), Kap. 22, S. 1461
- [5] V. Nazmov et al., Microsys. Technol. **11**, 292 (2005)

Prof. Dr. Christian Schroer, Institut für Strukturphysik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden