

## ■ Der doppelte Compton sieht rot

Beim nichtlinearen Compton-Effekt deuten sich neuartige Energietransfer-Mechanismen an.

Die meisten Physikstudenten kennen den Compton-Effekt als eines der grundlegenden Experimente aus der Frühphase der Quantenmechanik. In seinen bahnbrechenden Arbeiten aus den 1920er-Jahren beschrieb Arthur H. Compton mögliche Konsequenzen aus der Teilchennatur des Lichts theoretisch [1]. Die experimentelle Bestätigung seiner Rechnungen gelang ihm, indem er zeigte, dass Röntgenphotonen mit einer Energie von  $\hbar\omega_0$  Impuls auf gebundene Elektronen übertragen und dabei Energie verlieren [2]. Das gestreute Photon erfährt einen Energieverlust, der vom Winkel  $\theta$  der Streuung abhängt. Die Energie nach der Rotverschiebung beträgt demnach  $\hbar\omega_1(\theta) \leq \hbar\omega_0$ . Comptons Ansatz bei der Berechnung kommt einer semiklassischen Näherung nahe – die vollständige quantenelektrodynamische Analyse dieser inelastischen Photonenstreuung folgte schon wenig später [3].

In diese Theorie des Compton-Effekts gehen zwei grundlegende Annahmen ein. Einerseits soll jeweils nur ein Photon mit einem Elektron wechselwirken (linearer Effekt). Andererseits soll die Bindungsenergie des Elektrons an den Atomkern im Vergleich zur Energie des Photons  $\hbar\omega_0$  vernachlässigbar sein. Während es oft und erfolgreich gelang, die Theorie des linearen Effekts zu testen, ermöglichen es erst die technologischen Fortschritte der letzten Jahre, den nichtlinearen Compton-Effekt zu untersuchen, bei dem mehrere Photonen gleichzeitig an einem Elektron streuen. Erste Experimente unterstützten erfolgreich die Annahme, dass die Elektronen auch dann wie quasi-freie Teilchen agieren [4, 5].

Das aktuelle Experiment eines Forscherteams um Matthias Fuchs vom SLAC-Labor in Kalifornien stellt dies nun infrage [6]. Das Team experimentierte an der dortigen Linac Coherent Light Source (LCLS), einem von weltweit nur zwei Freie-Elektronen-Lasern mit



Photonen treffen auf Atome, die in einem Festkörper gebunden sind. Durch inelastische Streuung regen die Pho-

tonen die Elektronen der Atome an und verlieren dabei Energie – ihre Wellenlänge ist danach größer (Compton-Effekt).

Röntgenphotonen (XFEL). Der hochintensive, monochromatische Röntgenstrahl fokussiert etwa eine Billion Photonen auf einen 100 nm großen Punkt. Die Intensität ist so hoch, als wäre die gesamte, auf die Erde einfallende Sonnenstrahlung in einem Punkt gebündelt, dessen Durchmesser in etwa dem eines menschlichen Haares entspricht. Bei dieser immensen Photondichte absorbieren einige Elektronen gleichzeitig zwei Photonen. Anschließend emittieren sie ein einzelnes, höherenergetisches Photon – ein nichtlineares Phänomen, das als doppelter Compton-Effekt bezeichnet wird.

Wenn die Bindungsenergie der Elektronen zu vernachlässigen ist, müsste das emittierte Photon eine Energie besitzen, die etwa dem Doppelten der Energie der absorbierten Röntgenphotonen entspricht [7]. Fuchs und Kollegen fanden eine wesentlich geringere Energie als angenommen. Die gängige Theorie mit freien Elektronen kann diese unerwartet hohe Rotverschiebung der gestreuten Röntgenphotonen nicht erklären.

Die Forscher bestimmten die Winkelverteilung gestreuter Photonen mit speziellen Detektorarrays [8]. Dabei kategorisierten sie die

Photonen nur nach niedriger und hoher Energie. Zu Photonen mit niedriger Energie zählten sie solche, die eine Energie von  $\hbar\omega_1 \approx 9$  keV, also nahe der XFEL-Grundmode, besaßen. Diese Photonen resultieren aus linearer Compton-Streuung. Als hohe Streuenergien stuften sie Energien um  $\hbar\omega_1 \approx 18$  keV ein, die bei der doppelten Compton-Streuung auftreten. Diese hochenergetischen Photonen waren das gesuchte Messsignal.

Der XFEL-Strahl streute an zwei dünnen Beryllium-Kristallen. Der erste Kristall war im Fokus des Lasers platziert, um bei der höchsten Röntgenintensität nichtlineare Effekte nachzuweisen. Der zweite Kristall befand sich weit hinter dem Fokus und diente bei geringerer Röntgenintensität dazu, den Signaluntergrund hochenergetischer Photonen zu messen. Damit gelang es, zwei Eigenschaften eines nichtlinearen Signals nachzuweisen: Einerseits verteilte sich die Intensität bezogen auf den Streuwinkel anders als bei einem Dipol. Andererseits hing die Signalstärke quadratisch von der Pulsenergie des XFEL ab.

Die größte Herausforderung des aktuellen Experiments war es, zwei Untergrundeffekte zu kontrollieren. Zum einen erzeugt der XFEL selbst

Photonen mit der doppelten Energie der Grundmode. Diese zweite Harmonische kommt zwar nur mit etwa 0,1% Wahrscheinlichkeit vor, ist aber nicht vernachlässigbar. Zum anderen unterscheiden die Detektoren nicht zwischen einem einzelnen Photon hoher Energie und zwei fast gleichzeitig ankommenden Photonen, die in Summe die gleiche Energie besitzen, sog. koinzidente Ereignisse. Die Messungen mit dem zweiten Kristall bei niedrigen Intensitäten testeten den Anteil linearer Compton-Streuung an der zweiten Harmonischen des XFEL. Um die Zählung koinzidenter Ereignisse zu vermeiden, reduzierten die Forscher die Zahl hochenergetischer Photonen auf den Detektoren signifikant, indem sie davor Zirkonium-Filter platzierten. Dieses Material absorbiert Photonen oberhalb einer Energie von ungefähr 18 keV sehr stark, da diese Energie gerade ausreicht, um Elektronen aus der niedrigsten Schale zu ionisieren (sog. K-Kante).

Die Energieselektivität der Filter führte zu einem überraschenden Ergebnis. Bei einer XFEL-Photonenenergie von  $\hbar\omega_0 = 9,75$  keV sollten die gestreuten Photonen des doppelten Compton-Effekts Energien von etwa  $\hbar\omega_1 = 19,5$  keV besitzen. Die Rotverschiebung sollte etwa 700 eV betragen, sodass die Zirkonium-Filter zu einer deutlich verringerten Intensität führen sollten. Das Signal ist aber unerwartet stark, sodass von einer Rotverschiebung größer als 1,5 keV

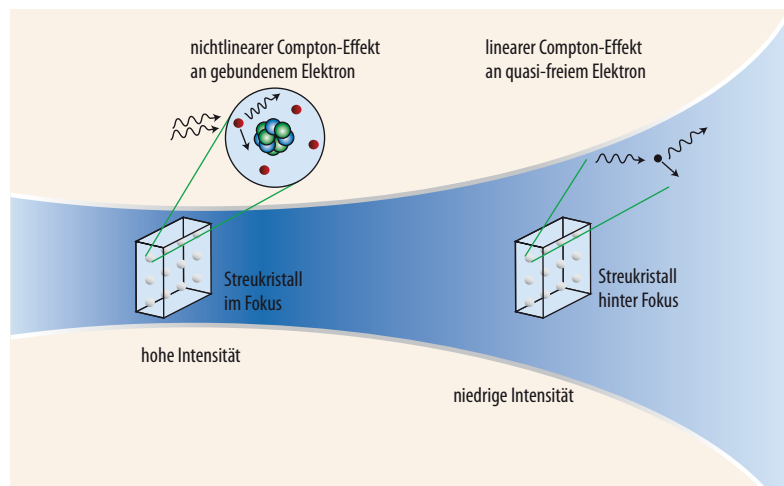


Abb. 1 Am ersten Streutarget im Fokus des Lasers ist die Intensität so hoch, dass der nichtlineare Compton-Effekt auftritt.

Die geringere Intensität am zweiten Streutarget erlaubt nur lineare Compton-Streuung an quasi-freien Elektronen.

auszugehen ist, welche die Energie  $\hbar\omega_1$  in den Bereich unterhalb der maximalen Absorption verschiebt.

Doch wohin verschwindet die fehlende Photonenenergie? Offensichtlich gibt es einen bisher unbekannt Mechanismus, der im nichtlinearen Bereich einen großen Energie- und Impulsübertrag auf die Elektronen oder die Atome selbst erlaubt. Vielleicht streuen die Photonen bevorzugt an Elektronen, die einen großen Impuls auf den Atomkern übertragen. Oder während der Streuung werden höhere Zustände der Elektronenschale angeregt. Außerdem ist denkbar, dass der Energieübertrag von atomaren Bindungseigenschaften abhängt. Dies eröffnet faszinierende neue Möglichkeiten, z. B. Kristallographie mit chemischer Strukturanalyse zu verbinden. Zuvor ist es nötig,

den beobachteten Absorptionsmechanismus grundlegend zu verstehen. In jedem Fall erlaubt es der neu entdeckte nichtlineare Energietransfer, die Wechselwirkung intensiver Röntgenstrahlen mit Materie im Detail besser zu verstehen.

Felix Mackenroth

- [1] A. H. Compton, Phys. Rev. **21**, 483 (1923)
- [2] A. H. Compton, Phys. Rev. **22**, 409 (1923)
- [3] O. Klein und Y. Nishina, Z. Phys. **52**, 853 (1929)
- [4] S. Shwartz et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 163901 (2014)
- [5] T. E. Glover et al., Nature **488**, 603 (2012)
- [6] M. Fuchs et al. Nature Phys. **11**, 964 (2015)
- [7] L. S. Brown und T. W. B. Kibble, Phys. Rev. **133**, A705 (1964)
- [8] S. Herrmann et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **718**, 550 (2013)

## ■ Kuppeln mit Kolloiden

Auf mikroskopischer Skala ist es gelungen, eine Kupplung aus Kolloidteilchen aufzubauen.

**K**uppelungen sind wesentlicher Bestandteil vieler Maschinen. Sie sind immer dann erforderlich, wenn die Übertragung von Kräften und Drehmomenten zwischen einem Motor und einem Getriebe kurzzeitig unterbrochen wird, wie es während eines Gangwechsels beim Autofahren der Fall ist. Der Trend zur Miniaturisierung hat neben der Elektronik längst

auch mechanische Komponenten erreicht: Neben Getrieben und Rotoren [1] ist mittlerweile der Bau kompletter Wärmekraftmaschinen [2] auf kleinsten Längenskalen möglich. Daher versuchen Wissenschaftler, das Prinzip der Kupplung in die Mikro- und Nanowelt zu übertragen. Auf diesen Skalen sind thermische Fluktuationen nicht mehr vernachlässigbar, was

uns herausfordert, die physikalischen Grundlagen solcher Maschinen neu zu verstehen. Häufige Anwendung finden Materialien aus dem Bereich der weichen Materie (DNA, Polymere, Kolloidteilchen), da sie sich mit Hilfe kleiner externer Felder oder durch Selbstorganisation zu hochkomplexen Funktionseinheiten organisieren lassen.