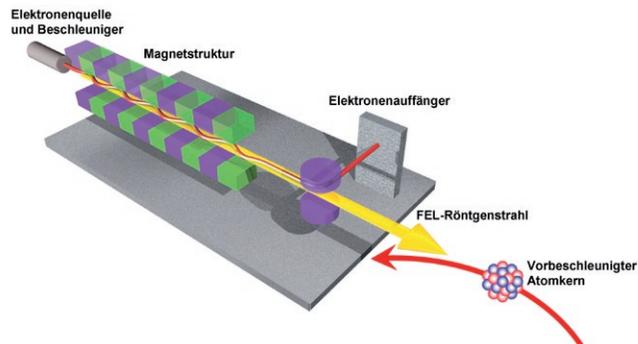


Das Myon ist ein dem Elektron ähnliches Teilchen, besitzt aber eine gut 200fach höhere Masse. Für ein myonisches Atom im Laserfeld ist daher die Drift durch den Lichtdruck stark unterdrückt. Zudem bewegt sich das Myon in deutlich größerer Nähe zum Kern als das leichtere Elektron, so dass es quasi als Sonde für Eigenschaften des Atomkerns genutzt werden kann. Erste Modellrechnungen zeigen, dass der verschiedene Kernradius des Wasserstoffs im Vergleich zu Deuterium („schwerer Wasserstoff“) eine unterschiedliche Ausbeute höherer Harmonischer der Laserfrequenz zur Folge hat. Somit könnte die Beobachtung dieser Strahlung über Kerneigenschaften Aufschluss geben.



Auf dem Weg zur nuklearen Quantenoptik

Zukünftige Quellen für superintensive Röntgen-Laserstrahlen wie der Freie-Elektronen-Laser XFEL am DESY werden eine direkte Wechselwirkung des Röntgenlichts mit vorbebeschleunigten Atomkernen ermöglichen. Erste theoretische Studien hierzu ergaben, dass durch eine solche resonante Anregung des Kerns dessen Eigenschaften (Schalenstruktur, Ladungsverteilung) auf optischem Wege vermessen werden können. Die Quantenoptik, welche in der Atomphysik eine inzwischen äußerst erfolgreiche Methode für Präparation, Kontrolle und Nachweis darstellt, könnte damit auf die Kernphysik übertragen werden und so das neue Feld der nuklearen Quantenoptik erschließen. Neue Rechnungen zeigen, dass Multiphoton-Myon-Paarzeugung in Kollisionen relativistischer nackter Schwerionen mit Röntgen-Laserstrahlen ebenfalls einen Zugang zu Kerneigenschaften erlaubt.



Schematische Darstellung eines Freie-Elektronen-Lasers (links, Quelle: DESY). Der Röntgenlaserstrahl (gelb) trifft auf einen beschleunigten Atomkern (rechts).

Max-Planck-Institut für Kernphysik

Hausanschrift:
Saupfercheckweg 1
69117 Heidelberg

Postanschrift:
Postfach 103980
69029 Heidelberg

Tel: 06221 5160
Fax: 06221 516601

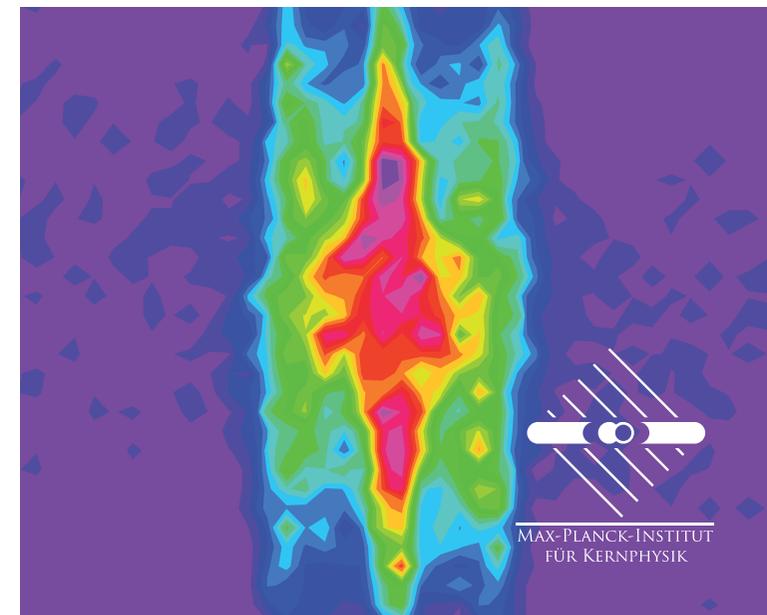
E-Mail: info@mpi-hd.mpg.de
Internet: <http://www.mpi-hd.mpg.de>

Ansprechpartner:
Prof. Dr. Christoph H. Keitel
Tel: 06221 516150
E-Mail: christoph.keitel@mpi-hd.mpg.de



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Lasermodifizierte Quantenelektrodynamik, Kern- und Hochenergie- prozesse



Lasermodifizierte Quantenelektrodynamik, Kern- und Hochenergieprozesse

Die Struktur des Vakuums wird im Rahmen der Quantenelektrodynamik beschrieben. Quantenelektrodynamische Effekte unter dem Einfluss eines sehr starken Laserfeldes bewirken die Kopplung von Photonen an Vakuumfluktuationen. Kollisionsprozesse geladener Teilchen in starken Laserfeldern können zur Erzeugung neuer Teilchen und zur Untersuchung und Steuerung von Kerneigenschaften genutzt werden. Die direkte Wechselwirkung intensiver Laserstrahlen im Röntgenbereich mit Atomkernen erschließt das neue Gebiet der nuklearen Quantenoptik.

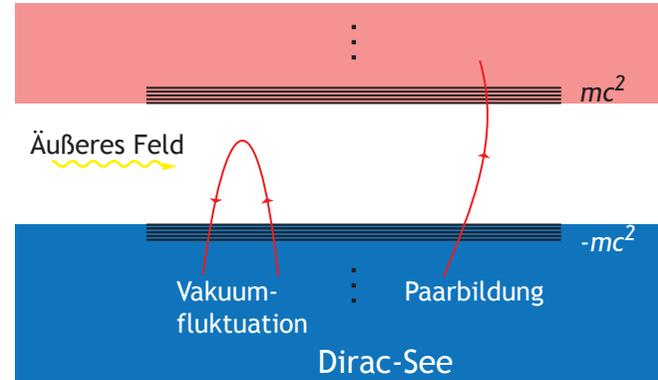
Quantenelektrodynamik in starken Feldern

Die Quantenelektrodynamik erlaubt die Berechnung der inneren Struktur der Materie (z. B. von hochgeladenen Ionen) mit sehr hoher Genauigkeit. Die Resultate werden mit Präzisionsexperimenten in Ionenfallen am MPIK und in den Speicherringen des MPIK und der GSI überprüft. Dies eröffnet neue Methoden zur Messung von Kerneigenschaften. Die in einem metastabilen Atomkern eines hochgeladenen Ions gespeicherte Energie kann beim Einfang eines Elektrons wie aus einer extrem energiereichen Batterie freigesetzt werden. Hochpräzise Berechnungen gebundener Zustände bilden die Grundlage zur Bestimmung von Naturkonstanten mit einer relativen Genauigkeit von 10^{-14} . Eine wichtige Rolle spielen dabei die starken elektromagnetischen Felder innerhalb der betrachteten Systeme.



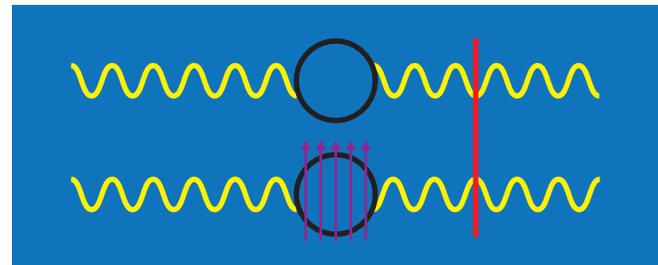
Feynman-Graphen für laserassistierte Bremsstrahlung. Die Zickzacklinie steht für das in das Laserfeld eingebettete Elektron, die gebrochene Linie für die Wechselwirkung mit dem Kern und die Wellenlinie für das emittierte Röntgenquant.

Von ebenso großem Interesse ist auch die Überlagerung sehr starker äußerer Felder mit intensiven Laserstrahlen. Dabei wird die Struktur des Vakuums modifiziert, und mittels der Quantenelektrodynamik kann untersucht werden, wie sich dies auf bestimmte Prozesse auswirkt. Wird ein schnelles Elektron an einem Atomkern gestreut, so kann es seine Energie in Form von Röntgenstrahlung abgeben („Bremsstrahlung“). Eingebettet in ein sehr starkes Laserfeld bekommt das Elektron neue Eigenschaften, die eine exakte Berechnung der Kopplung an das Feld erfordern.



Der Dirac-See beschreibt das Vakuum als einen unendlichen See von Teilchen mit negativer Energie, wobei alle Zustände besetzt sind. Dagegen sind alle Zustände positiver Energie leer. Unter dem Einfluss eines äußeren Feldes kann aus einem virtuellen Teilchen-Antiteilchen-Paar (Vakuumfluktuation) ein reales Teilchenpaar gebildet werden.

In einer weiteren Studie wurde die Verschmelzung zahlreicher Laserphotonen zu wenigen extrem energetischen Photonen bei der Kollision hochenergetischer Protonen mit einem intensiven Laserstrahl mittels vollständiger Rechnungen un-

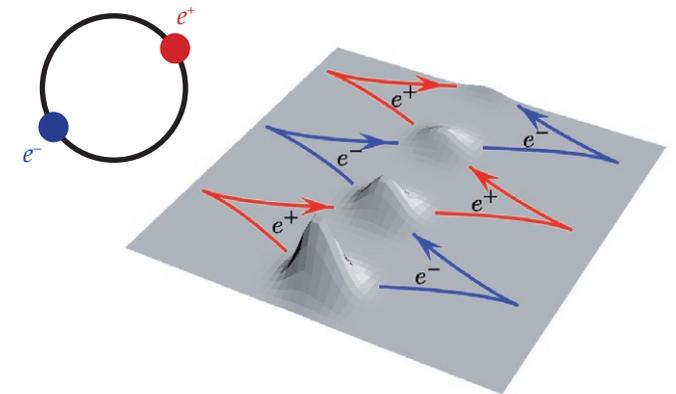


Der Brechungsindex des Vakuums wird in Gegenwart einer starken stehenden Welle verändert (unten); dies führt zu einer Phasenverschiebung des abtastenden Röntgenlaserstrahls.

tersucht, wobei die Polarisation des Vakuums (Verschiebung virtueller geladener Teilchen gegeneinander) eine wesentliche Rolle spielt. Letztere führt auch zu einer Änderung des optischen Brechungsindex des Vakuums, wodurch zum Beispiel anfänglich linear polarisiertes Röntgenlicht elliptisch polarisiert und gedreht wird. Eine quantitative Abschätzung zeigt, dass derartige Vakuumeffekte experimentell realisierbar sind.

Atomare „Collider“

Ein durch Feldionisation in einem intensiven Laserfeld aus einem Atom gelöstes Elektron wird durch das Laserfeld zunächst vom Atom weg- und dann aber wieder zurückgetrieben. Diese Rekollision kann eine Mehrfachionisation des Atoms bewirken und höhere Harmonische der Laserfrequenz erzeugen. Bei sehr hohen Laserintensitäten erreicht das Elektron sogar relativistische Geschwindigkeiten, wird aber durch den „Lichtdruck“ vom Atom weggetrieben, was die Rekollision verhindert. Dieser Effekt kann für bestimmte „exotische“ Atome umgangen werden. Positronium besteht aus einem Elektron und einem Positron, seinem (positiv geladenen) Antiteilchen. Durch die identische Driftbewegung kommt es zu wiederholten hochenergetischen Rekollisionen: Das System stellt einen Miniatur-Collider dar, der es erlaubt, aus der Stoßenergie neue Teilchen zu erzeugen. Die Abbildung auf der Titelseite zeigt die Dichteverteilung der Teilchen im Moment der Rekollision, für welche die Paarerzeugung von Myonen theoretisch vorhergesagt wurde.



Positronium in einem sehr intensiven Laserfeld. Elektron und Positron erfahren aufgrund ihrer identischen Massen die gleiche Driftbewegung in Ausbreitungsrichtung, so dass mehrfache Rekollision der Wellenpakete erfolgen kann.