

Kristalliner Ionenstrahl im Mini-Speicherring

Phasenübergänge von Materie bei tiefen Temperaturen sind in der Physik allgegenwärtig und liefern oft den Schlüssel zu großen Fortschritten und neuartigen Anwendungen. Dass dies auch in der Welt der Teilchenbeschleuniger gilt, zeigen jetzt bahnbrechende Experimente [1] in der Arbeitsgruppe von Dietrich Habs an der LMU München. Dem Team Tobias Schätz und Ulrich Schramm ist es dort erstmals gelungen, einen Strahl von Magnesium-Ionen in einem Speicherring zu kristallisieren. Mit dem umlaufenden *kristallinen Ionenstrahl* [2] ist ein mehr als fünfzehn Jahre alter Traum der Beschleunigerphysik wahr geworden.

In den frühen 80er Jahren lösten seltsame Beobachtungen an einem elektronengekühlten Protonenstrahl im Speicherring NAP-M in Novosibirsk heftige Spekulationen zur möglichen Kristallisation von Ionenstrahlen aus. Ein solcher Übergang zu einer geordneten Struktur kann im Prinzip erwartet werden, wenn die thermische Energie der Relativbewegung im Strahl die potentielle Energie der wechselseitigen Coulombabstoßung unterschreitet. Zusammengehalten wird der Ionenkristall durch die äußeren Fokussierungskräfte des Speicherrings. Modellrechnungen, die damals auch von Habs durchgeführt wurden, enthüllten die mögliche Struktur von solchen Kristallen und ließen auch ihr enormes Anwendungspotential als Strahlen höchster Brillianz erkennen. Entsprechend groß war auch das Interesse. In großen Beschleunigerringen entzog sich dieses Thema allerdings zunächst einer experimentellen Untersuchung. Der Speicherring in Novosibirsk brannte ab, bevor die beobachteten Phänomene schlüssig interpretiert werden konnten, und andere vergleichbare Speicherringe befanden sich in der zweiten Hälfte der 80er Jahre erst im Bau.

Das Phänomen der Coulombkristallisation zeigte sich dann tatsächlich sehr bald auch experimentell, doch nicht an hochenergetischen Teilchenstrahlen in Speicherringen, sondern in quantenoptischen Experimenten mit lasergekühlten Ionen in kleinen Fallen [3]. In der Quantenoptik sind solche Systeme seitdem von größtem Interesse, z.B. für höchstauflösende Spektroskopie und ultrapräzise Atomuhren, zur Untersuchung fundamentaler Quanteneffekte und sogar zur Realisierung eines Quantencomputers. Experimente in der Arbeitsgruppe von Herbert Walther am MPI für Quantenoptik an ruhenden Ionen in einer ringförmigen Falle [3] bestätigten zu Anfang der 90er Jahre auch auf eindrucksvolle Weise die theoretischen Vorhersagen von Beschleunigerphysikern zur Struktur der Kristalle. Völlig offen blieben jedoch die entscheidenden Fragen in Bezug auf hochenergetische Teilchenstrahlen: Können solche Kristalle den schnellen Transport durch eine Beschleunigerstruktur überhaupt überstehen, wenn sie starken zeitabhängigen Kräften ausgesetzt sind? Wenn ja, welche

Eigenschaften muss ein Speicherring hierfür haben und welche Art und Stärke von Kühlung ist dazu notwendig?

Seit die Ionenspeicherringe TSR am MPI für Kernphysik in Heidelberg, ESR an der GSI in Darmstadt und ASTRID an der Universität Aarhus gegen Ende der 80er bzw. Anfang der 90er Jahre in Betrieb gingen, werden dort Experimente durchgeführt, die das Verhalten stark gekühlter Ionenstrahlen bei Geschwindigkeiten von typischerweise einigen Prozent der Lichtgeschwindigkeit untersuchen. Zum Einsatz kommen dabei sowohl die sehr leistungsstarke Laserkühlung als auch die universell einsetzbare Elektronenkühlung. Dabei wurden wichtige Erkenntnisse zur Dynamik sehr brillianter Strahlen gewonnen, doch echte Coulombkristalle konnten, von Beobachtungen eines flüssigkeitsartigen Ordnungseffekts sehr weniger hoch geladener Ionen [4] und eines mehrdeutigen anomalen Verhaltens im lasergekühlten Strahl [5] abgesehen, bisher nicht realisiert werden. Die Experimente zeigten immer deutlicher, dass sich ein ungeordneter „gasförmiger“ Ionenstrahl bei hoher Dichte der Kühlung durch sehr starke Aufheizprozesse heftigst widersetzt.

Um die große Kluft zwischen kleinen Ionenfallen und großen Speicherringen zu schließen, hat die Münchener Arbeitsgruppe mit ihrem Ionenspeicherring PALLAS [6] einen neuen Weg beschritten. Dabei handelt es sich um einen kleinen Speicherring (siehe Abb.1), der mit seinem Umfang von nur 36cm problemlos auf einem Experimentiertisch Platz findet, aber ansonsten Konzepten aus der Beschleunigerphysik folgt. In diesem Miniatur-Beschleunigerlabor werden Magnesium-Ionen zunächst durch den Strahlungsdruck eines Laser beschleunigt, dessen Frequenz dabei kontinuierlich variiert wird. Hat der Strahl eine Geschwindigkeit von ca. 2800m/s erreicht, geraten die Ionen aufgrund des Dopplereffekts ebenfalls in Resonanz mit einem zweiten, gegenläufigen Laser. Beide Laser zusammen liefern dann die hocheffiziente Laserkühlkraft, die im bewegten Bezugssystem des Strahls wirkt und die Ionen auf eine feste Geschwindigkeit zwingt. Als erstes Indiz für einen Phasenübergang, wohlbekannt aus Ionenfallenexperimenten, beobachten die Münchner Physiker einen plötzlichen Sprung in dem von den Ionen ausgesandten Fluoreszenzlicht. Eindeutig wird die Beobachtung bei der Analyse des transversalen Ionenstrahlprofils, denn es zeigt sich eine schlagartige drastische Verringerung des Strahlradius von ca. 50 μ m auf wenige μ m (siehe Abb.2). Auch in der longitudinalen Geschwindigkeitsbreite des Strahls wird gleichzeitig eine drastische Verringerung gemessen. Der Strahl ist damit, auch wenn man bei den hohen Geschwindigkeiten die Kristallstruktur nicht wie in Ionenfallen direkt beobachten kann, ganz eindeutig in die kristalline Phase übergegangen. Eine Erhöhung der

Phasenraumdichte um einen Faktor 10^6 ergibt sich als dramatische Konsequenz dieses Phasenübergangs.

Die Experimente bestätigen auch die bemerkenswerten Eigenschaften kristalliner Strahlen, sich im Speicherring wegen ihrer elastischen Reaktion auf die Fokussierungskräfte nicht mehr aufzuheizen. Der Ionenkristall kann sogar mehr als 3000 mal im Ring PALLAS ohne jede weitere Kühlung umlaufen, ohne zu schmelzen. Diese Bestätigung für die Unterdrückung von Strahlaufheizung in der geordneten Phase ist für die Erzeugung hochenergetischer kristalliner Strahlen in großen Beschleunigerringen von größter Bedeutung. So sollte es möglich sein, Ionenkristalle bei relativ geringen Strahlenergien zu erzeugen und diese dann im kristallinen Zustand weiter zu beschleunigen. Das einzigartige Modellsystem PALLAS wird es nun erlauben, kristalline Ionenstrahlen im Detail zu untersuchen und so entscheidende Erkenntnisse auch für große Anlagen zu gewinnen. Der Brückenschlag zwischen kleinen Ionenfallen und großen Speicherringen, der mit PALLAS gelungen ist, eröffnet ein neues Kapitel der experimentellen Beschleunigerphysik mit einem enormen Potential für zukünftige Experimente an Teilchenstrahlen höchster Brillianz.

[1] *T. Schätz, U. Schramm, and D. Habs*, *Nature* **412**, 717 (2001).

[2] *D. Habs and R. Grimm*, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **45**, 391 (1995).

[3] *H. Walther*, *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **31**, 137 (1993).

[4] *M. Steck et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 3803 (1996).

[5] *U. Eisenbarth et al.*, *Hyperfine Interact.* **127**, 223 (2000).

[6] <http://www.ha.physik.uni-muenchen.de/uschramm/pallas/pallas.html>

Prof. Dr. Rudolf Grimm

Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck

Technikerstr. 25, A-6020 Innsbruck

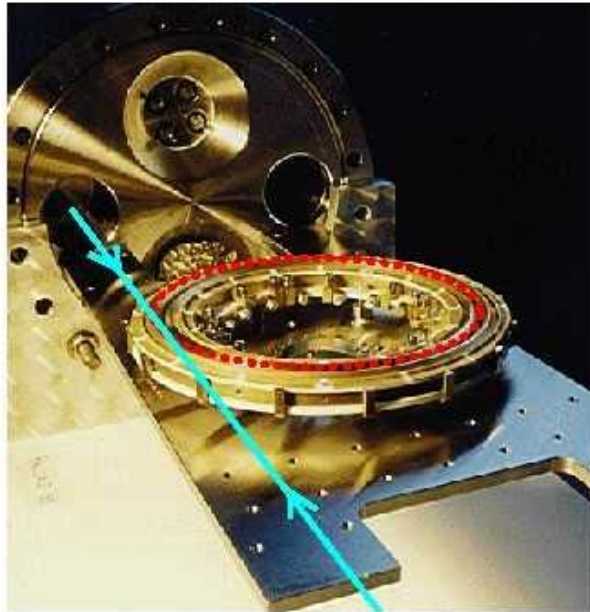


Abb.1: Der Ionenspeicherring PALLAS mit einem Durchmesser von 115mm. Markiert sind die Umlaufbahn (rot) und die zur Kühlung verwendeten Laserstrahlen (blau).

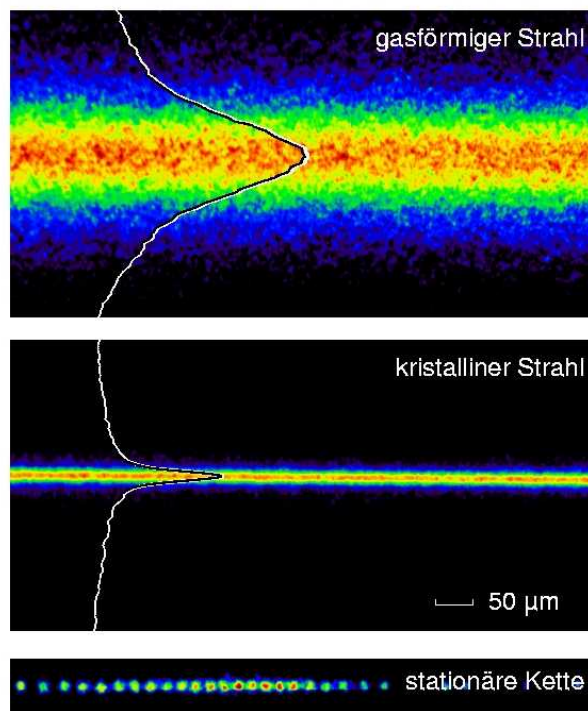


Abb.2: Vergleich der über eine Fluoreszenzabbildung gewonnenen transversalen Profile eines Ionenstrahls vor und nach dem Phasenübergang vom ungeordneten „gasförmigen“ Strahl (oben) zum kristallinen Strahl (Mitte). Nach dem Übergang besteht der Strahl aus einer regelmäßigen linearen Kette von Ionen, die mit 2800m/s im Speicherring umkreist. Im Fall einer ruhenden linearen Kette, wie sie ebenfalls in PALLAS erzeugt werden kann, läßt sich die regelmäßige Struktur direkt beobachten (unten).