

**Dr. Shreenanda Ghosh**

## Manipulation of time reversal symmetry breaking superconductivity in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> by uniaxial pressure

Manipulation der zeitumkehrungssymmetriebrechenden Supraleitung in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> durch einachsigen Druck

### Kurzbeschreibung

In diesem Abschnitt beschreibe ich das Thema und die wichtigsten Ergebnisse meiner Doktorarbeit.

Seit ihrer Entdeckung im Jahr 1911 ist Supraleitung, d. h. der vollständige Verlust der elektrischen Beständigkeit beim Abkühlen auf extrem niedrige Temperaturen, war eine der stärksten faszinierende Quantenphänomene in der Physik. Supraleitende Spulen erzeugen starke Magnetfelder werden häufig in der MRT (Magnetresonanztomographie) verwendet in Krankenhäusern und in den Magnetschwebbahnen in Japan. Supraleitende Drähte sind für die Elektroenergieindustrie von großem Interesse. Hoch bis zu 15 % der Energie gehen beim konventionellen Transport von elektrischer Energie verloren aufgrund des Transportleitungswiderstandes. Wenn man in Zukunft Strom transportieren kann über große Entfernungen mit Supraleitern wäre es von großem Vorteil für die Zivilisation.

1957 wurde eine mikroskopische Theorie für die Supraleitung vorgeschlagen, die als BCS-Theorie bekannt. Es wurde angenommen, dass der supraleitende Zustand von a Metall ist ein sogenannter „s-Wellen“-Elektronenpaarungszustand. Beginnend mit dem bahnbrechende Entdeckung von Hochtemperatur-Supraleitern im Jahr 1986, dem BCS Theorie musste verallgemeinert werden, um Elektronenpaarungszustände verschiedener Symmetrie, die als „p-Welle“ und „d-Welle“ bezeichnet wird. Diese Entdeckung löste eine riesige Aktivität aus auf dem Gebiet der Supraleitung, was zu Materialentdeckungen führte, die uns näher am Ziel, einen Supraleiter bei Raumtemperatur zu haben.

Die Quantenmechanik erlaubt auch Linearkombinationen verschiedener Zustände wie s + d. In diesem Fall wird der Supraleiter als zweidimensional bezeichnet. Zwei oder mehr allgemeine, mehrdimensionale Supraleitung ist ein Thema aktiver Forschung, da es ermöglicht eine neue Vielfalt von Supraleitern, die überlegen sein könnten Eigenschaften für Anwendungen.

Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> war eines der allerersten Materialien, von dem vorgeschlagen wurde, dass es eine zwei-dimensionaler supraleitender Zustand. Für den größten Teil seiner Geschichte war die supraleitender Zustand von Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> wurde vermutlich durch ein chirales p + p-Parameter der Wellenzustandsreihenfolge. In den letzten 25 Jahren haben jedoch mehrere Experimente widersprachen dieser Schlussfolgerung.

In meiner Doktorarbeit habe ich die Myon-Spin-Relaxationstechnik und uniaxiale Druck, um nach schlüssigen Beweisen für die Multidimensionalität des supraleitenden Ordnungsparameters in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>.

Die Sondierung von Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> unter einachsigem Druck bietet die Möglichkeit, den Entartung zwischen den entarteten Komponenten des vorgeschlagenen mehrdimensionaler Ordnungsparameter (p/d-Welle). Die Entwicklung der Druckzelle umfasste in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Dresden, und dem  $\mu$ SR . in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Dresden, ein engagiertes Engineering, Konstruktion, Montage, Kalibrierung, Test der verschiedenen Iterationen der Zelle Einrichtung des Paul-Scherrer-

Instituts in der Schweiz. Diese Druckzelle ist ein weltweit einzigartiges Gerät, das einen piezoelektrischen Kraftgenerator verwendet und ungefähr 20-mal mehr Kraft liefert als bestehende Zellen. Es wurde erfolgreich verwendet, um andere Systeme mit Myonen und auch Neutronenstreuung zu studieren. Wir hoffen, dass diese Druckzelle bei der Untersuchung einer Vielzahl anderer Quantenmaterialien nützlich sein wird. Unsere Experimente mit der einachsigen Druckzelle zeigten, dass die Temperatur, bei denen spontane Magnetfelder in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> auftreten, wird langsam unterdrückt unter einachsigem Druck, während der supraleitende Übergang die Temperatur steigt stark an. Mit anderen Worten, eine Aufspaltung von beiden Temperaturen werden deutlich beobachtet. Dies wurde von keinem anderen beobachtet bisher experimentelle Methoden. Diese Aufspaltung beweist die Zweidimensionalität des supraleitenden Zustands in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>. Das Ergebnis meiner Doktorarbeit war im März 2021 in der Zeitschrift Nature Physics veröffentlicht, und unsere Forschung war von Physics Today abgedeckt. Unsere Arbeit hat auch mehrere andere Studien motiviert. Meine Doktorarbeit soll den weltweiten Versuch beleuchten, die Mechanismen dahinter zu erklären unkonventionelle Supraleitung.

#### Begründung:

Ich bin in Westbengalen, Indien, aufgewachsen. Ich war an Recherchen interessiert Supraleitung nach meinem Master in Physik an der Universität Kalkutta, und Dresden war eine naheliegende Wahl. Im Rahmen von 'DRESDEN-concept' forschen rund 400 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nachhaltig an der Supraleitung und sind damit einer der führenden Orte weltweit.

Seit ihrer Entdeckung im Jahr 1911 ist die Supraleitung eine der wichtigsten spannende Kapitel der Physik. Ein supraleitender Zustand ist durch einen verschwindenden elektrischen Widerstand gekennzeichnet, wenn er auf extrem niedrige Temperaturen abgekühlt wird.

Supraleitende Spulen, die starke Magnetfelder erzeugen, werden häufig in MRT (Magnetresonanztomographie) in Krankenhäusern und in den Magnetschwebbahnen in Japan. Darüber hinaus sind supraleitende Drähte von großer Interesse an der Elektroenergiebranche. Bis zu 15 % der Energie gehen im konventioneller Stromtransport aufgrund des Transportleitungswiderstandes. Wenn in Zukunft kann man Strom über weite Strecken transportieren mit Supraleiter bei Raumtemperatur, wäre es sehr vorteilhaft für Zivilisation.

Meine Diplomarbeit bestand aus zwei Teilen:

1. Entwicklung einer kundenspezifischen einachsigen Druckzelle, die von einem Piezoelektrischer Kraftgenerator, ein weltweit einzigartiges Gerät für Großanlagenexperimente wie Myon-Spin-Relaxation ( $\mu$ SR) und Neutronen Streuung. Es umfasste Engineering, Konstruktion, Montage, Kalibrierung, Testen der verschiedenen Iterationen der Zelle über mehrere Jahre, die durchgeführt wurden in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Dresden und die  $\mu$ SR-Anlage des Paul Scherrer Instituts in der Schweiz [1][2]. Es kann etwa 20-mal mehr Kraft aufbringen als bestehende Zellen. Es war bereits verwendet, um andere Systeme mit Myonen und Neutronenstreuung zu studieren [3]. Wir hoffen, dass es für das Studium einer großen Anzahl anderer nützlich sein wird

Quantenmaterialien.

2. Mit der Zelle führte ich  $\mu$ SR-Experimente an  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  durch.

Unsere technisch anspruchsvollen Experimente zeigten, dass die Temperatur bei welcher spontanen Magnetfelder in  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$  auftreten, wird langsam unterdrückt unter einachsigen Druck, während der supraleitende Übergang Temperatur steigt stark an, d.h. eine Aufspaltung beider Temperaturen ist deutlich zu beobachten. Trotz intensiver Bemühungen wurde es durch keine anderen experimentellen Methoden beobachtet. Diese Aufspaltung beweist die zweidimensionale Natur der Supraleitung von  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ . Das Ergebnis meiner Doktorarbeit wurde im März 2021 in der Zeitschrift Nature Physics veröffentlicht [4]. Unsere Arbeit hat in kürzester Zeit weltweit große Aufmerksamkeit erregt, was sich in der relativ höheren Nr. der Zitationen, die unsere Nature Physics-Publikation erhalten hat (42 Zitate in 4 Monaten) und wurde von Physics Today [5] behandelt. Ich habe meine Dissertation in 8 eingeladenen Vorträgen in internationalen universitären Physikseminaren und 12 Beiträgen in weltweiten Konferenzen und Workshops präsentiert. In Dresden habe ich viele Konferenzen und Seminare besucht, bei denen ich mit weltweit führenden Wissenschaftlern in Kontakt treten konnte. Aus Indien kommend; es hat mir sehr geholfen, global sichtbar zu sein.

Unsere Arbeit hat mehrere andere Studien motiviert, z.B. [6-8]. Meine Doktorarbeit hat erreichte ein globales Publikum und lenkte seine Aufmerksamkeit auf die Forschungsaktivitäten in

Dresden. Ich glaube, dass meine Forschung junge Wissenschaftler weltweit motivieren wird Dresden als Reiseziel zu betrachten und etablierte Wissenschaftler anziehen mit der Dresdner Gemeinde zusammenzuarbeiten.

[1] C. W. Hicks, S. Ghosh et al. JPSCP. 21, 011040 (2018).

[2] S. Ghosh et al., Review of Scientific Instruments 91, 103902 (2020).

[3] Z. Guguchia, ..., S. Ghosh, et al. Phys. Rev. Lett. 125, 097005 (2020).

[4] V. Grinenko\*, S. Ghosh\* et al., Nature Physics 17, 748–754 (2021).

\* Diese Autoren haben zu gleichen Teilen beigetragen.

[5] Physik heute, DOI:10.1063/PT.6.1.20210322a, März 2021.

[6] Astrid T. Rømer et al. PRB 102, 054506 (2020)

[7] V. Grinenko et al., Nat. Com 12, 3920 (2021).

[8] Roland Willa et al. PRB 104, 024511(2021).

Nächste Schritte:

In Zukunft strebe ich eine wissenschaftliche Laufbahn an, ich werde als Postdoc in den Vereinigten Staaten von Amerika arbeiten. Auf der Suche nach Postdoc-Stellen wurde ich zu Seminaren an renommierten Universitäten weltweit eingeladen und mir wurden mehrere Postdoc-Stellen in Paris, Berkeley, Karlsruhe etc. angeboten. Ich möchte mich als unabhängiger Forscher etablieren und nach Dresden zurückkehren (von wo meine Reise begann) als Gruppenleiter oder Jungermittler.

Während meiner Doktorarbeit arbeitete ich an der Entwicklung, Kalibrierung und Realisierung einer weltweit einzigartigen piezoelektrisch angetriebenen einachsigen Druckzelle, die eine in situ Dehnungsabstimmung über einen weiten Temperaturbereich einschließlich kryogener Temperaturen bietet, optimiert für Myon-Spin-Relaxationsmessungen. Ich habe am Aufbau eines Prüflabors für die einachsige Druckmessdose an der TU Dresden mitgewirkt und ausführliche Bedienungsanleitungen für die Druckmessdose als Leitfaden für die späteren Anwender verfasst, was sich als entscheidend herausgestellt hat.

In den Vereinigten Staaten zielen meine Arbeiten darauf ab, eine Apparatur zu bauen, die es erlaubt, die Proben in situ mit dem äußeren einachsigen Druck zu beaufschlagen, während optische Messungen durchgeführt werden. Aufgrund meiner aktuellen Expertise in der uniaxialen Drucktechnik im Bereich der Quantenmaterie bin ich zuversichtlich, einen wesentlichen Beitrag zur Kombination von uniaxialem Druck mit unterschiedlichen Techniken leisten zu können. Meine Forschung in den Vereinigten Staaten von Amerika wird sich auf die Erforschung neuer Quantenmaterialien konzentrieren, wobei der Schwerpunkt auf den Aggregatzuständen liegt, die durch starke Wechselwirkungen zwischen Elektronen und magnetische Wechselwirkung in Festkörpern entstehen.

Ich bin optimistisch, dass ich durch den richtigen Einsatz des in Dresden erworbenen Wissens in der breiteren wissenschaftlichen Gemeinschaft nach außen etwas bewegen kann. Dennoch wird es für mich Priorität haben, in absehbarer Zeit in einer neuen Funktion mit neuen Kompetenzen nach Dresden zurückkehren zu können.

Ich bin seit 2016 mit einem Web-Magazin verbunden, einer gemeinnützigen Organisation, die hauptsächlich von einer Gruppe von Wissenschaftsliebhabern geleitet wird, die sich auf verschiedenen Kontinenten aufhalten [1]. Wissenschaft soll geographische und sprachliche Barrieren überwinden. In Wirklichkeit haben viele junge Köpfe auf der ganzen Welt jedoch keine Chance, sich außerhalb von Lehrbüchern über Wissenschaft zu informieren, nur weil es an wissenschaftlicher Literatur in ihrer Sprache mangelt. Wir haben unsere Muttersprache aufgenommen: Bengali mit 226 Millionen Muttersprachlern - um mit unserer begrenzten Kapazität mit dieser Situation fertig zu werden. Wir veröffentlichen Artikel in allen Wissenschaftsbereichen, einschließlich der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Die Artikel werden größtenteils von Forschern verfasst und von Experten begutachtet, um die wissenschaftlichen Informationen korrekt zu halten und Fehlinterpretationen zu vermeiden. Allein diese Eigenschaft unterscheidet unser Webmagazin wahrscheinlich von den meisten populärwissenschaftlichen Initiativen überall auf der Welt und in jeder Sprache[2]. In Zukunft träume ich davon, die Grenzen unseres Wissenschaftsmagazins zu erweitern, indem ich mein wissenschaftliches Netzwerk in Dresden einbeziehe. Ziel wäre es, die wissenschaftlichen Fortschritte in Dresden beispielsweise an einen Gymnasiasten zu verbreiten, der in einem abgelegenen Dorf in einem fernen Land sitzt.

Außerdem möchte ich mich aktiv an den hervorragenden Initiativen wie der „Physikerin der Woche“ des Arbeitskreises Chancengleichheit (AKC) der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) beteiligen, die sich für die Erhöhung der Sichtbarkeit von Frauen in der Physik in Deutschland einsetzt. Ich fühle mich geehrt, dass meine Lebensgeschichte während meiner Promotion in Dresden von ihnen behandelt wurde [3] und würde mich sehr freuen, Teil ähnlicher nachdenklicher Aktivitäten zu sein.

[1] <https://bigyan.org.in/>

[2] <https://indiabioscience.org/columns/indian-scenario/bigyan-org-in-a-science-outreach-platform-by-researchers-in-bengali>

[3] [https://www.dpg-](https://www.dpg-physik.de/vereinigungen/fachuebergreifend/ak/akc/publikationen/interviews/ghosh?fbclid=IwAR2YJDYdf33BxkKrou1yKKmCqzo7ttmYdHq1hVZWbsfWtDNQgLa6bHjnDnw)

[physik.de/vereinigungen/fachuebergreifend/ak/akc/publikationen/interviews/ghosh?fbclid=IwAR2YJDYdf33BxkKrou1yKKmCqzo7ttmYdHq1hVZWbsfWtDNQgLa6bHjnDnw](https://www.dpg-physik.de/vereinigungen/fachuebergreifend/ak/akc/publikationen/interviews/ghosh?fbclid=IwAR2YJDYdf33BxkKrou1yKKmCqzo7ttmYdHq1hVZWbsfWtDNQgLa6bHjnDnw)