

Langjähriges Rätsel gelöst

Das gemessene Verhältnis zweier Emissionslinien von vielfach geladenen Eisen-Ionen stimmt jetzt mit der theoretischen Vorhersage überein.

Wilfried Nörtershäuser

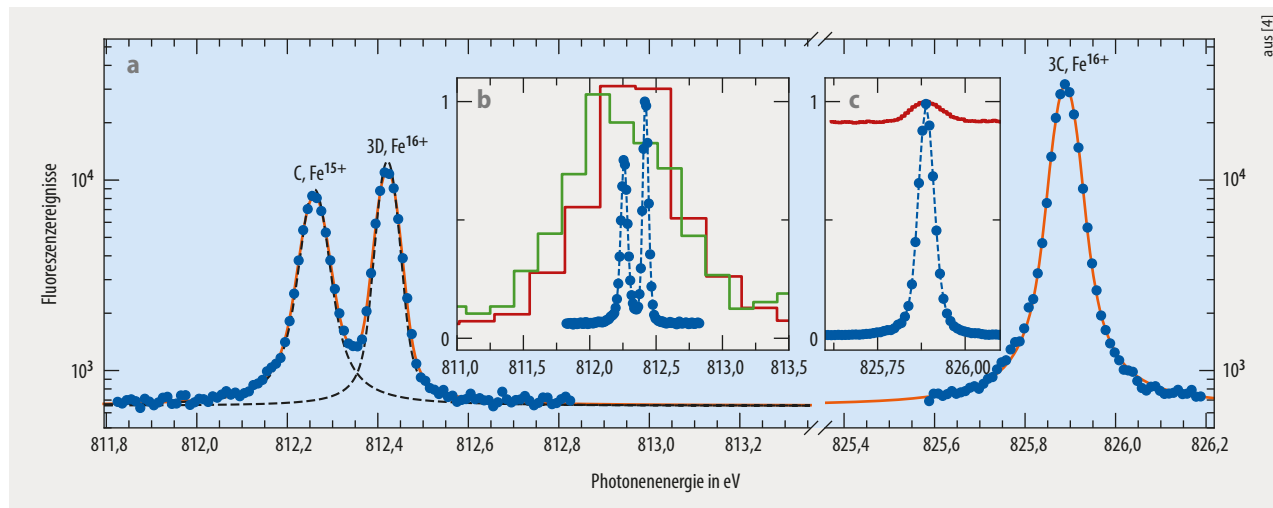


Abb. 1 Die neue Messung (a, blau) erlaubt es, die Übergänge in Fe^{15+} und Fe^{16+} zu trennen – im Gegensatz zu früheren Messungen (b, grün) und Beobachtungen des Sterns Capella (rot). Die 3C-Resonanz (c, blau) belegt den deutlich reduzierten Untergrund im Vergleich zu [3] (rot).

Was wir über Vorgänge außerhalb unseres Sonnensystems wissen, basiert fast ausschließlich auf der Analyse elektromagnetischer Strahlung. Die Entwicklung der Spektralanalyse durch Kirchhoff und Bunsen in Heidelberg hat es erlaubt, die Bestandteile unserer Sonne und anderer Sterne zu ermitteln, da jedes Element einen unverwechselbaren Fingerabdruck von Emissionslinien im Spektrum besitzt. Mit ausreichender Auflösung lassen sich sogar Isotope unterscheiden, weil deren unterschiedliche Kernmassen und -radien die Spektrallinien leicht verschieben. Auch der Ladungszustand des Atoms verändert das Spektrum. So stellten sich zunächst rätselhaft Linien im Sonnenspektrum als Übergänge in Fe^{13+} -Ionen heraus. Der Ladungszustand der Ionen eines

Plasmas lässt Rückschlüsse auf dessen Temperatur zu, da hochgeladene Ionen durch Stoßprozesse z. B. mit Elektronen entstehen, deren Wahrscheinlichkeit von der Temperatur abhängt.

Im sichtbaren Spektrum zeigen nur wenige hochgeladene Ionen Übergänge; sie dominieren im Röntgenbereich von Sternen. Da die Erdatmosphäre für Röntgenstrahlung undurchlässig ist, hat die Röntgenastronomie erst mit dem Einsatz satellitengestützter Spektrometer begonnen. Ein Linienpaar von neonartigem, also 16-fach geladenem Eisen (Fe^{16+}) fällt dabei in den Spektren zahlreicher astrophysikalischer Objekte besonders auf. Zu den 3C- und 3D-Linien gehören die Übergänge $(2p^5)_{1/2}(3d)_{3/2}(J=1) \rightarrow 2p^6(J=0)$ und $(2p^5)_{3/2}(3d)_{5/2}(J=1) \rightarrow 2p^6(J=0)$ mit einer Energie von etwa 826 bzw.

812 eV (**Abb. 1a**). Bedeutsam ist das Intensitätsverhältnis beider Linien $R = I(3C) / I(3D)$: Einerseits dient es der Temperaturanalyse der beobachteten Plasmen, andererseits ließ es sich nicht mit theoretischen Modellen in Einklang bringen. Während die Intensitätsverhältnisse aus Sternbeobachtungen und aus der Spektroskopie von Plasmen in Fusionsreaktoren zwischen 2 und 3,3 streuten, lieferten atomphysikalische Modellrechnungen einen Wert von etwa 3,5 – weitgehend unabhängig von den Plasmaeigenschaften. Ein Teil der Abweichung beruht auf der Überlagerung der 3D-Linie mit einer sogenannten C-Linie (**Abb. 1a**) in natriumartigem Eisen (Fe^{15+}) [1].

Da die Modelle notwendig sind, um die beobachteten Daten zu interpretieren und die Bedingungen am Entstehungsort der Strahlung zu analysieren, sorgte diese Diskrepanz für eine Kontroverse: Ist die Modellierung der Stoßprozesse im Plasma fehlerbehaftet oder bereits die Atomphysik hochgeladener Ionen, die in die Modelle einfließt? Diese Frage sollte ein konzeptionell anderes Experiment klären. Statt den angeregten Zustand

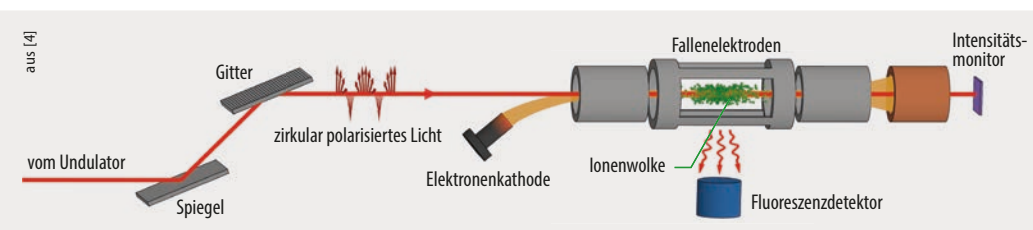


Abb. 2 Aufbau an der EBIT von PETRA III mit Fluoreszenzdetektor und Intensitätsmonitor

über Stöße zu besetzen und die nachfolgende Emission zu beobachten, testet eine resonante Anregung des Fe^{16+} -Ions mit schmalbandiger elektromagnetischer Strahlung gezielt die atomphysikalische Struktur des Ions. Der Vorgang ist unabhängig von den Plasmabedingungen, weil die Intensität der beobachteten Resonanz direkt proportional zur Oszillatorstärke des Übergangs ist und nicht von Stoßprozessen im Plasma abhängt. Ein solches Experiment ließ sich mit einer Elektronenstrahlionenfalle (EBIT) als Quelle hochgeladener Fe^{16+} -Ionen und einer Röntgenquelle mit einer Wellenlänge von etwa 15 Å erstmals an der Linac Coherent Light Source (LCLS) in Stanford durchführen [2].

Kürzlich nutzten Forschende dazu die Synchrotronstrahlungsquelle PETRA III an DESY. Dort wird das Röntgenlicht über ein Gitterspektrometer in die EBIT eingekoppelt (**Abb. 2**). Im Vergleich zum Experiment an der LCLS besitzt der Monochromator eine zehnmal höhere Auflösung (**Abb. 1b**). Die verwendete POLAR-X EBIT nutzt eine außerhalb der Achse gelegene Elektronenkathode: Das Licht kann die Falle passieren und die Intensität dahinter ist messbar. Der Elektronenstrahl mit einer Energie von etwa 1200 eV wird bei dem Eintritt in das Magnetfeld mit etwa 870 mT stark gebündelt und reicht aus, um Fe^{16+} durch schrittweise Ionisation zu erzeugen. Das negative Raumladungspotential des Elektronenstrahls speichert die Ionen radial, während eine Spannung an den Ring-

elektroden (Driftröhren) für die axiale Speicherung sorgt. Seitlich gelegene Detektoren registrieren das emittierte Fluoreszenzlicht.

Bei der ersten Messung mit dieser Apparatur an PETRA III gelang es bereits 2020 erstmals, die C-Linie von der 3D-Linie zu trennen [3] und das Intensitätsverhältnis R neu zu bestimmen: $R = 3,09(8)_{\text{stat}}(6)_{\text{syst}}$. Aufgrund der kleineren systematischen Unsicherheit wich das Ergebnis um 5σ vom theoretischen Wert 3,55(5) ab. Entscheidende Verbesserungen des Experimentes klärten diese Diskrepanz nun auf [4]. Ein kleinerer Austrittsspalt am Monochromator steigerte die Auflösung um etwa einen Faktor 2,5. Noch entscheidender reduzierte eine periodische Variation der Elektronenstrahlenergie den Untergrund um drei Größenordnungen: Bei niedrigen Energien treten viele Stoßprozesse nicht auf, die den oberen Zustand der Röntgenlinie besetzen. Der reduzierte Untergrund machte die Flanken der Resonanzlinie im Spektrum sichtbar (**Abb. 1c**). Die Linienform ergibt sich für Atome in einem dünnen Gas aus einer Faltung der Geschwindigkeitsverteilung der Atome (Gauß-Kurve, Doppler-Profil) und der natürlichen Linienbreite des Übergangs (Lorentz-Profil). Für ein solches Voigt-Profil dominiert in unmittelbarer Nähe der Resonanz der breite, aber rasch abfallende Doppler-Anteil, während weiter entfernt die langsam abfallenden Flanken des Lorentz-Profiles überwiegen. Darüber hinaus war es nun möglich, die na-

türliche Lebensdauer der Übergänge zu bestimmen und erstmals die in den Flanken „verborgene“ Intensität der drei Linien zu messen. Das neue Ergebnis von $R = 3,51(2)_{\text{stat}}(7)_{\text{sys}}$ weicht deutlich vom alten Ergebnis ab und nähert sich dem theoretischen Wert.

Dessen Unsicherheit haben die Forschenden ebenfalls reduziert. Dazu nutzten sie in ihren Modellrechnungen 1,2 Millionen Elektronenkonfigurationen und bestimmten die Wellenfunktionen als Grundlage für die Berechnung der Dipolmatrixelemente. Das Ergebnis von $R = 3,55(2)$ bestätigt die früheren Rechnungen und stimmt ausgezeichnet mit dem neuen experimentellen Wert überein.

Die Arbeit belegt eindrucksvoll, wie wichtig Laborexperimente und präzise Messungen an hochgeladenen Ionen für die Astrophysik sind: Um die Spektren aktueller und zukünftiger Röntgensatelliten zu analysieren, braucht es korrekte Oszillatorstärken, wie sie nun für Fe^{16+} vorliegen.

- [1] G. V. Brown et al., *ApJ* **557**, L75 (2001)
- [2] S. Bernitt et al., *Nature* **492**, 225 (2012)
- [3] S. Kühn et al., *Phys. Rev. Lett.* **124**, 225001 (2020)
- [4] S. Kühn et al., *Phys. Rev. Lett.* **129**, 245001 (2022)

Der Autor

Prof. Dr. Wilfried Nörtershäuser, Institut für Kernphysik, TU Darmstadt, Schlossgartenstr. 9, 64289 Darmstadt



DPG Frühjahrstagung Dresden: Zelt, Stand 81