

Die Vermessung des Weltraums

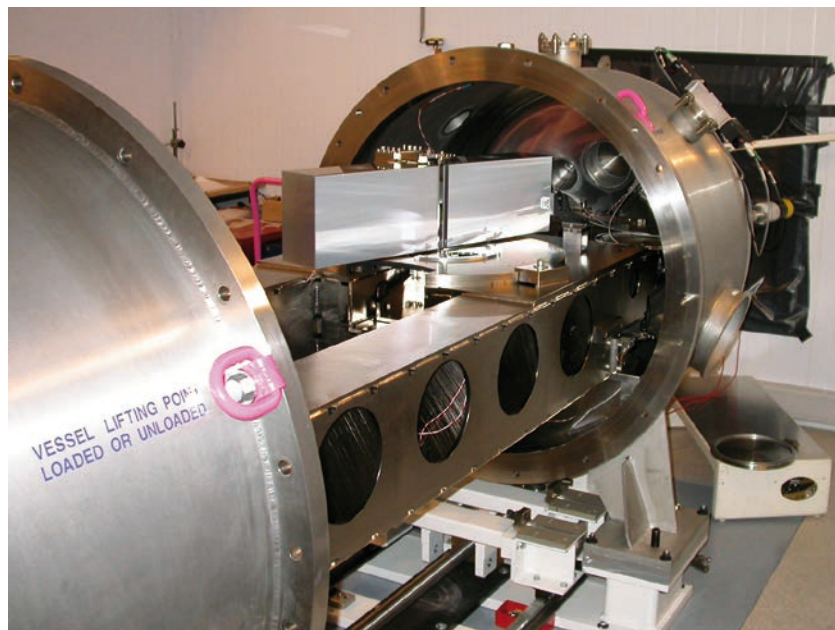
Der optische Frequenzkamm: eine ideale Kalibrationsquelle für astronomische Spektrographen

Patrizia Krok und Tilo Steinmetz

Die Frequenzkammtechnologie erlaubt höchste Präzision in der Metrologie und ist ein Wegbereiter in der Quantenphysik. Auch die Astrophysik profitiert durch genauere Beobachtungsmethoden, die erst der Frequenzkamm ermöglicht. Mit Hilfe einer Frequenzkamm basierten Kalibrierung astronomischer Spektrographen lassen sich kleinste Änderungen in den Spektren des Lichts aus dem Kosmos erfassen. Dies liefert Antworten auf fundamentale Fragen über das Universum, von seiner Entstehung bis zur Entdeckung einer zweiten Erde.

Die physikalische Größe, die sich mit der höchsten Genauigkeit bestimmen lässt, ist die Frequenz. Sie ist invers proportional zur Zeit und über die Lichtgeschwindigkeit mit der Entfernung verbunden. Das genaueste Messinstrument ist ein optischer Frequenzkamm [1] – eine Technologie, die Theodor Hänsch und John Hall 2005 den Nobelpreis der Physik beschert und zur Gründung der Firma Menlo Systems geführt hat. Mit dem Frequenzkamm werden Schwingungen von Lichtwellen direkt gezählt – pro Sekunde sind das je nach Lichtwellenlänge einige Hundert Billionen.

Der optische Frequenzkamm wird in einem gepulsten Lasersystem erzeugt, bei dem die Wiederholfrequenz der emittierten Lichtpulse und die zeitliche Charakteristik (Dispersion) in der Laserkavität aktiv oder passiv stabilisiert werden. So entsteht ein Spektrum aus bis zu 10^6 sehr schmalen, äquidistanten Linien, das eine Oktave oder mehr umspannt. Jede Linie besitzt eine feste spektrale Position, Linienbreite und Intensität. Die Einhüllenden-Offset-Phase ergibt sich aus der Selbstreferenzierung, sie ist die spektrale Position der (hypothetischen) ersten Kammlinie. Zusammen mit der Laserwiederholrate, die dem Abstand der Kammlinien im



Der HARPS-Spektrograph der Europäischen Südsternwarte (ESO) bei offener Vakuumkammer mit optischen Gittern zur Dispersion des einfallenden stellaren Lichts

Spektrum entspricht, ist die absolute Position jeder Linie festgelegt, sofern eine externe Referenz, z. B. Atomuhr, GPS-synchronisierter Oszillator, Wasserstoff-Maser o. ä., beide Freiheitsgrade stabilisiert. Eine unbekannte Frequenz wird mittels optischer Schwebung mit der nächstgelegenen Linie aus dem Frequenzkammspektrum gemessen.

Je besser Einhüllenden-Offset-Phase und Laserwiederholrate stabilisiert werden, desto schmaler bleiben die Kammlinien und desto präziser und genauer ist die Messung. Menlo Systems integriert die firmeneigene figure 9°-Technologie der Modenkopplung [2] in ihre Systeme. Der weltweit präziseste optische Frequenzkamm FC1500-ULN^{plus} ist die Schlüsseltechnologie für optische Uhren.

Frequenzkämme für die Astronomie

Der wohl entfernteste Einsatzort optischer Frequenzkämme sind entlegene Sterne in unserer oder fremden Galaxien. Ein Spektrograph fängt das

Licht dieser Sterne ein, zerlegt es über dispersive optische Elemente in seine spektralen Bestandteile und projiziert es auf einen hochempfindlichen Detektor. Die spektrale Position und Breite der Linien im Licht entfernter Supernovae liefert etwa Hinweise auf die Entstehung des Universums. Diese astronomischen Beobachtungen nutzen den Doppler-Effekt: Bewegt sich eine Lichtquelle auf den Beobachter zu, erhöht sich ihre Frequenz im Vergleich zur ruhenden Lichtquelle – und umgekehrt. Auf diese Weise lässt sich über die Rotverschiebung der Hintergrundstrahlung die These eines expandierenden Universums überprüfen.

Eine weitere Anwendung ist die Radialgeschwindigkeitsmethode, bei der die winzige periodische Rot- und Blauverschiebung im Spektrum eines Sterns verrät, dass er mit einem oder mehreren Planeten den gemeinsamen Massenschwerpunkt umkreist. Für erdähnliche Planeten ist dieser Effekt äußerst klein: Die Doppler-Verschiebung, die unsere Erde für die Sonne

bewirkt, beträgt nur etwa 9 cm/s, was einer Frequenzänderung im sichtbaren Spektrum von etwa 100 kHz entspricht.

Die Technologie des AstroComb

Damit der AstroComb für die Astronomie seine Aufgabe einer universellen Lichtquelle zur Kalibrierung von Spektrographen erfüllen kann, waren spezifische, teils technologisch komplexe Anpassungen erforderlich [3]. Menlo Systems optische Frequenzkämme nutzen die Faserlasertechnologie, die sie sehr zuverlässig, stabil, einfach in der Handhabung und flexibel macht. Die typische Wiederholrate der ausgesendeten Lichtpulse ist identisch mit dem Abstand der Kammlinien im Spektrum und liegt baulich bedingt bei 250 MHz. Um mit dem Licht des Frequenzkamms einen Spektrographen zu kalibrieren, muss die Pulswiederholrate höher sein und damit der Abstand der Kammlinien größer. Dann kann der Detektor mit seinem intrinsischen Auflösungsvermögen die Positionen der einzelnen Linien separat erfassen. Dafür durchläuft das Licht des Frequenzkamms eine Kavität hoher Finesse mit einem wohldefinierten Abstand ihrer Spiegel. Sie hat die Aufgabe, durch Mehrfachreflexionen zwischen den Spiegeln die Pulswiederholrate zu erhöhen oder im Frequenzbild betrachtet Kammmoden aus dem Spektrum zu filtern. Mit dieser Methode lassen sich Modenabstände bis zu 25 GHz erzeugen und an das Auflösungsvermögen eines Spektrographen optimal anpassen. Um die größtmögliche Anzahl von Photonen für die Kalibration zur Verfügung zu stellen, also das Photonenrauschen der Messung auf ein Minimum zu reduzieren, glättet ein Lichtmodulator die Struktur der spektralen Intensität und erzeugt ein ebenmäßiges Kontrastbild auf dem Detektor [4]. Das Frequenzkammlicht wird schließlich über den Kalibrationskanal synchron zum Sternenlicht in den Spektrographen eingekoppelt, um die Spektren der Beobachtungsobjekte simultan zu kalibrieren.

Eine Serie von Messkampagnen am HARPS-Spektrographen der Europäischen Südsternwarte (ESO) in La

Silla, Chile, mit zwei unabhängigen Astrokämmen zeigte unter anderem, dass der Astrokamm als Kalibrationsquelle die Messgenauigkeit nicht limitiert [5, 6].

Menlo Systems Astrokämme sind derzeit an neun Standorten weltweit für die astronomische Beobachtung in Betrieb. Unter anderem kommen an den beiden Observatorien der Europäischen Südsternwarte in Paranal und La Silla zwei Astrokämme für den sichtbaren Spektralbereich zur Kalibration des ESPRESSO- und HARPS-Spektrographen zum Einsatz. Auf Mauna Kea (Hawaii) ist am Canada-France-Hawaii-Teleskop in diesem Jahr der erste infrarote Astrokamm (1000 – 2300 nm) in Betrieb gegangen, um den SPIRou-Spektrographen auf der Suche nach erdähnlichen Planeten zu kalibrieren. Auf Teneriffa nutzt das Sonnenteleskop (VTT) des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik einen Astrokamm für die Spektroskopie der Sonnenoberfläche [7].

Zwei Nobelpreise, ein Produkt

Mit der Entdeckung des ersten Exoplaneten im Jahr 1995 haben die diesjährigen Physik-Nobelpreisträger Michel Mayor und Didier Queloz den Grundstein für die Suche nach Planeten jenseits des Sonnensystems gelegt [8]. Seither wurden mehr als 4000 Exoplaneten entdeckt. Der 1995 entdeckte

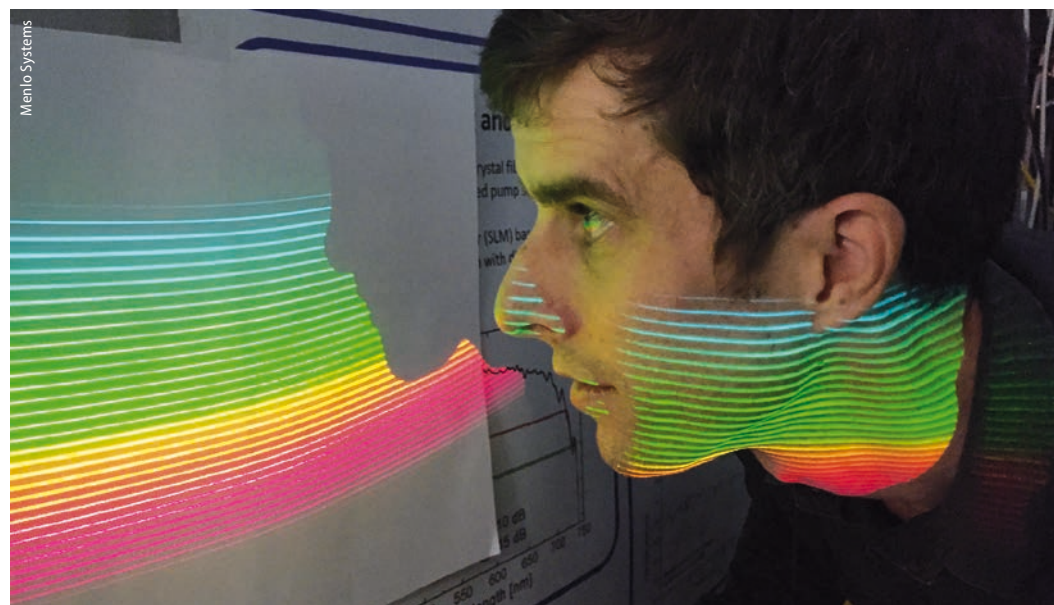
Planet war fast so schwer wie Jupiter. Um kleine Planeten wie die Erde zu finden, erhöhen sich die Anforderungen an die Spektrographen und deren Kalibration. Mit abnehmender Planetenmasse rückt der Massenschwerpunkt des Systems nah an den Stern heran, sodass der Doppler-Effekt im Spektrum des Muttersterns sehr klein wird. Der Astrokamm ermöglicht diese hohe Empfindlichkeit und ist daher entscheidend für die Suche nach kleinen Planeten oder anderen Phänomenen mit sehr kleiner spektraler Signatur. Menlo Systems Frequenzkamm-Technologie vereint somit zwei Physik-Nobelpreise in einem Produkt.

Literatur

- [1] *Th. Udem et al.*, Nature **416**, 233 (2002)
- [2] *W. Hänsel et al.*, Appl. Phys. B **123**, 41 (2017)
- [3] *T. Steinmetz et al.*, Science (80) **321**, 1335 (2008)
- [4] *R. A. Probst et al.*, CLEO 2015 SW4G.7 (2015)
- [5] *T. Wilken et al.*, Nature **485**, 611 (2012)
- [6] *R. A. Probst et al.*, to be published in Nat. Astron.
- [7] *J. Löhmer-Böttcher et al.*, Astron. Astrophys. **607**, A12 (2017)
- [8] *M. Mayor und D. Queloz*, Nature **378**, 355 (1995)

Autoren

Dr. Patrizia Krok und **Dr. Tilo Steinmetz**,
Menlo Systems GmbH, Am Klopferspitz 19a,
82152 Martinsried



Tilo Steinmetz inspiziert die Linien eines Astrokamms, die mittels eines Echelle-Spektrographen an eine Wand projiziert wurden.