

Eine Grundsatzfrage zur Interpretation des relativistischen Doppler-Effektes

NIELS V. FESTENBERG, AUGUST 2010

E-mail: kontakt@festenberg.com

1. Einleitung

Die Beachtung der speziellen Relativitätstheorie ist eine Grundvoraussetzung für die Vermittelbarkeit jeglicher physikalischen Grundlagenforschung. Immer wieder werden daher Experimente durchgeführt, die die spezielle Relativitätstheorie zu bestätigen versuchen. Den bekannten und einschlägigen Publikationen zufolge gelingt dies auch, inzwischen mit extremer Genauigkeit.

Allerdings mehren sich die Zeichen, dass die bisher umfassend erscheinende Gültigkeit der Relativitätstheorien womöglich beschränkt ist (siehe z.B. Messung quasi-instanter Wechselwirkung [SBB*08]). Genauere Betrachtung zeigt, dass nicht die mathematische Form der Relativitätstheorien womöglich unzutreffend ist, sondern vielmehr deren konventionelle, physikalische Interpretation. Deutlich zeigt sich das zum Beispiel für die vermeintliche Geschwindigkeitsbeschränkung des Informations-transportes: explizit gibt darauf weder die spezielle, noch in die allgemeine Relativitätstheorie einen Hinweis. Dass dies dennoch in weiten Kreisen angenommen wird, begründet sich mutmaßlich durch die implizite Deutung des Begriffs Information* und nicht durch mathematische Argumentation.

Die Relativitätstheorien - insbesondere die spezielle Relativitätstheorie - zeichnen sich durch große mathematische Schmiegsamkeit aus. So wurden immer wieder die verschiedensten Auslegungen und Sichtweisen ermutigt. Von diesen Auslegungen wird konventionell leider nur ein sehr kleiner, kanonischer Ausschnitt akzeptiert.

In diesem Aufsatz will ich anhand eines Beispiels zeigen, dass sich die mathematische Schmiegsamkeit der speziellen Relativitätstheorie ausnutzen lässt, um den relativistischen Doppler-Effekt nicht-relativistisch zu interpretieren, ohne mit irgendeinem experimentellen Befund in Konflikt zu geraten. Im Gegenteil, die hier vorgestellte Interpretation erlaubt es, einige (vermeintliche) Widersprüche in der konventionellen Lesart aufzulösen.

Als Vorlage dient eine jüngere Arbeit mit dem Titel „Test of relativistic time dilation with fast optical atomic clocks at different velocities“ von Reinhardt et al. [RSB*07] aus dem Jahr 2007.

*Information wird dabei wohl auf unilaterale Befehlsübertragung auf Basis elektromagnetischer Transversalwellen im Vakuum gemäß der Maxwell-Gleichungen beschränkt.

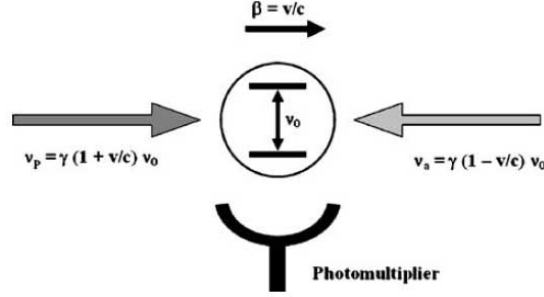


Abbildung 1: Prinzipieller Versuchsaufbau aus [RSB*07] mit dem anzuregenden, bewegten Ionensystem in der Mitte und den Abtast- und Sättigungsstrahlen links und rechts davon (Skizze aus [NBE*07]).

2. Das untersuchte Experiment

Der Versuchsaufbau der Vorlage folgt der Grundidee von Ives et al. [IS38]. Im klassischen Experiment wurden direkt mehrere Linien der Emissionsspektren beschleunigter Ionen vermessen. In [RSB*07] ist der Versuchsaufbau etwas modifiziert. Es werden nicht mehrere Linien des Spektrums gemessen, sondern nur noch eine spezielle. Die Frequenz der einen Linie wird mittels sättigungs-basierter Laserspektroskopie sehr exakt bestimmt. Dabei wird nicht die Emission selbst registriert, sondern indirekt die Lage einer Absorptionsbande als Folge der Emission der identischen Frequenz. Der zur Ionenflugrichtung parallele Strahl sättigt die gesuchte Linie, und die Absorption des antiparallelen Abtast-Strahls wird an einer scharf begrenzten Frequenz vermindert. Abbildung 1 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus.

In der Abbildung wird bereits angedeutet, dass der Versuchsaufbau entscheidend von der Frequenz-Beziehung im relativistischen Doppler-Effekt abhängt. Um Sättigungs- und Abtaststrahlfrequenz aufeinander anzupassen, muss man eine ungefähre ad-hoc-Beziehung voraussetzen. In [RSB*07] wird sie durch die symmetrische Reziprozität des relativistischen Doppler-Effektes gewonnen. Die Strahlfrequenz parallel zur Ionenbewegungsrichtung wird mit ν_p bezeichnet, der antiparallele mit ν_a . Nach dem relativistischen Doppler-Effekt wird das mit der Geschwindigkeit $v = \beta c$ bewegte Ionensystem in der Bewegungsachse jeweils mit einer Frequenz von

$$\nu_{0,p} = k_p \nu_p = \nu_p \gamma (1 - \beta) = \nu_p \sqrt{\frac{c - v}{c + v}} \tag{1}$$

beziehungsweise

$$\nu_{0,a} = k_a \nu_a = \nu_a \gamma (1 + \beta) = \nu_a \sqrt{\frac{c + v}{c - v}} \tag{2}$$

getroffen. Die Symmetrie des relativistischen Doppler-Effektes zeigt sich darin, dass die Vorfaktoren aus Gl. (1) und (2) für gleiche v reziprok zueinander sind und man

schreiben kann

$$\nu_0 = \sqrt{\nu_p \nu_a}. \quad (3)$$

So ergibt sich für jedes Paar (ν_p, ν_a) eine eindeutige Übergangsfrequenz ν_0 , wodurch schließlich $\nu_0 \equiv \nu_{0,p} \equiv \nu_{0,a}$ gilt.

In [RSB*07] wird nun der Versuch unternommen, Abweichungen von dieser Symmetrie zu messen, und zwar durch Vergleich zweier Geschwindigkeiten β_1 und β_2 mit zwei Laserfrequenzpaaren $\nu_{p,a}^1$ und $\nu_{p,a}^2$ in der Form

$$\frac{\nu_p^{(2)} \nu_a^{(2)}}{\nu_p^{(1)} \nu_a^{(1)}} \approx 1 + 2\hat{\alpha}(\beta_2^2 - \beta_1^2) \quad (4)$$

Der Parameter $\hat{\alpha}$ ist übernommen aus der zugehörigen Test-Theorie von Mansouri et al. [MS77a] und [MS77b] in der Anpassung von [Kre92]. Das spezifische Ziel des Experiments aus [RSB*07] ist also der Nachweis einer möglichst kleinen unteren Grenze für $\hat{\alpha}$. Die Autoren berichten eine obere Schranke von $|\hat{\alpha}| \leq 8.4 \times 10^{-8}$.

3. Die Kernfrage

Der Kern des Experiments ist das Lithium-Atom in seiner ionisierten und angeregten Form ${}^7\text{Li}^+$. Dabei wird spezifisch die hyperfeine Absorptionslinie $2^3S_1(F = 5/2) \rightarrow 2^3P_2(F = 7/2)$ betrachtet. Für diese Linie lassen sich in der Literatur unterschiedliche exakte Werte finden, Abbildung 2 zeigt zwei Beispiele. Zumindest auf acht gültige Ziffern herrscht Einigkeit, es gilt offenbar $\nu_0 \approx 546.46692 \times 10^{12}\text{Hz}$. Der eigentliche Test in [RSB*07] ist jedoch nicht explizit von ν_0 abhängig. Daher lautet die spezifische Frage:

Wie gewährleisten die Experimentatoren eindeutig, dass sie eine Absorption $2^3S_1(F = 5/2) \rightarrow 2^3P_2(F = 7/2)$ eines ${}^7\text{Li}^+$ -Ions betrachten, das sich nur durch relativgeschwindigkeitsbedingte Zeitdilatation von einem ruhenden Ion unterscheidet?

Leider fehlt in [RSB*07] die Angabe der direkten Messung des Emissionsspektrums der Ionen. Es wird lediglich angenommen, dass der parallele Strahl eine bestimmte Geschwindigkeitsgruppe unter den Ionen „auswählt“; einen expliziten Test für diese Annahme gibt es nicht. Vermutlich würde das Emissionsspektrum der beschleunigten Ionen bei transversaler Messung auch nur eine sehr breite und unspezifische Verteilung liefern. In jedem Fall muss man in Betracht ziehen, dass während der Anregung womöglich andere Effekte auftreten als die relativistische Zeitdilatation. Diese Möglichkeit besteht sogar dann, wenn der Testparameter bei der Messung exakt $\hat{\alpha} = 0$ ergeben sollte. Über die Ursache der Frequenzverstimmung darf man für das vorliegende daher Experiment spekulieren. Die Zeitdilatation ist eine mögliche Interpretation. Im Folgenden wird eine abweichende Interpretation dargestellt.

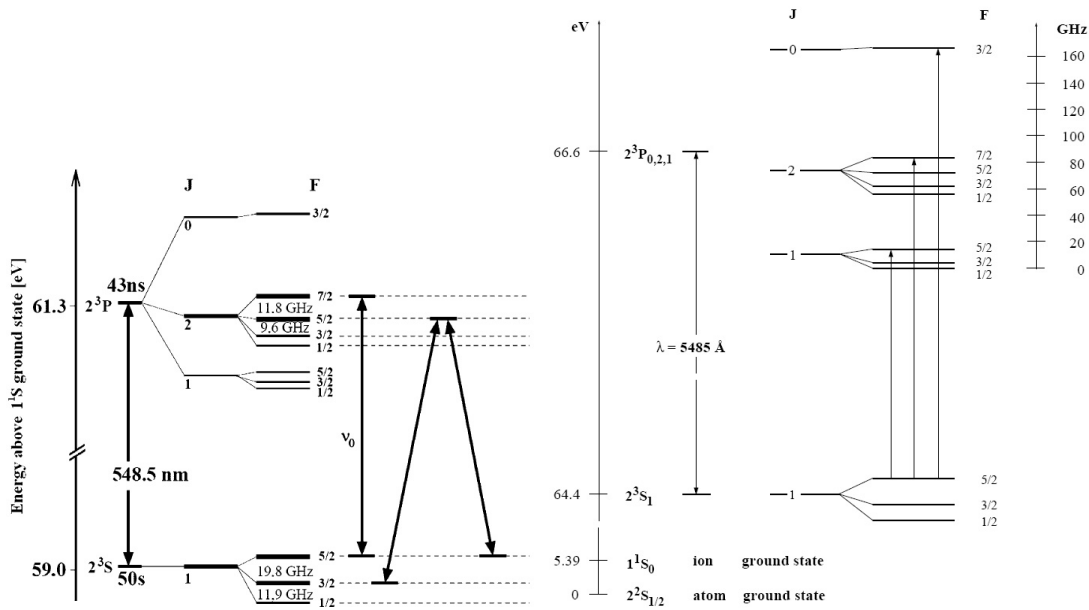


Abbildung 2: Hyperfeinstruktur von ${}^7\text{Li}^+$ in Messungen von 1994 (aus [NBE*07]) links vs. Messungen von 1998 [RGK*98] rechts.

4. Eine nicht-relativistische Interpretation des Experiments

Im Folgenden wird ein kühner Schritt aus der heute konventionellen Physik heraus getan. Dazu wird ein einfaches, altes Konzept verwendet, das in der akademische Physik seit Ende des ersten Weltkrieges kaum noch wahrnehmbare Fürsprecher gefunden hat.

4.1. Spricht etwas gegen einen „Äther“?

Angenommen, es gebe tatsächlich einen absoluten Hintergrund, auf dem sich das physikalische Geschehen der Welt abspielt. Entfernt man sich damit wirklich so weit vom konventionellen Physik-Gebäude, wie es häufig behauptet wird? Nein! Es ist ein leider verbreitetes Gerücht, dass die spezielle Relativitätstheorie einen solchen Äther ausschliesse. Fakt ist, dass die spezielle Relativitätstheorie mathematisch sogar äquivalent ist zu Äther-Theorien mit einem bevorzugten Bezugssystem. Dies wird beispielsweise in der Publikationsreihe zur Testtheorie der speziellen Relativitätstheorie von Mansouri und Sexl [MS77a] ausgeführt. Dort heißt es auf S. 503

... We thus arrive at the remarkable result that *a theory maintaining absolute simultaneity is equivalent to special relativity.* ...

und auf S. 505

... we may say that the following statement is in perfect agreement with all

experimental evidence: A preferred system of reference, the ether system, exists.

Dies ist insofern relevant, weil Reinhardt et al. [RSB*07] sich auf genau diese Testtheorie beziehen [MS77b, MS77a]. Für Annahme oder Ablehnung eines primordialen Hintergrundfeldes ist das Experiment also nicht (sic!) geeignet. Es ist außerdem nicht geeignet, Anisotropien der Lichtgeschwindigkeit zu detektieren. Im Artikel zur Anpassung der Testtheorie für die Doppler-Spektroskopie von Kretzschmar [Kre92], auf den sich Reinhardt et al. ebenfalls berufen, kann man im Abstract zu Ives-Stilwell-Experimenten lesen

... These experiments by themselves are not sufficient for a direct observation of such an anisotropy.

Eindeutig messen kann man jedoch wie gezeigt die Veränderung des Absorptionsverhaltens der ${}^7\text{Li}^+$ -Ionen, wenn sie sich mit hoher Geschwindigkeit durch ein Laser-Spektroskop bewegen. Wie sieht es jedoch mit der Interpretation dieser Veränderung aus?

4.2. Ätherreibung als Alternative zur Zeitdilatation

Da man einen absoluten Hintergrund weder theoretisch noch experimentell ausschließen kann, darf man ihn zur versuchsweisen Neu-Interpretation des Doppler-Effektes als existent annehmen. Ein zeitdilationsbedingter Doppler-Effekt wäre demnach mathematisch denkbar, aber physikalisch keine Notwendigkeit. Die Lichtgeschwindigkeit könnte dann eine relative Größe in Abhängigkeit eines absoluten Hintergrundes sein. Ein sehr vereinfachter erster Ansatz ist die Übertragung des Licht-Dopplereffektes auf das akustische Analogon. Die beschleunigten Ionen würden dann nicht die in Gl. (1) und (2) berechneten Werte sehen, sondern stattdessen wie im akustischen Dopplereffekt die Frequenzen

$$\nu_{0,p}^* = \nu_p \frac{c+v}{c} = \nu_p(1+\beta) \quad (5)$$

beziehungsweise

$$\nu_{0,a}^* = \nu_a \frac{c-v}{c} = \nu_a(1-\beta). \quad (6)$$

Abbildung 3 zeigt einen Vergleich dieser Gleichungen mit (1) und (2). Sie unterscheiden sich nur im Lorentz-Faktor $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$.

Offensichtlich erfüllt der akustische Doppler-Effekt nicht mehr die Reziprozitätsbedingung (3). Eine Reziprozität wurde allerdings experimentell als Absorptionsmaximum *gemessen*. Daher ist real ein symmetrisierender Faktor existent, und der Lorentz-Faktor γ *quantifiziert* offenbar die Verschiebung des Absorptionsmaximums. Der Faktor allein lässt aber keine Aussage zu über die Art der Veränderungen, die sich an den beschleunigten Ionen ereignen. Der Lorentz-Faktor *qualifiziert* die Verschiebung *nicht*, genauso wenig wie irgendein anderer mathematischer Faktor. Es ist möglich, die Symmetrie des Effektes als Zeitdilatation zu qualifizieren bzw. zu interpretieren. Das ist auch die bekannte und zulässige Interpretation. Aber: diese Interpretation entzieht

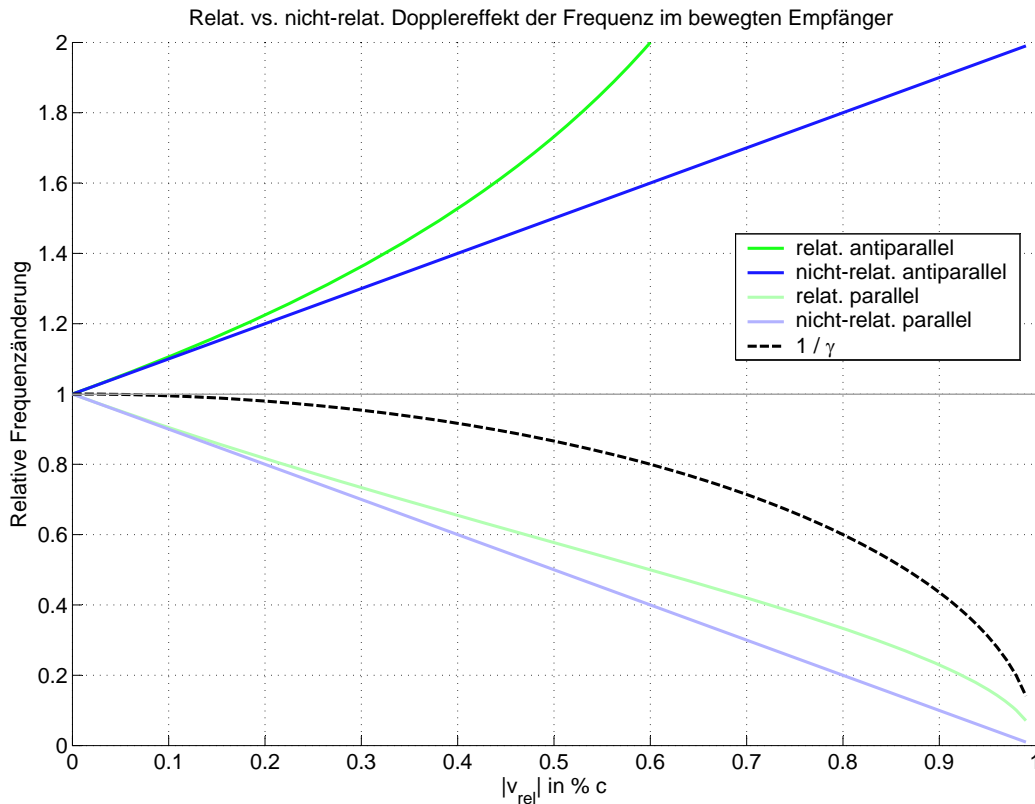


Abbildung 3: Vergleich der relativen Frequenzänderung beim relativistischen und nicht-relativistischen Doppler-Effekt. (Korrektur der x-Achsenbeschriftung: Statt „ $|v_{rel}|$ % c“ muss es „ $|v_{rel}|$ in Anteilen von c“ heißen.)

sich im vorliegenden Experiment der direkten Überprüfbarkeit. Die Zeitdilatation ist dort nur mögliche Hypothese, aber keine bewiesene oder überhaupt getestete Theorie.

Der Aussagekraft und insbesondere der Schlußfolgerung von [RSB*07] und zahlreichen weiteren Arbeiten ist damit der Boden entzogen. Die spezielle Relativitätstheorie ist mit diesen Arbeiten weder bewiesen noch widerlegt, sondern schlicht nicht getestet worden, so unbequem dieser Befund auch sein mag. Getestet wurde lediglich die Größe des Lorentz-Faktors.

Man darf folglich frei spekulieren, was die Veränderung an der Li-Linie verursacht hat. Die Grundfrequenz muss offenbar um den Faktor $1/\gamma$ verstimmt sein, also

$$\nu_0 \rightarrow \nu_0^*(v) = \frac{\nu_0}{\gamma} \quad (7)$$

Dann treffen parallele und antiparallele Strahlen symmetrisch auf die gleiche, geschwindigkeitsabhängige Absorption wie es auch in Abbildung 3 durch die $1/\gamma$ -Kurve angedeutet ist. Diese Kurve liegt die symmetrisch zwischen den nicht-relativistisch verstimmt parallel und antiparallelen Frequenzen. Mit Gleichung (7) werden (5) und (6) identisch zu (1) und (2).

Die Verstimmung ist dabei nur vom Betrag der Geschwindigkeit abhängig. Es liegt daher nahe, ein Reibungsphänomen mit dem Hintergrundfeld zu postulieren, oder genauer eine *Äther-Reibung*. Das Absorptionsverhalten der Ionen wäre demnach von einer Bewegung gegenüber einem absoluten Hintergrund abhängig. Diese sehr ungewohnte Interpretation ist experimentell nicht von der Zeitdilatation unterscheidbar. Diese Deutung ist lediglich eine konkrete Ausgestaltung einer mathematischer Unbestimmtheit. Weder die mathematische Theorie, noch das physikalische Experiment können eindeutig bestimmen, welche Deutung zutreffend ist. Die Bevorzugung einer Deutung bedarf grundsätzlich anderer Argumente. Argumente für oder gegen Deutungen liegen meistens jenseits des jeweils akademisch diskutierten Rahmens.[†]

Ein gutes Argument für die Ätherreibungs-Deutung ist zum Beispiel die Beobachtbarkeit der Myonen auf der Erde. Die Zeitdilatationshypothese kann nicht erklären, warum die Myonenlebensdauer gedehnt sein sollte, während *asymmetrisch* dazu auf der Erde die Zeit normal weiterläuft. Ein schwaches Argument für die Zeitdilatations-Hypothese ist die bald ein Jahrhundert währende Gewohnheit der akademischen Physik, die sich bis tief in sämtliche Theoriegebäude und Ausbildungscurricula geschlichen hat. Was, wenn es sich hier um eine einseitige Fixierung handelt?

5. Schlußfolgerung

In diesem Aufsatz wurde gezeigt, dass der relativistische Doppler-Effekt eine mögliche, aber keine zwingende Interpretation der Lichtabsorptionsänderung bewegter Ionen ist. Eine alternative Sichtweise kann die Absorptionsänderung als Reibung mit einem Hintergrundfeld - dem Äther - erklären. Keine der beiden Sichtweisen ist durch experimentelle oder theoretische Argumente innerhalb des Experiments bevorzugt.

Darüberhinaus ist es eine völlig offene Frage, warum der Äther eine derart geschmähte Schattenexistenz führen muss in der akademischen Physik. Die Ablehnung des Äthers ist aus mindestens zwei Gründen bedauerlich. Erstens erzwingt sie eine Irrtumsunterstellung für ein Vielzahl sorgfältige klassische Experimente, wie z.B. die der Ätherdrift-Experimente von Miller [Mil33] durch Shankland et al. [SMLK55]. Und zweitens könnte es sein, dass der starre Dogmatismus in der Äther-Ablehnung den Weg zu einer längst überfällige Erneuerungen des physikalischen Weltbildes versperrt. Womöglich liegt in einem unvereinigten Verständnis des Hintergrundfeldes sogar der Schlüssel zur Überwindung der heutigen ökologischen und ökonomischen Krise.

Literatur

- IS38. IVES H. E., STILWELL G.: An experimental study of the rate of a moving atomic clock. *J. Opt. Soc. Am.* 28, 7 (1938), 215–226.
- Kre92. KRETZSCHMAR M.: Doppler spectroscopy on relativistic particle beams in the light of a test theory of special relativity. *Z. Phys. A* 342, 2 (1992), 463–469.

[†]Im günstigsten Fall innerhalb der Disziplin, ungünstiger in einer Nachbardisziplin, und am ungünstigsten außerhalb der Wissenschaft.

- Mil33. MILLER D. C.: The ether-drift experiment and the determination of the absolute motion of the earth. *Rev. Mod. Phys.* 5, 3 (1933), 203–242.
- MS77a. MANSOURI R., SEXL R.: A test theory of special relativity: I. simultaneity and clock synchronization. *Gen. Rel. Grav.* 8 (1977), 497–513.
- MS77b. MANSOURI R., SEXL R.: A test theory of special relativity: Iii. second order tests. *Gen. Rel. Grav.* 8 (1977), 809–814.
- NBE*07. NOVOTNY C., BERNHARDT B., EWALD G., GEPPERT C., GWINNER G., HÄNSCH T. W., HOLZWARTH R., HUBER G., KARPUK S., KLUGE H. J., KÜHL T., NÖRTERSHÄUSER W., REINHARDT S., SAATHOFF G., SCHWALM D., UDEM T., WOLF A.: Experimental test of special relativity by laser spectroscopy. In *LASER 2006*, Blaszcak Z., Markov B., Marinova K., (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 57–67.
- RGK*98. RONG H., GRAFSTRÖM S., KOWALSKI J., NEUMANN R., ZU PUTLITZ G.: A new precise value of the absolute $2^3S_{1,F=5/2}-2^3P_{2,F=7/2}$ transition frequency in $^7\text{Li}^+$. *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics* 3 (1998), 217–222.
- RSB*07. REINHARDT S., SAATHOFF G., BUHR H., CARLSON L. A., WOLF A., SCHWALM D., KARPUK S., NOVOTNY C., HUBER G., ZIMMERMANN M., HOLZWARTH R., UDEM T., HÄNSCH T. W., GWINNER G.: Test of relativistic time dilation with fast optical atomic clocks at different velocities. *Nature Physics* 3 (2007), 861–864.
- SBB*08. SALART D., BAAS A., BRANCIARD C., GISIN N., ZBINDEN H.: Testing the speed of „spooky action at a distance“. *Nature* 454 (2008), 861–864.
- SMLK55. SHANKLAND R. S., MCCUSKEY S. W., LEONE F. C., KUERTI G.: New analysis of the interferometer observations of dayton c. miller. *Rev. Mod. Phys.* 27, 2 (1955), 167–178.