

Einstein und die Sonnenphysik

Hubertus Wöhl

Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik

Warum EINSTEINJAHR 2005 ?

Albert Einstein (1879-1955) starb vor 50 Jahren und vor 100 Jahren hatte er sein „Wunderjahr“, in dem er fünf wichtige Publikationen einreichte. Diese machten ihn in den darauf folgenden Jahrzehnten zum bedeutendsten Physiker des 20. Jahrhunderts.



Der nachfolgende Vortrag ist ein Beitrag unseres Instituts zum
EINSTEINJAHR 2005

Einstein und die Sonnenphysik

Einsteins physikalische Theorien stehen in engem Zusammenhang mit der in unserem Institut betriebenen Sonnenphysik: Wir versuchen, die physikalischen Vorgänge in und auf der Sonne zu verstehen.

Hier will ich mich auf die Erläuterung von drei Teilansätzen aus den bekanntesten Theorien Einsteins, der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie, beschränken. Dazu werden jeweils nur die Aussagen Einsteins, aber nicht die theoretischen Ableitungen gegeben.

Zu jeder Darlegung sind weiterführende gedruckte Literaturquellen, die in der Bibliothek des KIS vorhanden sind und Seiten im World Wide Web angegeben.

Ausgewählte Themen

- Sonnenenergie
- Gravitationsrotverschiebung
- Gravitationswellen

Sonnenenergie

Anfang des 20. Jahrhunderts war zwar die gewaltige Energieerzeugung in Sternen – also auch in der Sonne – schon bekannt. Wie diese prinzipiell erzeugt wird, folgert aus der berühmten Einstein'schen Formel:

$$E = m c^2$$

in Worten: Energie ist Masse mal Lichtgeschwindigkeit ins Quadrat

Bei Einstein lautete die Formel anders und er dachte dabei gar nicht an die Sonne:

A.Einstein: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig ?

Annalen der Physik, Band 18, S.641 tw. (1905)

Aus dieser Gleichung folgt unmittelbar:

offenbar unwesentlich, daß die dem Körper entzogene Energie gerade in Energie der Strahlung übergeht, so daß wir zu der allgemeineren Folgerung geführt werden:

Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt; ändert sich die Energie um L , so ändert sich die Masse in demselben Sinne um $L/9 \cdot 10^{20}$, wenn die Energie in Erg und die Masse in Gramm gemessen wird.

Wenn die Theorie den Tatsachen entspricht, so überträgt die Strahlung Trägheit zwischen den emittierenden und absorbierenden Körpern.

Bern, September 1905.

(Eingegangen 27. September 1905.)

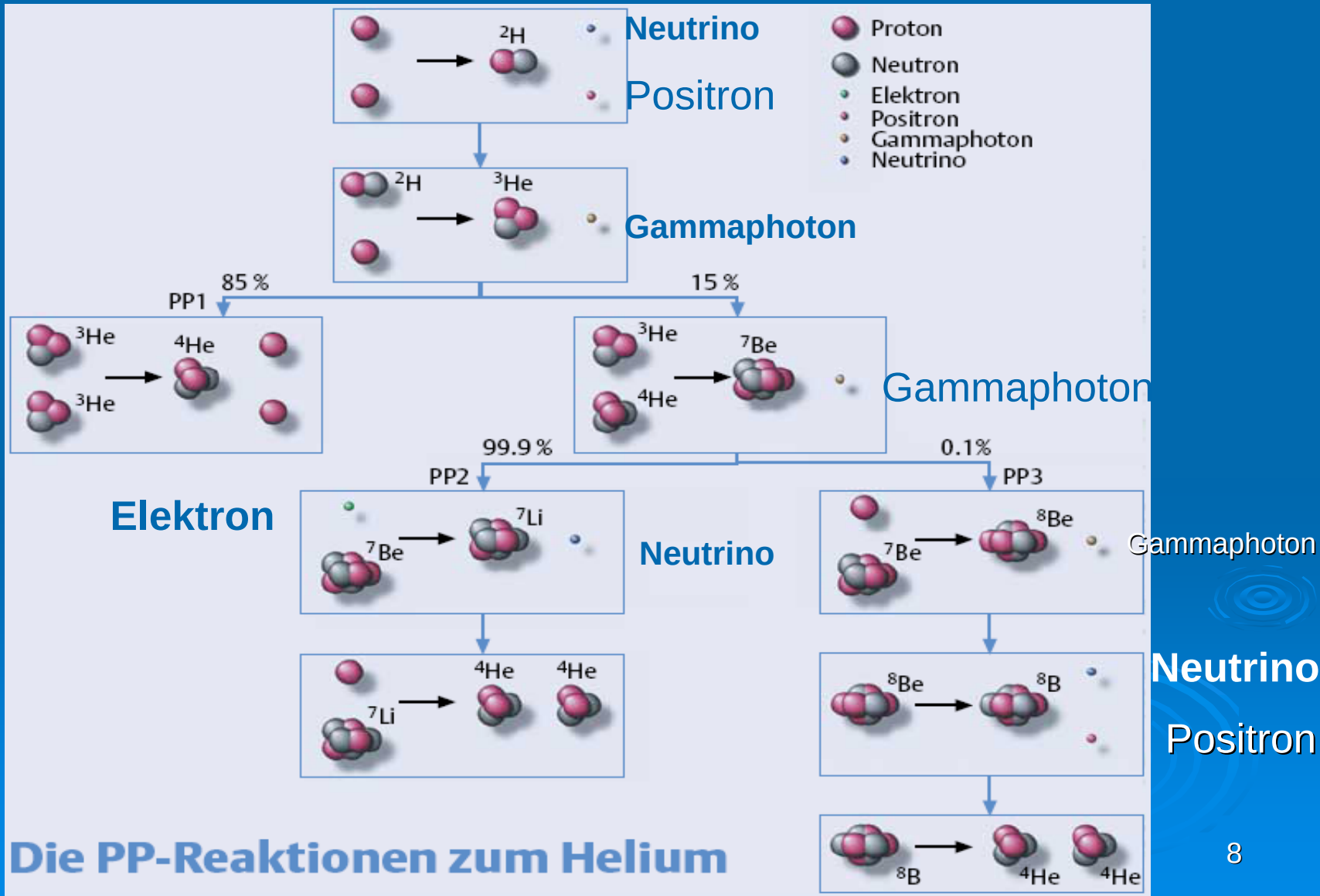
Sonnenenergie

Die Erkenntnis, dass Massendifferenzen zwischen 4 Protonen und einem Heliumkern ausreichen, die solare Energieerzeugung zu erklären, kam erst vor ca. 80 Jahren – mit genaueren Vorstellungen über Reaktionsketten sogar erst seit weniger als 70 Jahren durch **C.F. von Weizsäcker** für den CNO-Zyklus und **H.Bethe** und **C.Critchfield** für den pp-Zyklus.

Heute wissen wir, dass in der Sonne fast 99 % der Energie in dem pp-Zyklus freigesetzt werden:

Hauptreaktionsketten beim p-p-Zyklus

aus M.Stix: „Jagd auf die Sonnen-Neutrinos“ (ergänzt)
in: STERNE UND WELTRAUM SPECIAL 4, S.100 (Juli 1999)



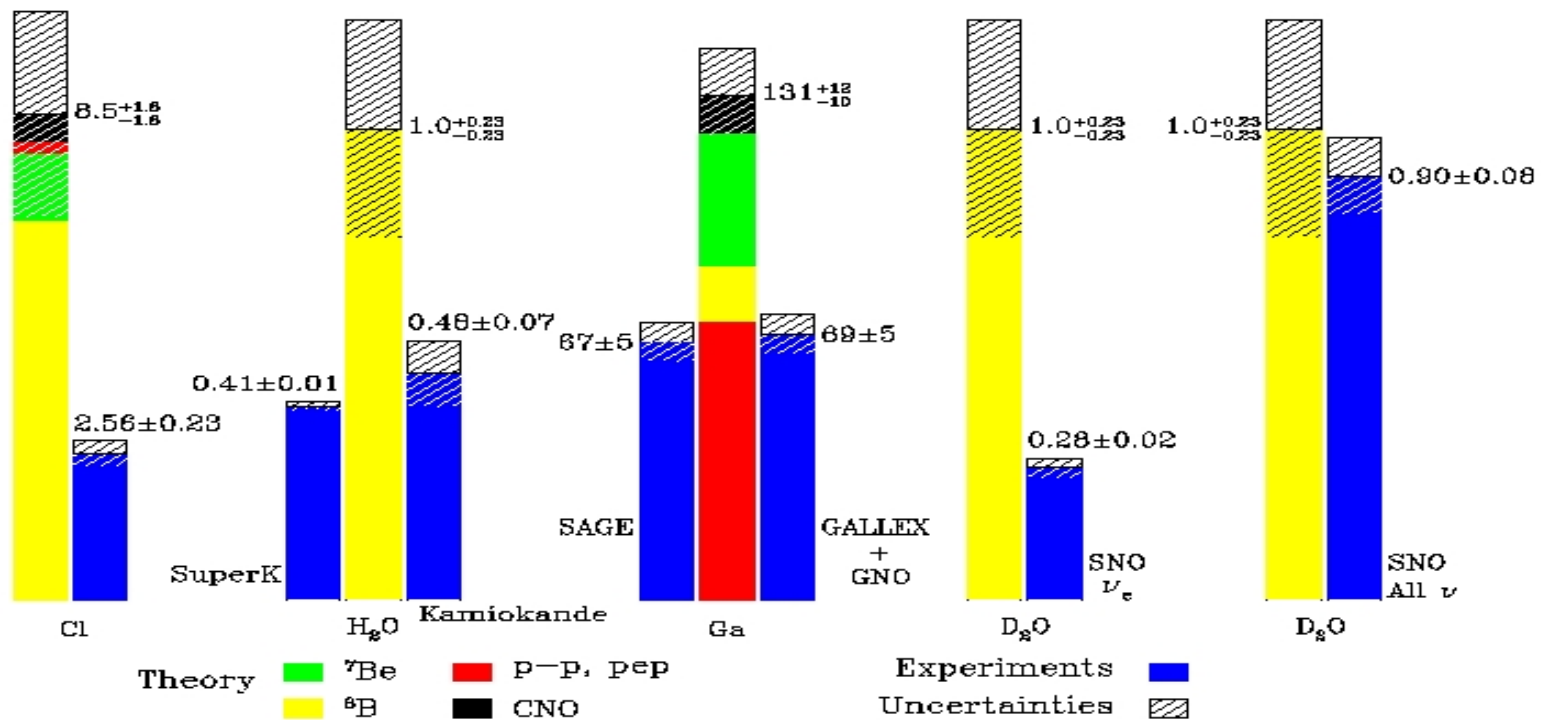
Das Neutrino-Problem

Die in den Reaktionen vorkommenden Neutrinos wurden zuerst – 1930 – von W.Pauli theoretisch gefordert. Sie wurden erst Jahrzehnte später nachgewiesen. Dann begann mit den Messungen der Neutrino-Flüsse von der Sonne durch R.Davis Jr. (Nobelpreis 2002) ab 1968 die „Neutrino-Astronomie“. Das **Neutrino-Problem** war, dass man jahrzehntelang weniger Neutrinos fand, als aus den Sonnenmodellen berechnet wurden.

Erst seit einigen Jahren finden neueste Detektoren, die alle Neutrinos verschiedener Energien und Typen nachweisen können, eine gute Übereinstimmung von Theorie und Beobachtungen.
Folgerungen: Neutrinos sind nicht masselos...

Neutrinos: Modelle vs. Experimente aus WWW-Seiten von J.N.Bahcall

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2004



weiterführende Informationen

Literaturempfehlungen:

M.Stix: Jagd auf die Sonnen-Neutrinos, im SPECIAL 4 der Zeitschrift STERNE und WELTRAUM zur Sonnenfinsternis 1999, S.99-102 (1999)

M.Stix: The Sun, 2nd ed.,(Berlin, Heidelberg, 2002)

WWW:

Bahcall's Seiten: www.sns.ias.edu/~jnb/Papers/popular.html

Gravitationsrotverschiebung

Das zweite Beispiel von Einstein's Einfluss auf die Sonnenphysik betreffen Vorhersagen aus der allgemeinen Relativitätstheorie, die er in einer Arbeit gegeben hat.

Nachfolgend werden erst wieder die Quellen gegeben – allerdings nicht in derselben Reihenfolge wie in Einstein's Publikation:

A.Einstein: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie

Annalen der Physik, Band 49, S.822 tw. (1916)

Die Anfang des 20. Jahrhunderts schon bekannte Abweichung der Beobachtung der Perihel-Drehung der Merkurbahn von der Newton'schen Vorhersage konnte Einstein unmittelbar erklären:

Die Rechnung ergibt für den Planeten Merkur eine Drehung der Bahn um $43''$ pro Jahrhundert, genau entsprechend der Konstatierung der Astronomen (Leverrier); diese fanden nämlich einen durch Störungen der übrigen Planeten nicht erklärbaren Rest der Perihelbewegung dieses Planeten von der angegebenen Größe.

A.Einstein: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie

Annalen der Physik, Band 49, S.822 tw. (1916)

Die Ablenkung eines (Sternen-)Lichtstrahls beim nahen Vorbeigang an der Sonne prognostizierte Einstein zu dem doppelten des Wertes, den die Newton'sche Gravitationstheorie ergab. Die Bestätigung dieses Wertes durch den Engländer Eddington aus Vermessungen eines Sternfeldes vor und nach einer Sonnenfinsternis 1919 begündete Einsteins populären Weltruhm.

Ein an der Sonne vorbeigehender Lichtstrahl erfährt demnach eine Biegung von $1,7''$, ein am Planeten Jupiter vorbeigehender eine solche von etwa $0,02''$.

A.Einstein: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie

Annalen der Physik, Band 49, S.820 tw. (1916)

Die Vorhersage dessen, was wir heute Gravitationsrotverschiebung nennen, war eine Folge aus der allgemeinen Relativitätstheorie, deren Nachweis viele Jahrzehnte dauerte.

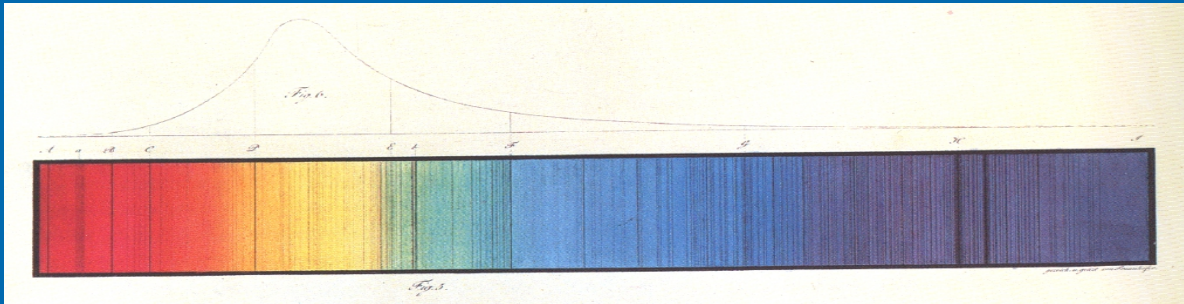
Die Uhr läuft also langsamer, wenn sie in der Nähe ponderabler Massen aufgestellt ist. Es folgt daraus, daß die Spektrallinien von der Oberfläche großer Sterne zu uns gelangenden Lichtes nach dem roten Spektralende verschoben erscheinen müssen.¹⁾

1) Für das Bestehen eines derartigen Effektes sprechen nach E. Freundlich spektrale Beobachtungen an Fixsternen bestimmter Typen. Eine endgültige Prüfung dieser Konsequenz steht indes noch aus.

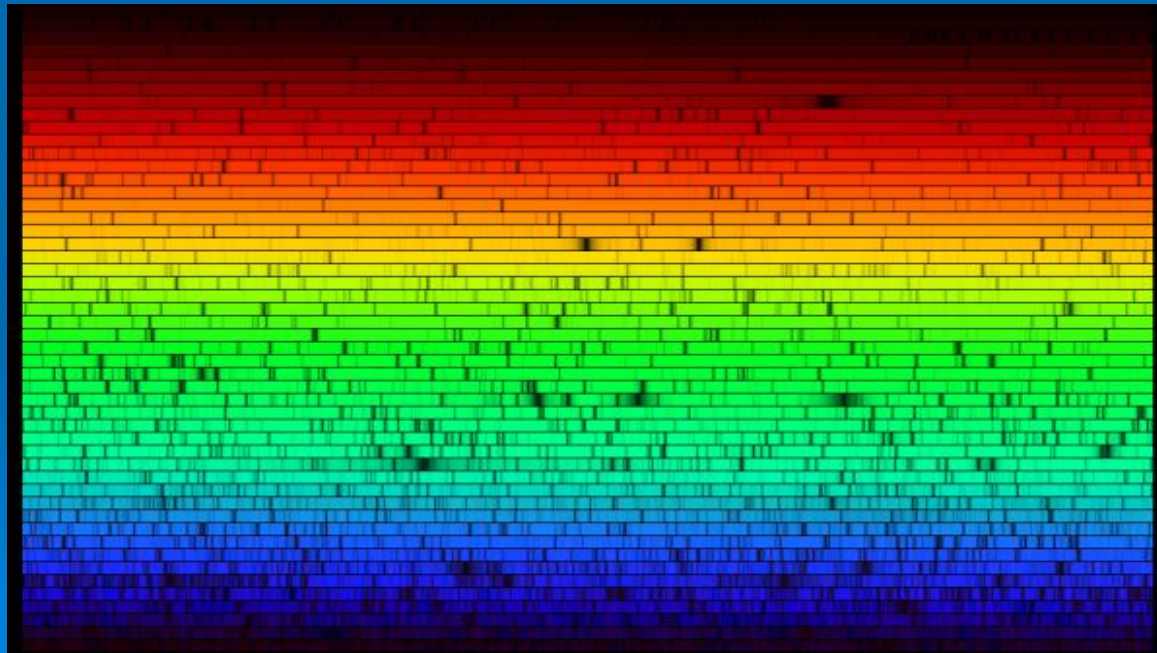
Gravitationsrotverschiebung und Mitte-Rand-Variation (MRV) von Spektrallinienpositionen

Es gab tatsächlich bald Versuche, die Gravitationsrotverschiebung von solaren Spektrallinien zu bestimmen. Allerdings gab es eine Überraschung: Die Linien waren im Zentrum der Sonnenscheibe entweder gar nicht oder eher nach blau verschoben und nur am Rand der Sonnenscheibe gab es die erwartete Rotverschiebung. Die Ursachenforschung dauerte Jahrzehnte und ist auch heute noch ein Forschungsthema.

Einschub: Sonnenspektrum Spektrallinien



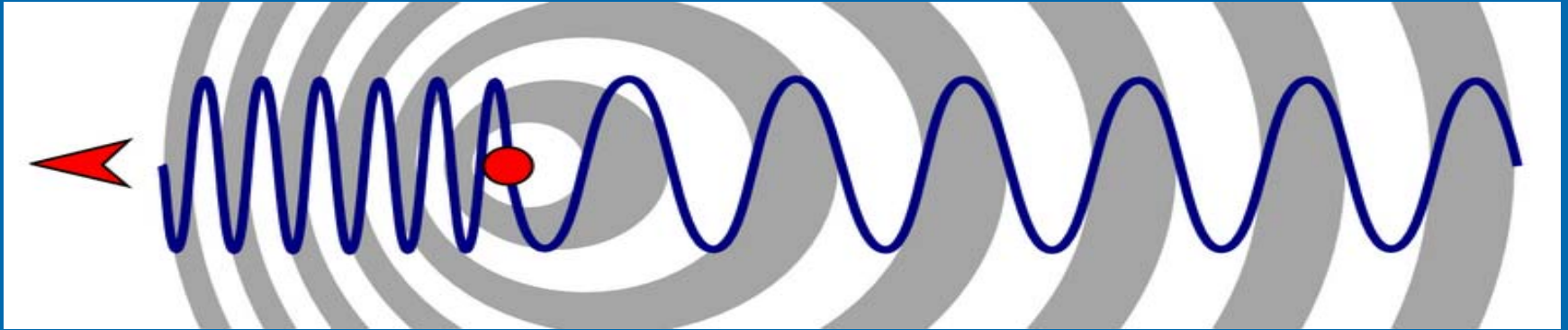
Entdeckung der dunklen
Linien im Sonnenspektrum
durch W.H.Wollaston 1802
Zeichnung links von
J.v.Fraunhofer 1814



Hochaufgelöstes Sonnen-
Spektrum (Zeilen hinter-
einander zu verbinden)
vom
National Solar Observatory
(NSO) USA

(www.noao.edu)

Einschub: Doppler-Effekt



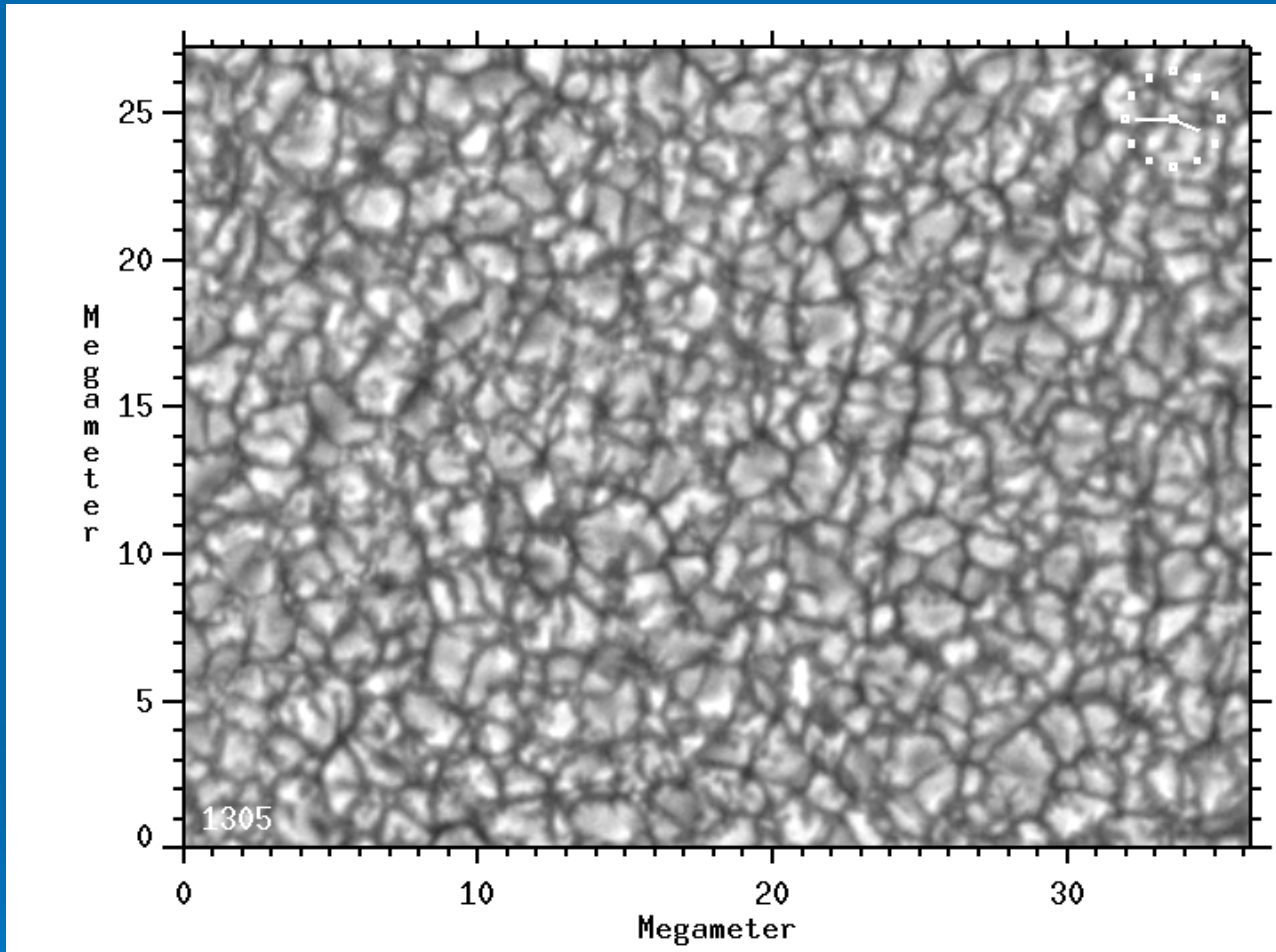
Nach Christian Doppler (1803-1853), einem österreichischen Mathematiker und Physiker, der den Effekt zuerst auf Schallwellen anwendete, der aber auch für Licht gilt:

Für Geschwindigkeiten klein gegen die Lichtgeschwindigkeit verschieben sich die Spektrallinien proportional zur Relativgeschwindigkeit zwischen Quelle und Beobachter durch den Doppler-Effekt:

Wellenlängenverschiebung = $\text{Geschwindigkeit} \cdot \text{Wellenlänge} / \text{Lichtgeschwindigkeit}$

Mit sehr gut auflösenden Spektrometern können Fußgängergeschwindigkeiten auf der Sonne – wenige Meter pro Sekunde – gemessen werden.

Einschub: solare Granulation (1)



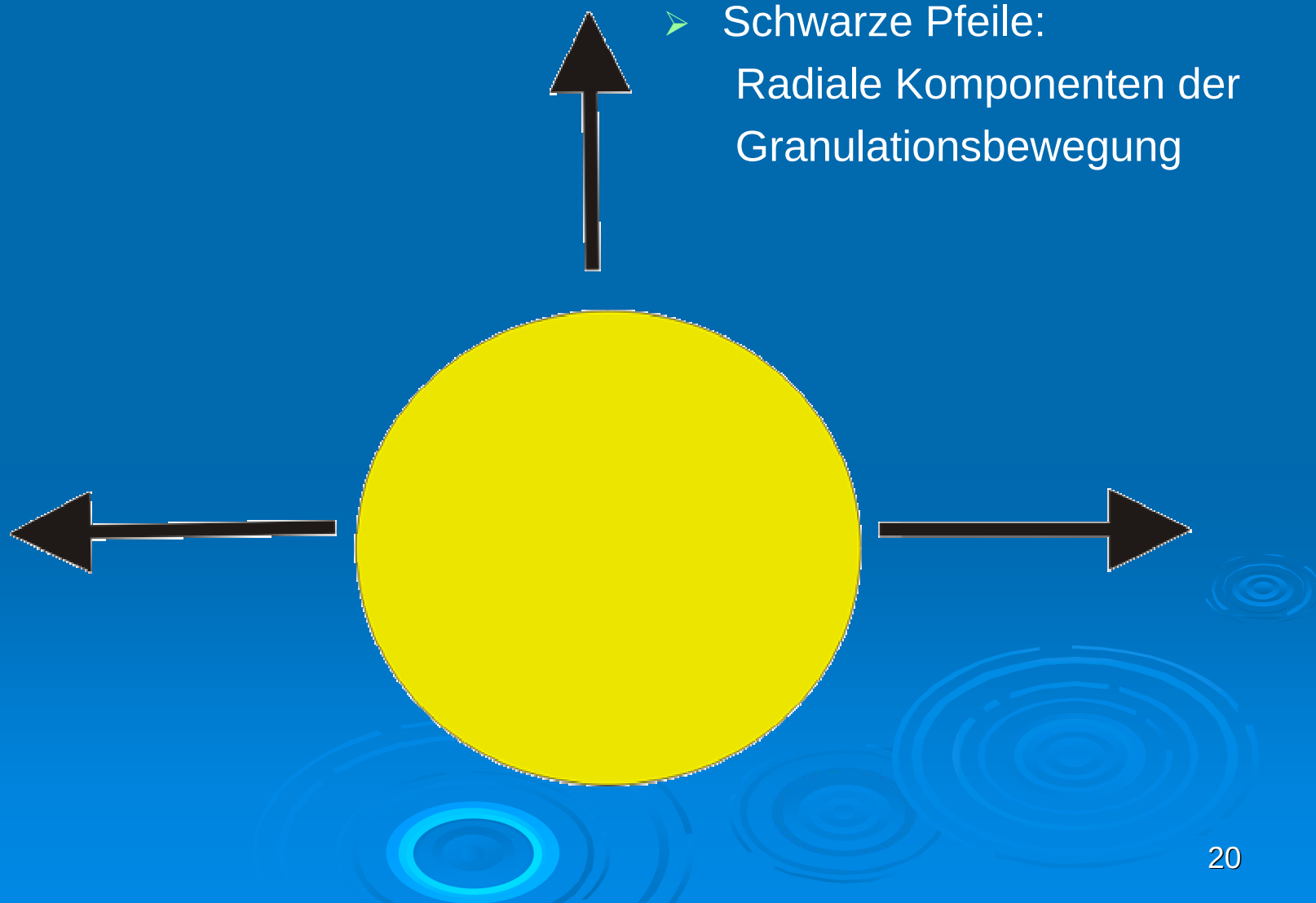
Granulendurchmesser:
250 km bis 2000 km
im Mittel 1300 km

Lebensdauer der
einzelnen Granulen:
8 bis 15 Minuten

Aufstiegeschwindig-
keit: ca. 1 bis 2 km/s

Solare Granulation aus den www-Seiten von Peter N. Brandt (KIS)
(1 Megameter = 1 000 km)

Einschub: solare Granulation (2)



Gravitationsrotverschiebung

aus Wöhl (2001)

Historic models

The Einstein shift of solar spectral lines is given by

$$\Delta\lambda \lambda^{-1} = GM R^{-1} c^{-2} = 2.12 \times 10^{-6}$$

with G the constant of gravitation, M the solar mass, R the solar radius and c the velocity of light. For all absolute

Die Gravitationsrotverschiebung entspricht als Dopplerverschiebung einer von uns weggerichteten Geschwindigkeit von 636 m/s. Sie ist also klein gegen die Geschwindigkeit der Sonnenrotation von ca. 2000 m/s am Äquator und auch gegen vertikale Strömungen in der Sonnenatmosphäre.

Gravitationsrotverschiebung

Einstein - Verschiebungswert

Werte nach Stix (2002):

$$G = (6.67259 \pm 0.00085) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$M = (1.9889 \pm 0.0003) \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$R = (6.960 \pm 0.001) \cdot 10^8 \text{ m}$$

$$c = 299792458 \text{ m/s}$$

$$\Delta \lambda / \lambda = G \cdot M \cdot R^{-1} \cdot c^{-2} =$$

$$2.1216 \cdot 10^{-6}$$

Gravitationsrotverschiebung

Beispielrechnung

Wellenlänge einer Spektrallinie: 500 nm

Gravitationsrotverschiebung:

$$500 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 2.12 \cdot 10^{-6} = 1.06 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 1.06 \text{ pm}$$

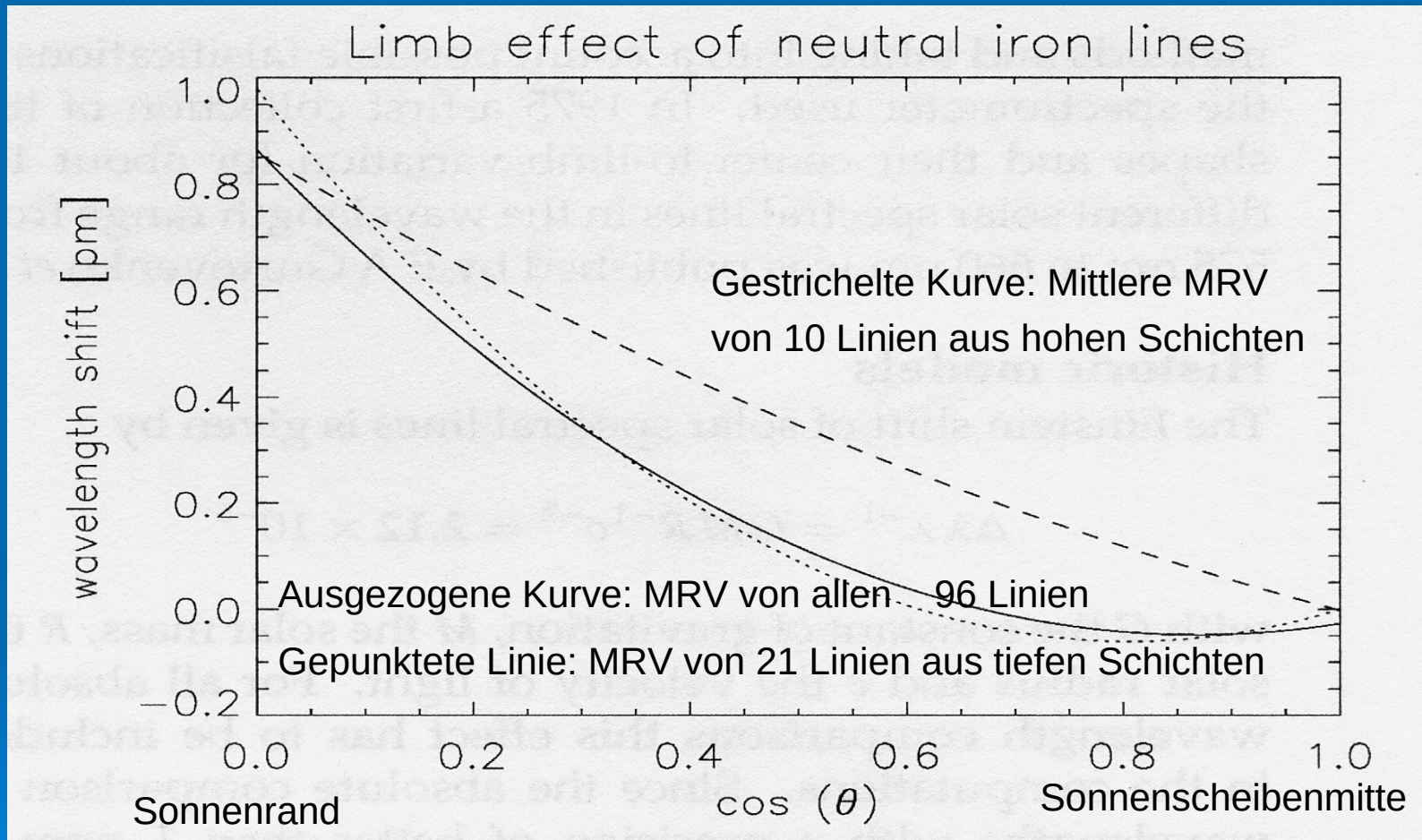
Äquivalente Dopplerverschiebung:

$$v = c \cdot \Delta \lambda / \lambda =$$

$$299\,792\,458 \text{ m/s} \cdot 1.06 \cdot 10^{-12} \text{ m} / 500 \cdot 10^{-9} \text{ m} =$$

$$636 \text{ m/s}$$

Mitte-Rand-Variation (MRV) von Eisenlinien aus Wöhl (2001) mit deutschen Ergänzungen



Wellenlängenverschiebung um 1 pm = 1 Pikometer = 10^{-12} m

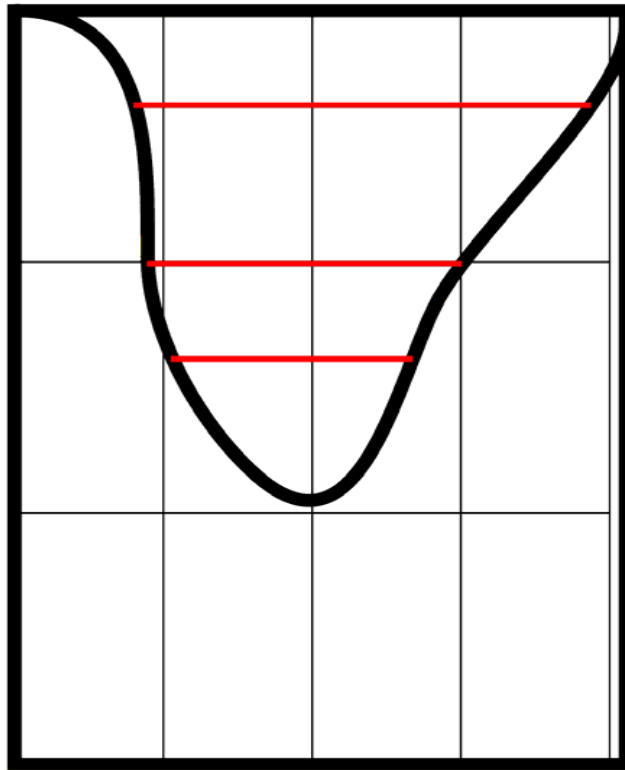
Prinzipielle Erklärung der MRV solarer Spektrallinien

Aufsteigendes heißes Gas in Granulen kompensiert bzw. überkompensiert die Gravitationsrotverschiebung in Sichtlinie im Sonnenscheibenzentrum durch den Doppler-Effekt. Am Sonnenscheibenrand findet man ungefähr den erwarteten Rotverschiebungswert, weil dort die Bewegungskomponente überwiegend senkrecht zur Sichtlinie liegt. Im Detail aber viel komplizierter wegen der verschiedenen Linienentstehungsbereiche in Höhe und der (variablen ?) Strömungsfelder.

Analysen mit Modellen für Bisektoren von Spektrallinien:

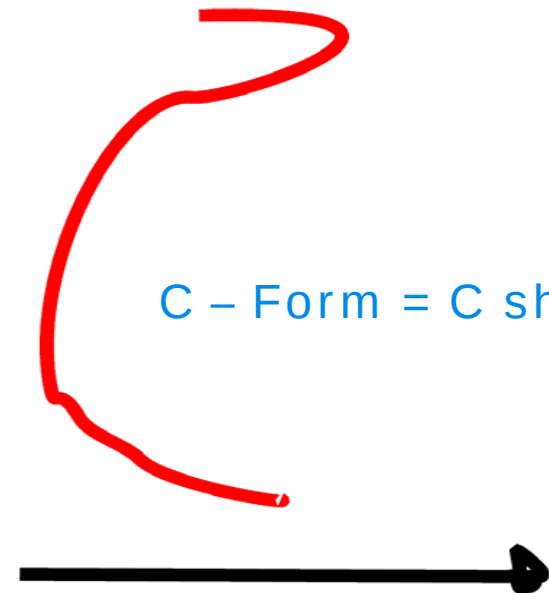
Bisektor-Demo

Asymmetrische Spektrallinie



Wellenlaenge

Bisektor der Spektrallinie



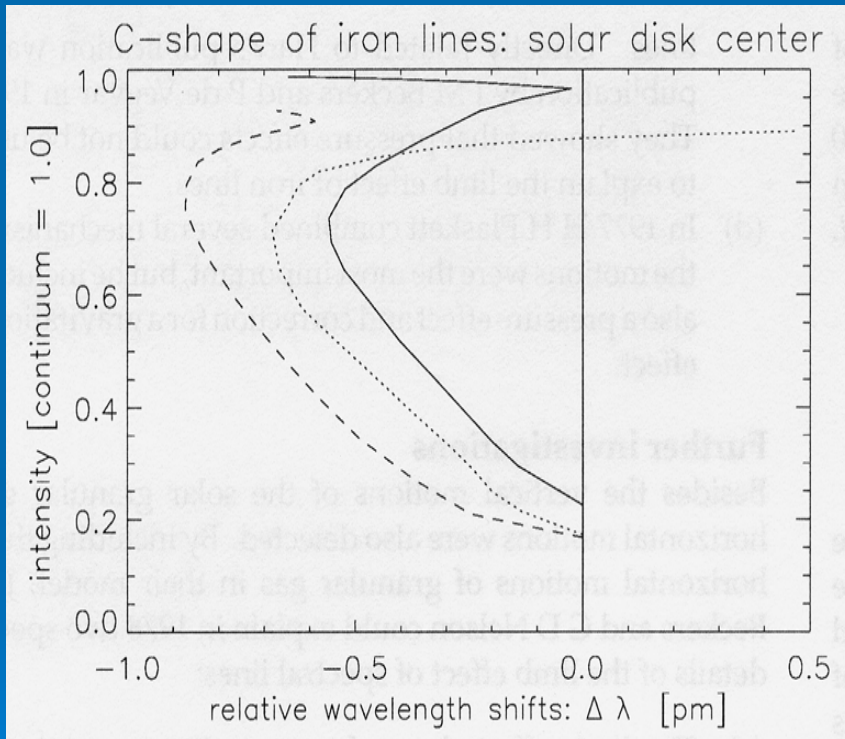
C – Form = C shape

Wellenlaengenskala

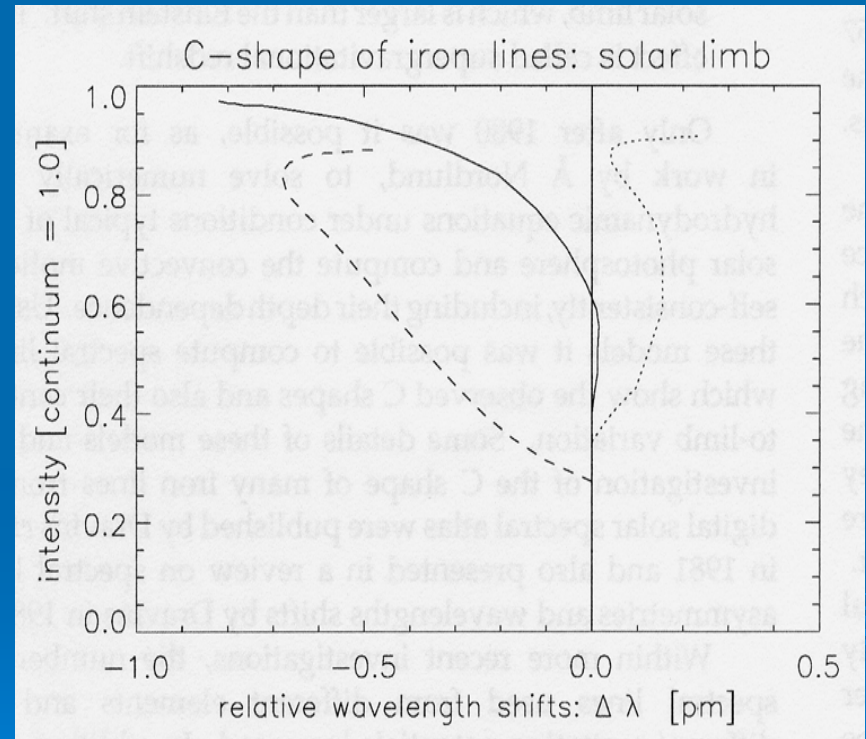
mit hoher Aufloesung

Bisektorformen aus Wöhl (2001)

Sonnenscheibenzentrum

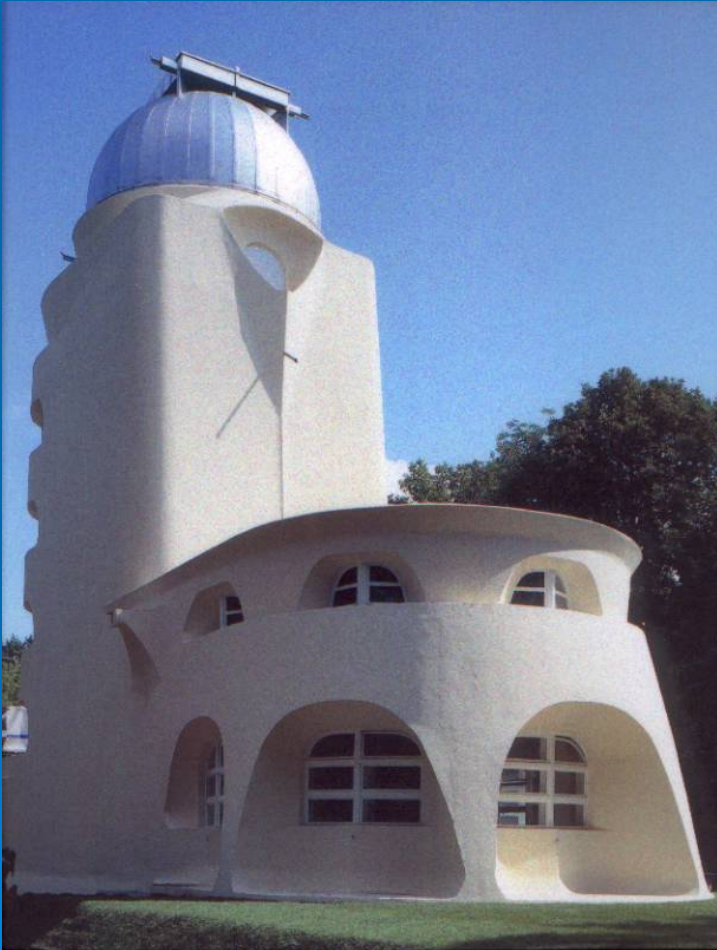


Sonnenrand ($\cos(\theta) = 0.112$) = 99.4%
des Sonnenradius zum Rand



ausgezogene Linie: 524.25 nm – gepunktete Linie: 507.47 nm – gestrichelte Linie: 507.97 nm

Einstein-Turm



1921 bis 1924 wurde der Einstein-Turm auf dem Telegrafenberg in Potsdam errichtet. Der Architekt war Erich Mendelssohn. Das Teleskop fertigte – wie später für den Schauinsland – ZEISS in Jena. Das angestrebte Ziel war der Nachweis der Gravitationsrotverschiebung solarer Spektrallinien.

Einstein-Turm und Gravitationsrotverschiebung

Die zuletzt erwähnten Untersuchungen waren vor über 80 Jahren, als der Einstein-Turm als Sonnen-Observatorium in Potsdam erstellt wurde, noch nicht möglich. Sie wurden erst um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts – allerdings am Einstein-Turm – begonnen: Etwa von meinem eigenen „Doktor-Vater“ und späteren Direktor des KIS, dem 2002 verstorbenen E.H.Schröter (1957).

weiterführende Informationen (1)

Literaturempfehlungen:

J.M. Beckers: Sunspots, gravitational redshift and exo-solar planet detection, in: Wittmann, A.D., Wolfschmidt, G., Duerbeck, H.W. (Hg.): Development of solar research, Acta Historica Astronomiae vol.25, 285-297 (2005)

J.W.Brault: The gravitational redshift in the solar spectrum, Doktorarbeit, Princeton, (New Jersey, 1962)

K.Hentschel: Zum Zusammenspiel von Instrument, Experiment und Theorie – Rotverschiebung im Sonnenspektrum und verwandte spektrale Verschiebungs-Effekte von 1880 bis 1960, Habilitationsschrift, (Hamburg,1998)

weiterführende Informationen (2)

Literaturempfehlungen (Fortsetzung):

E.H.Schröter: Zur Deutung der Rotverschiebung und Mitte-Rand-Variation der Fraunhoferlinien bei Berücksichtigung der Temperaturschwankungen der Sonnenatmosphäre, Zeitschrift für Astrophysik 41, 141-181 (1957)

H.Wöhl: Solar Photosphere: The limb effect and gravitational redshift, in Murdin, P. et al. (Hg.): Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, S. 2672-2675, (London, 2001)

Astrophys.Inst.Potsdam(Hg.): Der Einsteinturm in Potsdam, (1995)

WWW-Seiten: www.aip.de

Gravitationswellen

Aus der Einstein'schen Gravitationstheorie folgt, dass sich durch Massenverlagerungen die Raumstruktur auch sehr entfernt ändern soll. Als mögliche Ursache für nachweisbare Gravitationswellen wurden **anfangs Eruptionen auf der Sonne** angesehen. Heute denkt man bei Quellen nachweisbarer Gravitationswellen eher an Sternmasse, die in ein „schwarzes Loch“ stürzt.

Gravitationswellen

Erste Nachweisversuche mit Probemassen, deren Abstände sich ändern sollen und möglichen Schwingungen von Resonanzkörpern gab es schon vor Jahrzehnten: Besonders bekannt wurde der amerikanische Forscher John Weber, der jahrzehntelang behauptete, Gravitationswellen durch Paare von räumlich weit entfernten Detektoren nachgewiesen zu haben.

Damals wie heute, meinen aber die meisten Forscher, dass Zufallsbewegungen („Rauschen“) die Ursache seiner Nachweise waren.

Gravitationswellen

Immerhin wurde schon ein Nobelpreis vergeben für den indirekten Nachweis der Gravitationswellen – nämlich 1993 an **Russell A. Hulse** und **Joseph H. Taylor, Jr** . Sie fanden zwischen 1974 und 1978, dass die periodische Radiostrahlung eines speziellen Pulsars (PSR 1913 + 16) sich langsam veränderte. Die Frequenzänderung konnte mit der Abstrahlung von Energie durch Gravitationswellen erklärt werden.

Gravitationswellen

Der Nachweis von Gravitationswellen ist bisher nicht gelungen. Es gibt mehrere große LASER-Strecken, mit denen dies angestrebt wird – u.a. in Deutschland in der Nähe von Hannover. Die größte Kooperation hat das LIGO (=Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) mit zwei jeweils 4 km langen LASER-Strecken in den USA. Noch längere Strecken sind bei LISA (=Laser Interferometer Space Antenna) geplant, nämlich ca. 50 000 km – im Weltraum.

weiterführende Informationen

Literaturempfehlung:

H. Collins: Gravity's Shadow – The search for gravitational waves, (Chicago, 2004)

WWW-Seiten:

www.ligo.org

universe.nasa.gov: Beyond Einstein - program

Literaturempfehlungen zu Albert Einstein

➤ Biographien:

- 1) Bürke, T.: Albert Einstein, dtv, (München 2004)
- 2) Hermann, A.: Einstein, Der Weltweise und sein Jahrhundert, Piper (München 1996)
- 3) Rosenkranz, Z.: Albert Einstein, privat und ganz persönlich,
Neue Zürcher Zeitung 2004, zu den Ausstellungen in Ulm 2004 und in Bern 2005
- 4) Highfield, R., Carter, P.: Die geheimen Leben des Albert Einstein, dtv (München 1996)

➤ spezielle Buchthemen:

- 1) Galison, P.: Einsteins Uhren, Poincares Karten. Die Arbeit an der Ordnung der Zeit,
S. Fischer Verlag (Frankfurt 2003)
- 2) Born, M.: Die Relativitätstheorie Einsteins, BI-Hochschultaschenbuch, (Mannheim 1967)
- 3) Grundmann, S.: Einsteins Akte, Springer (Berlin, Heidelberg, 1998), Neuauflage 2004
- 4) Schwarzenbach, A.: Das verschmähte Genie, Einstein und die Schweiz, DVA (München 2005)
- 5) Grüning, M.: Ein Haus für Albert Einstein (Berlin 1990)

➤ spezielle Broschüren:

- 1) Stiftung Lesen / Die Bahn: betrifft: Einstein, Texte für den Unterricht
- 2) DIE ZEIT: Geschichte, Meister Einstein, Nr.2, April 2005

➤ Zeitschriftenbeiträge:

- 1) Akademie der Wissenschaften der DDR, wissenschaft und fortschritt: 1979/2
- 2) GEO: Januar 2005, S.52/87, 100 Jahre Relativitätstheorie
- 3) Spektrum der Wissenschaft: März bis Juli 2005, Interviews mit Forschern