

# „Frontiers of extragalactic astrophysics“

SoSe 2009

Silke Britzen

Max-Planck-Institut für Radioastronomie  
Bonn

Tel.: 0228 525 280

E-mail: [sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de](mailto:sbritzen@mpifr-bonn.mpg.de)

Internet: <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/>

# Programm SoSe 09

03.04.	Überblick über die Themen des Semesters
	<i>Ostern</i>
17.04.	Die Konstanz der Naturkonstanten
08.05.	Einstein & das Äquivalenzprinzip
22.05.	Raum & Zeit & Schleifen-Quantengravitation
05.06.	Zeitreisen
19.06.	Gibt es Extraterrestrisches Leben?
03.07.	

# Die Konstanz der Naturkonstanten

Nachtrag zur letzten Vorlesung:

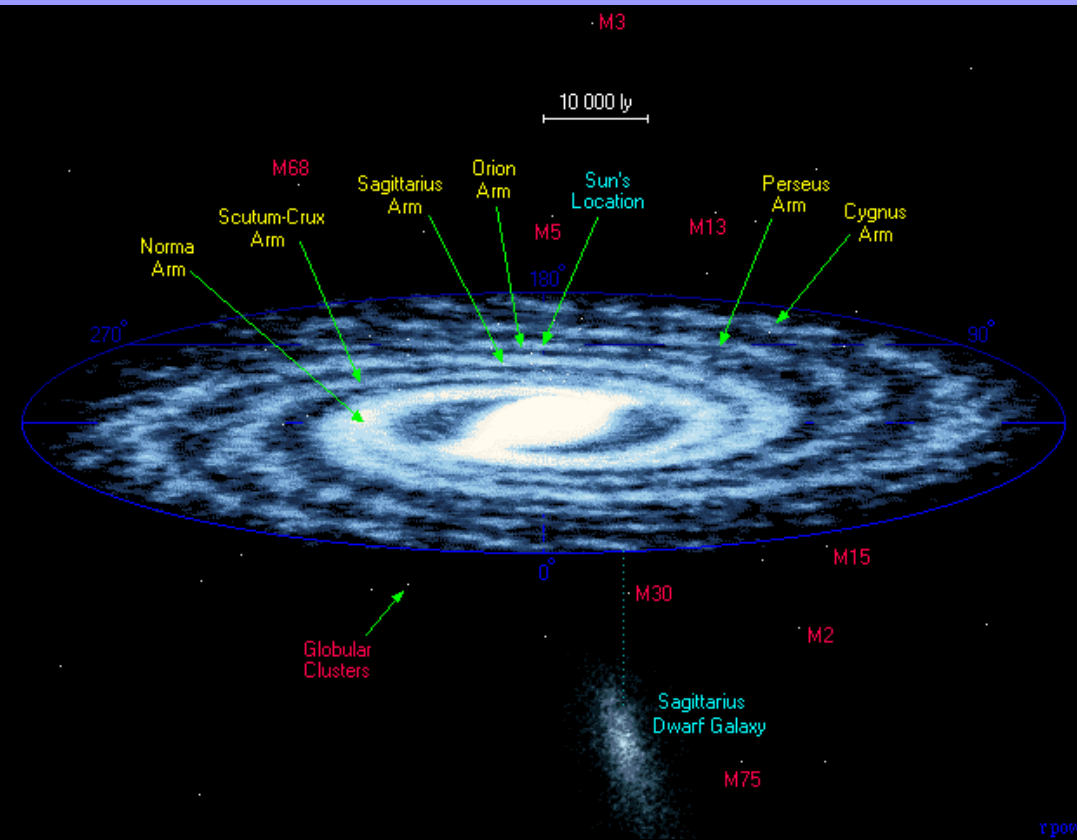
- Sterne in der Milchstraße
- Schwarze Löcher und Geschwindigkeiten
- Warum zeitvariable Naturkonstanten?
- Die Feinstrukturkonstante
- Die Gravitationskonstante
- Neue Weltraum-Missionen

# Die Konstanz der Naturkonstanten

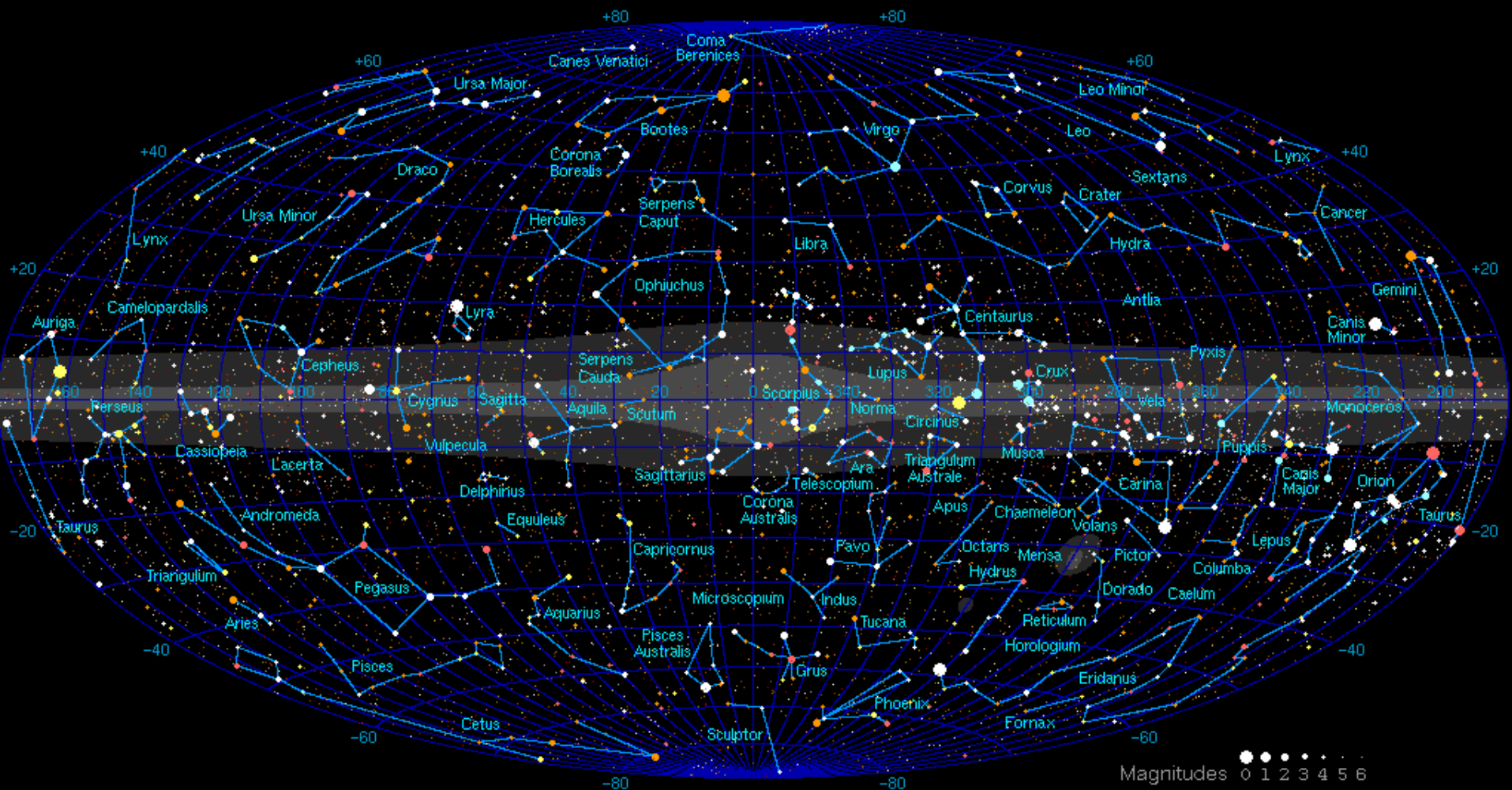
Nachtrag zur letzten Vorlesung:

- Sterne in der Milchstraße
- Schwarze Löcher und Geschwindigkeiten

# Sterne in der Milchstraße



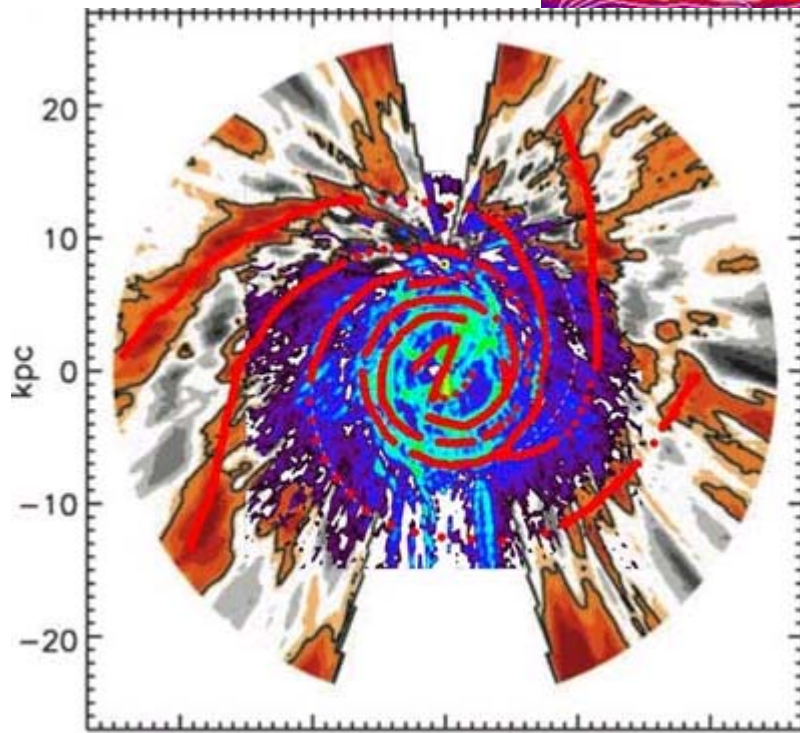
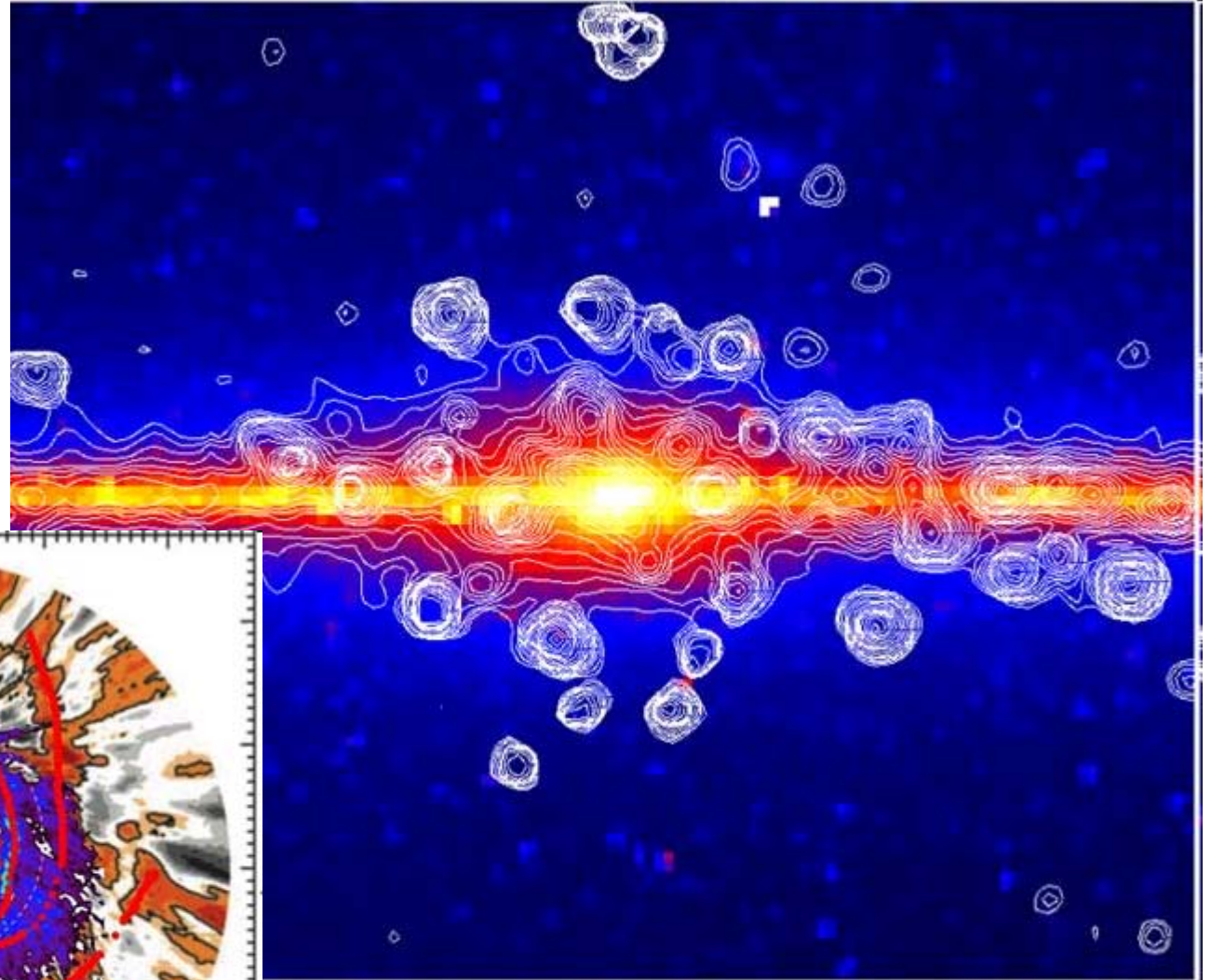
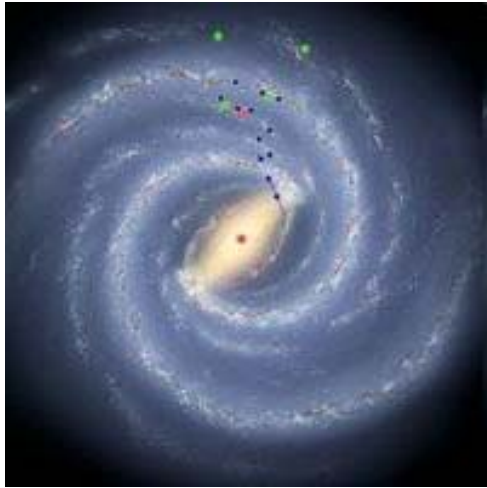
# Sterne in der Milchstraße



Magnitudes 0 1 2 3 4 5 6



# Sterne in der Milchstraße



## Milchstraße nur halb so massereich

Die Milchstraße hat nur rund halb so viel Masse wie bislang angenommen. Das ergab eine umfassende Himmelsdurchmusterung, verkündet das Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg: Unsere Heimatgalaxie bringt es demnach nur auf etwa **1000 Milliarden Sonnenmassen**.

Das Ergebnis spiele unter anderem eine wichtige Rolle für den Vergleich der Milchstraße mit anderen Galaxien, betont das Institut.

- Zahlen: **100, 200 oder 400 Milliarden Sonnen, oder mehr**
- Masse der Milchstraße: **zw. 750 Milliarden und 1.9 Billionen Sonnenmassen**
- **Ca. 6 Sterne pro Jahre werden neu geboren**
- **Im Mittel alle 50 Jahre explodiert ein massiver Stern als Supernova**

For more than 200 years, astronomers thought that most of the stars in our galaxy had stellar companions.

But a new study suggests **the bulk of them are born alone and never have stellar company**. Since planets are believed to be easier to form around single stars, the discovery could mean **planets are more common as well**.

...**most stars in the Milky Way** are not bright stars like our Sun, but **dim, low-mass stars called red dwarfs**.

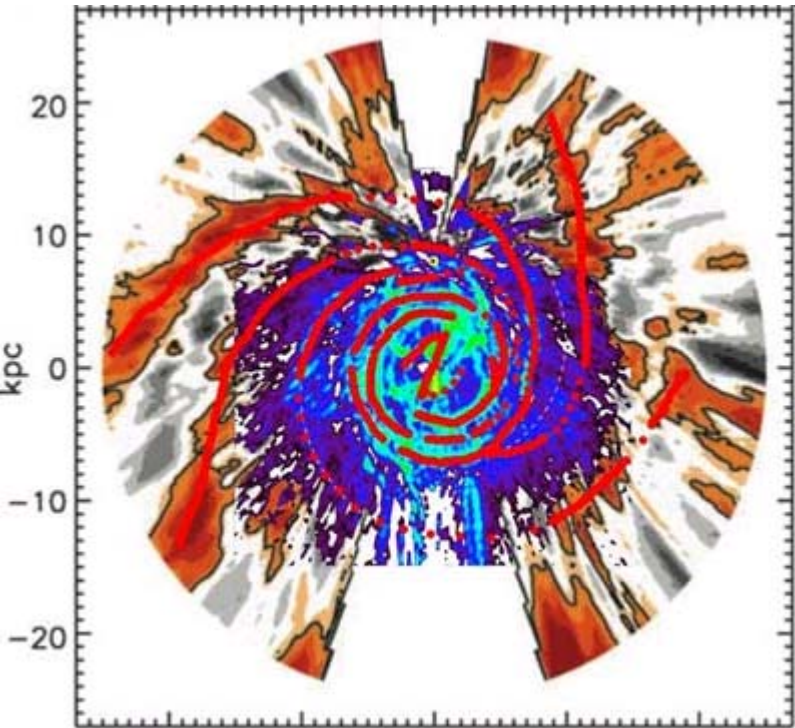


- Scientists estimate that **red dwarfs make up to 85 percent of the stars in our Galaxy.** These stars are about **one-fifth as massive as the Sun and up to 50 times fainter.**
- Red dwarfs are so dim that it's only been in the past decade or so that technology has improved to the point where astronomers can study them in detail. And they've found that **only about 25 percent of red dwarfs have stellar companions.**

Lada's finding could be good news for planet-hunters. Although some studies suggest that planet formation around binary star systems is more common than previously thought, most astronomers believe that **making planets is still easier around single stars.**

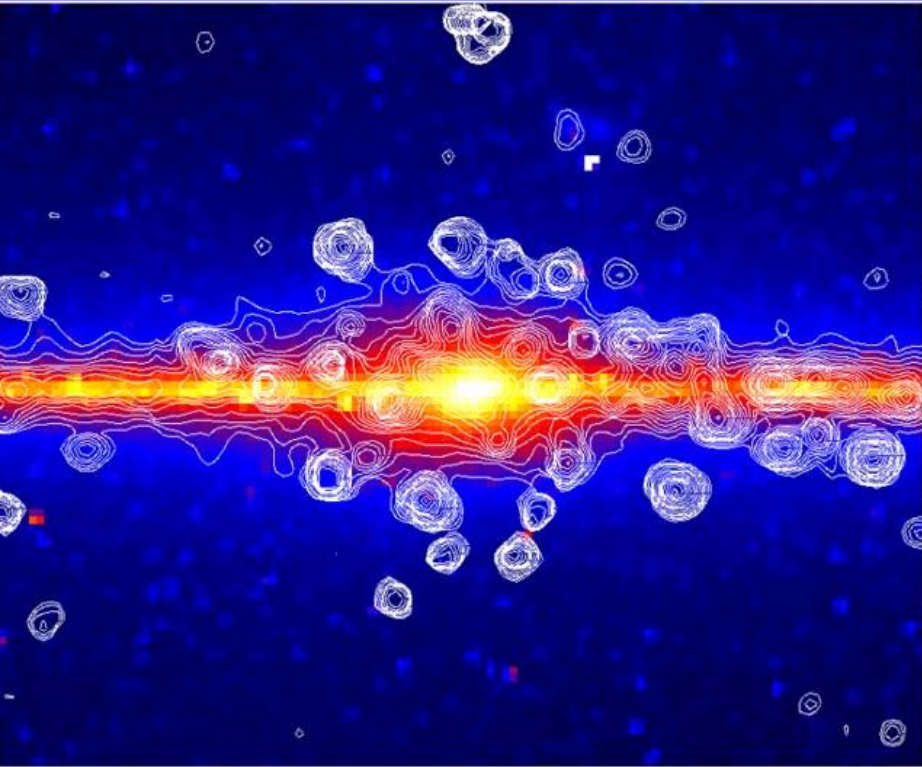
It's thought that when there are two or more stars, the gravitational forces between them hinder matter from clumping into cores dense enough to form planets.

# Sterne in der Milchstraße



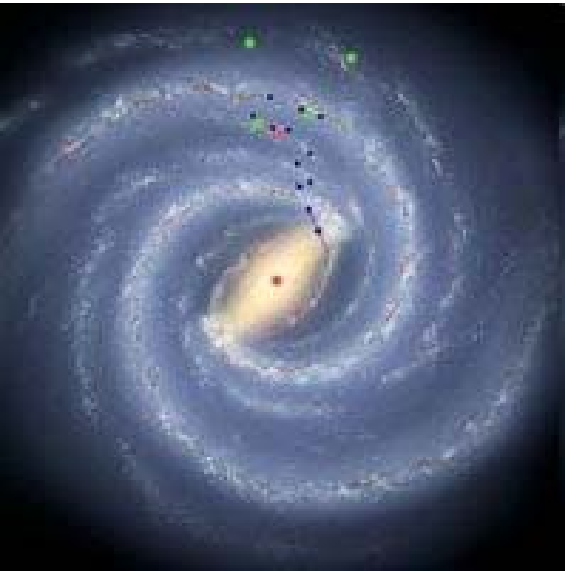
- Erste vollständige Karte der Milchstraße (2009)
- Beobachtung von Gaswolken mit Radioteleskopen, aus Doppler-Verschiebung kann die Geschwindigkeit des Gases bestimmt werden
- Problem: Gaswolken aus verschiedenen Entfernungen tragen zum Signal bei, im Detail ist nicht bekannt, wie weit die einzelnen Gaswolken entfernt sind
- Annahme von Kreisbahnen ... aber: Gas bewegt sich nicht auf Kreisbahnen. Insbesondere nicht in der Nähe des Balkens.
- Balkenmodell beschreibt Gasverteilung im Zentrum sehr gut, ausgehend von Balkenenden zwei Spiralarme, die sich kurz vor dem Erreichen der Sonnenbahn in 4 Arme aufspalten
- Neben den zwei inneren Armen existieren noch zwei schwächer ausgeprägte Arme, die bei ca. 10 000 Lichtjahren Entfernung vom Zentrum enden.

# Sterne in der Milchstraße



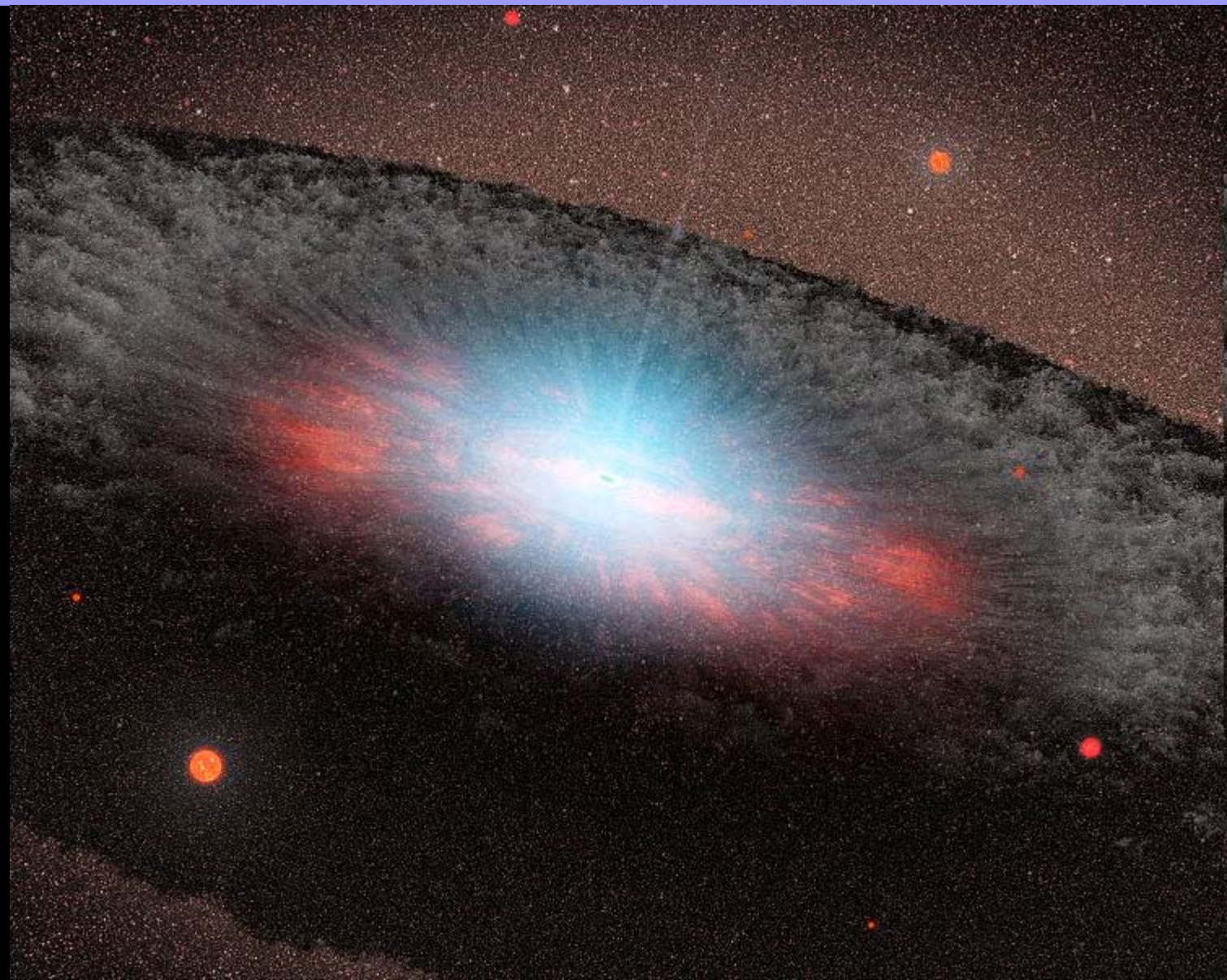
- Millionen unentdeckter Sterne (2006)
- Röntgenleuchten der Milchstraße stammt von Mio von bislang unentdeckten Sternen
- Rossi XTE-Satellit: Röntgenleuchten stammt von rund einer Million Doppelsternen, in denen jeweils ein Weißer Zwergstern von seinem Begleitstern Gas absaugt, sowie von Hunderten von Millionen gewöhnlicher Sterne mit aktiven Gashüllen.
- 1 Million kataklysmische Variable und 1 Milliarde aktiver Sterne

# Sterne in der Milchstraße



- Milchstrasse massereicher als gedacht (2009)
- VLBA-Beobachtungen zeigen, daß die Milchstraße schneller rotiert als gedacht -> größere Masse (50%)
- Zieht mit Andromeda-Galaxie gleich (1.2 Billionen Sonnenmassen)
- Größere Gravitationskraft, Kollision mit anderen Galaxien wahrscheinlicher
- Beobachtung von Sternentstehungsgebieten, kosmische MASTER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), Triangulation
- Sternentstehungsgebiete bewegen sich nicht auf kreisförmigen Bahnen um das Zentrum der Milchstraße, sondern auf elliptischen, und zwar langsamer als andere Bereiche; möglicherweise verursacht bei Entstehung der Spiralstruktur
- Vielleicht 4 Spiralarme







# NGC1068

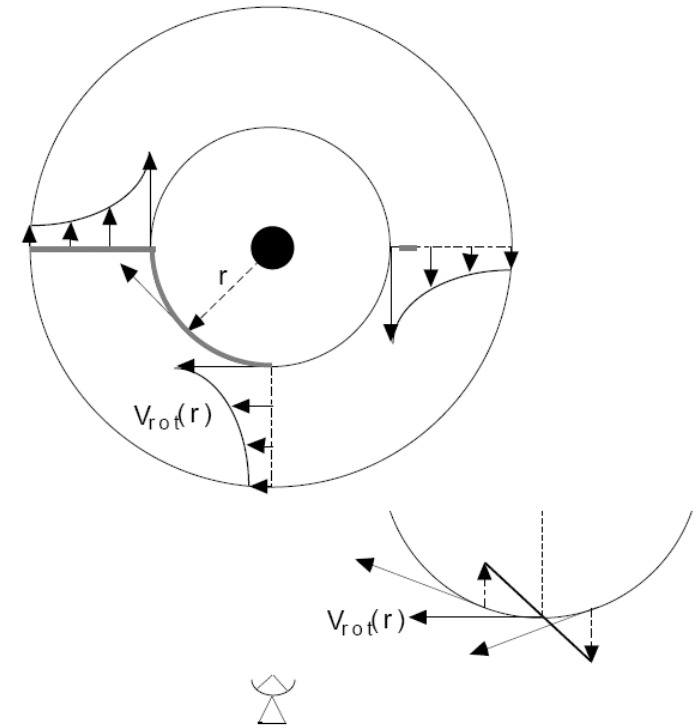
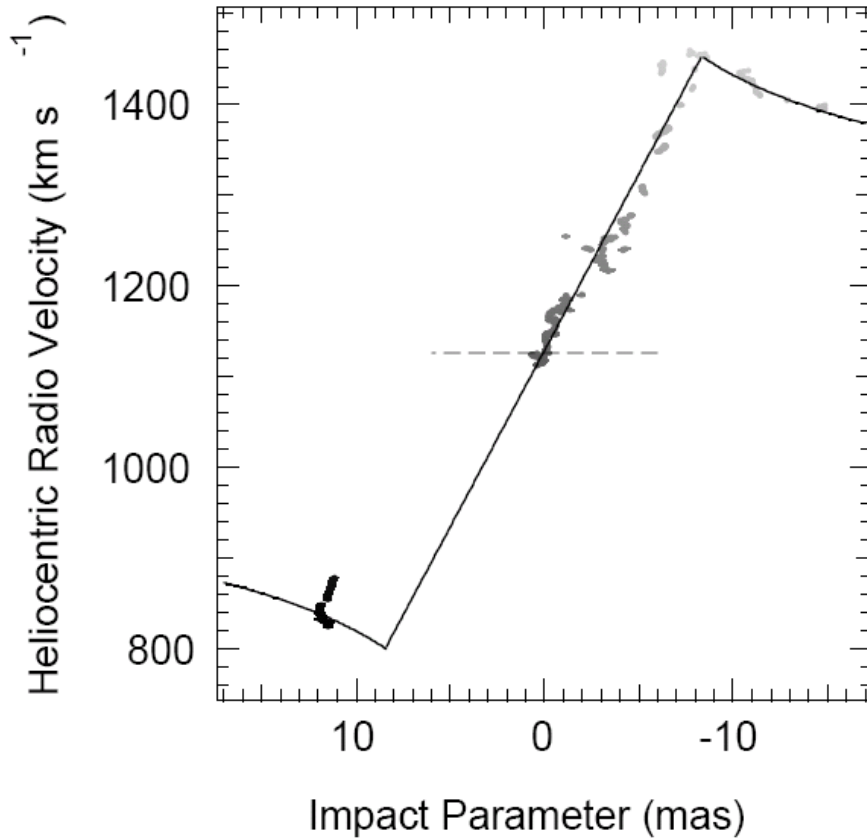


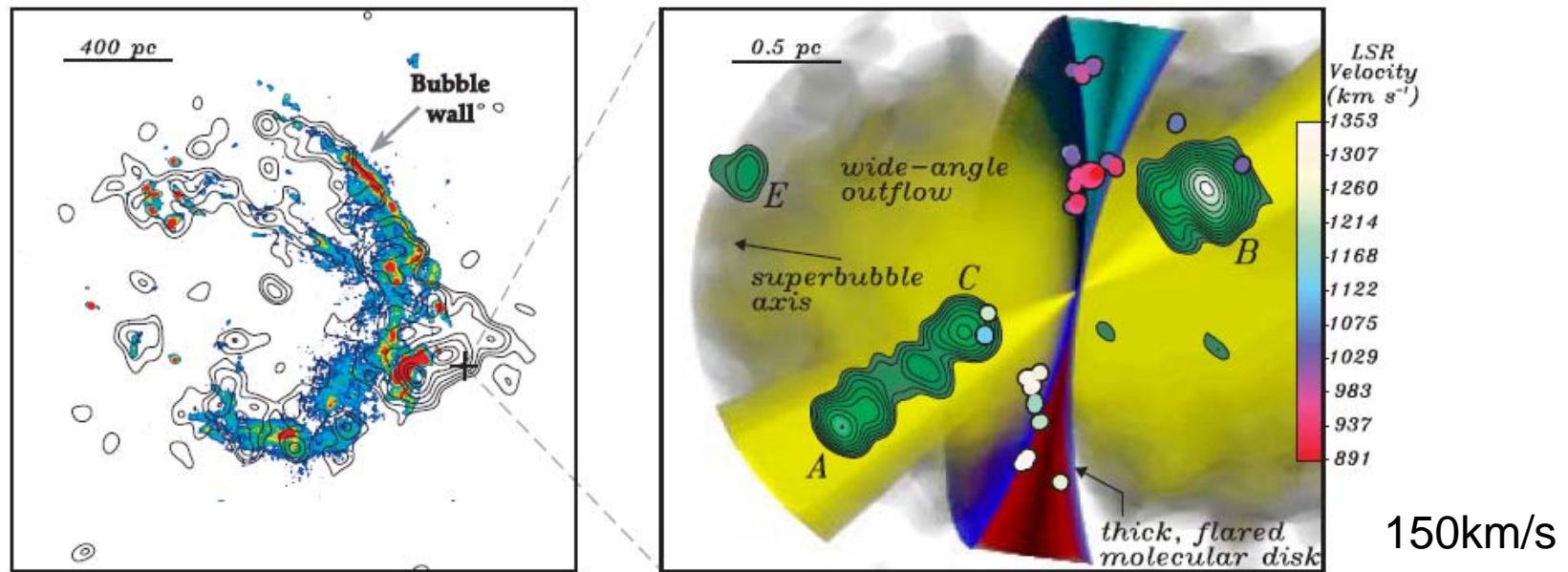
Figure 4. (top) – Schematic deprojection of the maser disk dynamics. The visible maser emission arises roughly along the diameter perpendicular to the line of sight and along one quadrant of the inner edge. The observer is pictured below the disk, in the plane of the page. A declining rotation curve is illustrated, whose line-of-sight projection is responsible for the maser velocity structure. (bottom) The projection of the orbital velocity over a narrow range of radii,  $r$ , (i.e. for emission along the disk's inner edge) may be responsible for the linear trend in maser velocity vs. impact parameter,  $b$ , when  $b < r$ .

330 km/s

Figure 3. Position-velocity diagram. The impact parameter is measured with respect to the systemic emission. The approximate symmetry in position and velocity with respect to the systemic emission and the declining rotation curve at large radii are characteristic of a rotating edge-on disk. The preliminary model shown represents a disk of inner and outer radii 0.65 and 1.1 pc, respectively, rotation velocity of  $330 \text{ km s}^{-1}$  at the inner edge, and estimated systemic velocity of  $\sim 1126 \text{ km s}^{-1}$  (indicated by the dashed line). Scatter in the data may indicate turbulent velocities of up to a few tens of  $\text{km s}^{-1}$ .

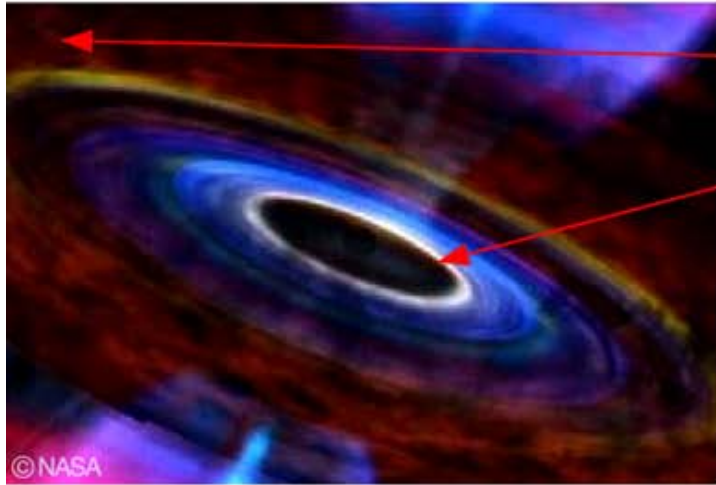
# The sub-parsec, geometrically thick, self-gravitating accretion disk in the nucleus of NGC 3079

Paul T. Kondratko<sup>1</sup>, L. J. Greenhill<sup>1</sup> and J. M. Moran<sup>1</sup>



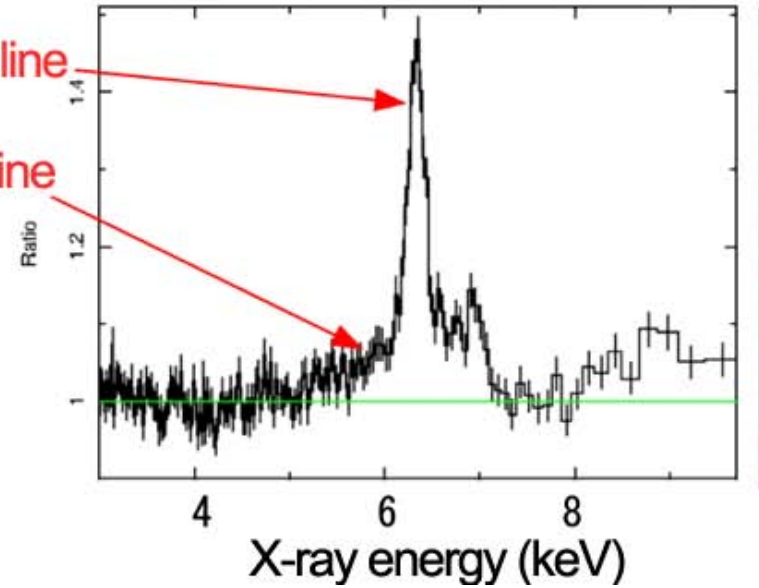
**Figure 1.** (left) [NII] + H $\alpha$  image of the superbubble (filled contours) obtained with the HST (Cecil et al. 2001) and the soft X-ray image of the same (unfilled black contours) obtained with the Chandra X-ray Observatory (CXO). The cross indicates both the VLBI-derived position of the maser source with respect to the X-ray emission as well as the  $0.6''$  uncertainty in the CXO absolute astrometry. (right) Proposed model for the nuclear region of NGC 3079, a VLBI image of 8 GHz continuum (filled contours), and a map of 22 GHz maser emission (shown as spots color-coded by Doppler velocity). We propose a thick and flared disk (shown in a cross-section) that is slightly tilted with the west side being closer and that is aligned with both the kpc-scale molecular disk and the axis of the kpc-scale superbubble. The color coding indicates the Doppler shift of the disk material. The water maser emission traces the disk and may arise from X-ray irradiated clumps within the disk, which is unstable to fragmentation. An off-axis jet, traced by the continuum components A, B, and C, probably coexists with a wide-angle outflow, most likely an inward extension of the kpc-scale superbubble. The outflow may result in an uplift of clumps from the disk surface, which would explain the high latitude maser features and their association in velocity with the most proximate side of the disk.

# Eisenlinie

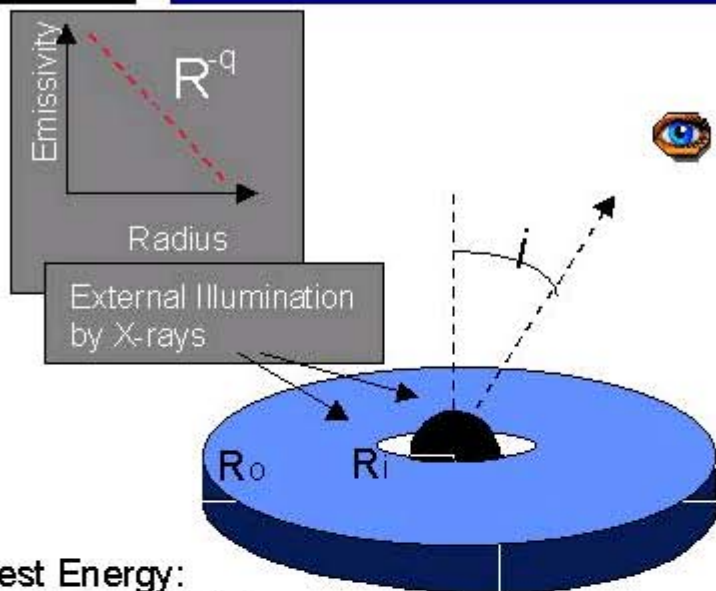


Narrow emission line

Broad emission line



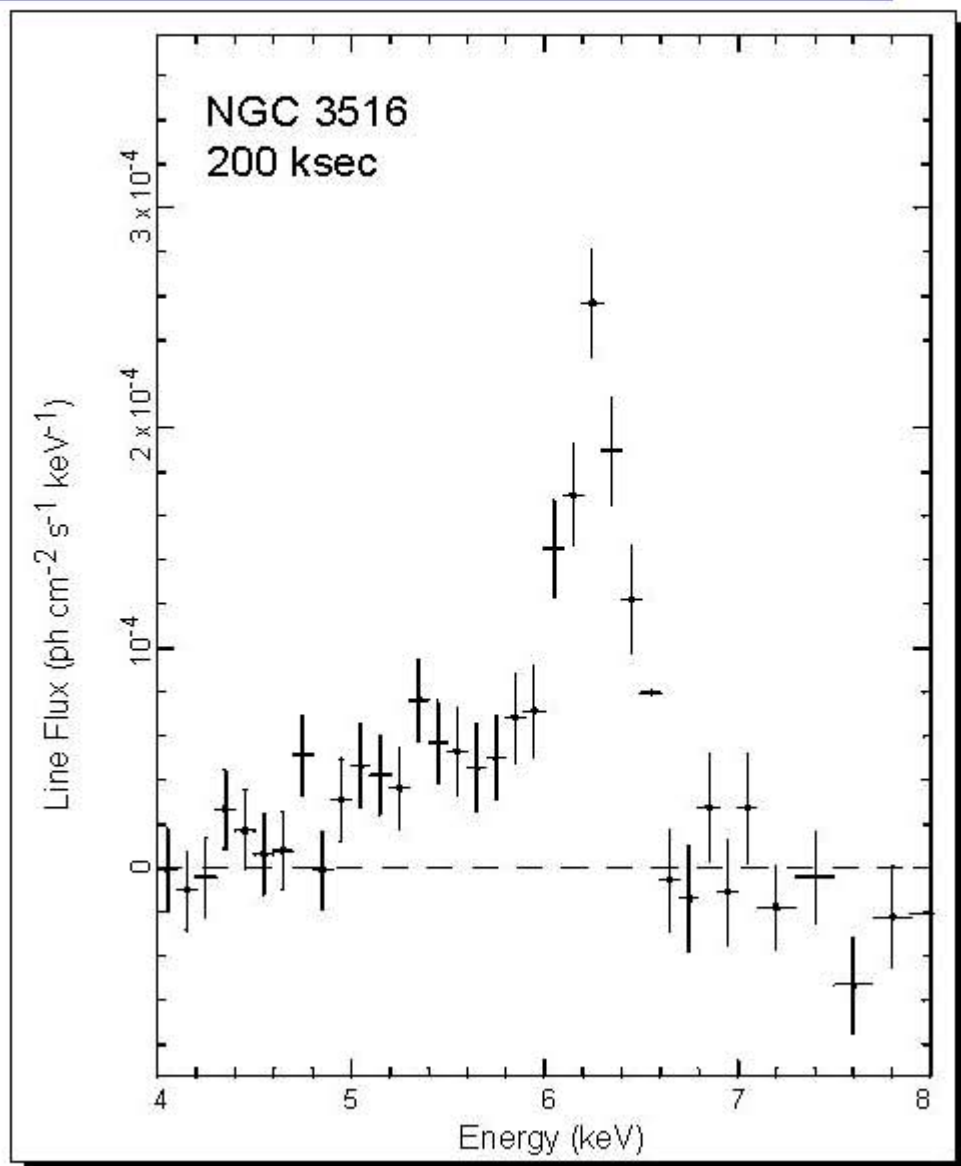
# Probing black holes in AGN with ASCA



Rest Energy:  
 $E = 6.4 - 6.9 \text{ keV}$

## DISK LINE MODEL

- Line emission from Fe  $K\alpha$  has broad (Fabian et al., 1994; Mushotzky et al 1995) and asymmetric (Tanaka et al., 1995) profile
- Line arises in an accretion disk, the profile indicates distortion due to strong gravitational effects close to the black hole
- Study of sample of Seyfert 1s showed  $E = 6.4 \text{ keV}$ ; width implies velocities  $\sim 40,000 \text{ km/s}$ ; disk oriented face-on (Nandra et al 1997)





# Akkretionsscheibe

- Akkretion unmittelbar vor dem Schwarzen Loch
- Spätestens bei der **marginal stabilen Bahn**, also **wenige Gravitationsradien vor dem Ereignishorizont des Schwarzen Loches**, wird die Scheibe abgeschnitten. Hier **bricht die stabile Kepler-Rotation zusammen**, denn so nahe am Akkretor sind **keine stabilen, gebunden Bahnen mehr möglich**. Jetzt heißt es: **reinfallen oder rausfliegen**. Für ein maximal rotierendes Schwarzes Loch von 100 Mio. Sonnenmassen im Zentrum des AGN liegt die marginal stabile Bahn beim Ereignishorizont, bei etwa 150 Mio. Kilometern oder einer Astronomischen Einheit (dem mittleren Abstand von Erde und Sonne).

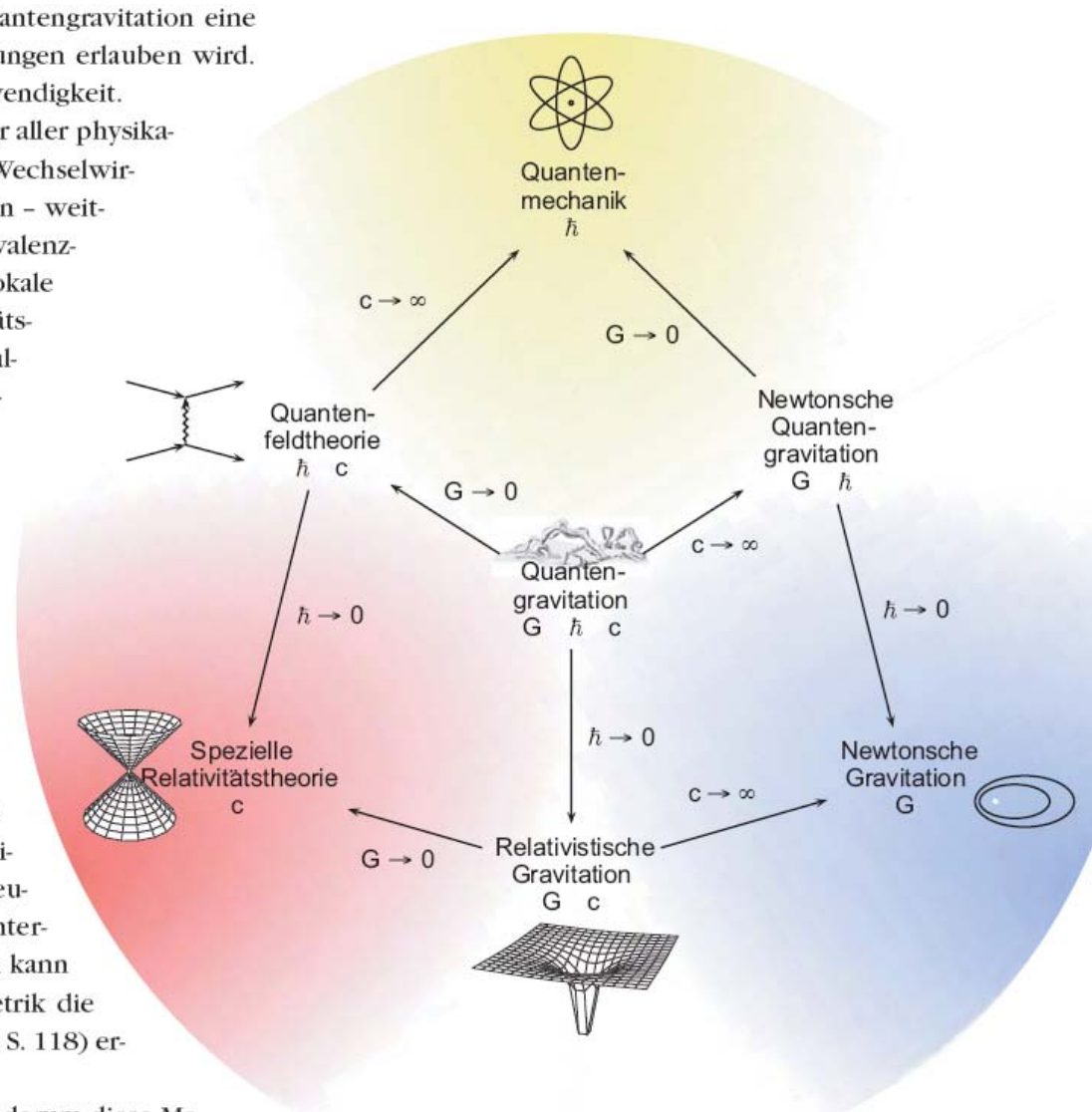


# Die Konstanz der Naturkonstanten

- Warum zeitvariable Naturkonstanten?

# Grundlegende Probleme der heutigen Physik

Quantengravitation eine  
 irkungen erlauben wird.  
 otwendigkeit.  
 iktur aller physika-  
 er Wechselwir-  
 orien - weit-  
 quivalenz-  
 ie lokale  
 ivitäts-  
 n Fal-  
 hie-  
 in-  
 ell  
 ie  
 1,  
 l-  
 l-  
 n  
 se  
 ur  
 en-  
 Das  
 ik ei-  
 pseu-  
 t, inter-  
 nen kann  
 Metrik die  
 ehe S. 118) er-



wiederum diese Me-

- Heutige Physik:
  - Standardmodell der Elementarteilchen
  - Allgemeine Relativitätstheorie
  - Quantentheorie
  - 4 Wechselwirkungen:
    - Gravitative
    - Elektromagnetische
    - Starke
    - Schwache
- Den Rahmen bilden grundlegende Theorien, die auf alle physikalischen Phänomene anzuwenden sind: Quantentheorie, Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie, Statistik

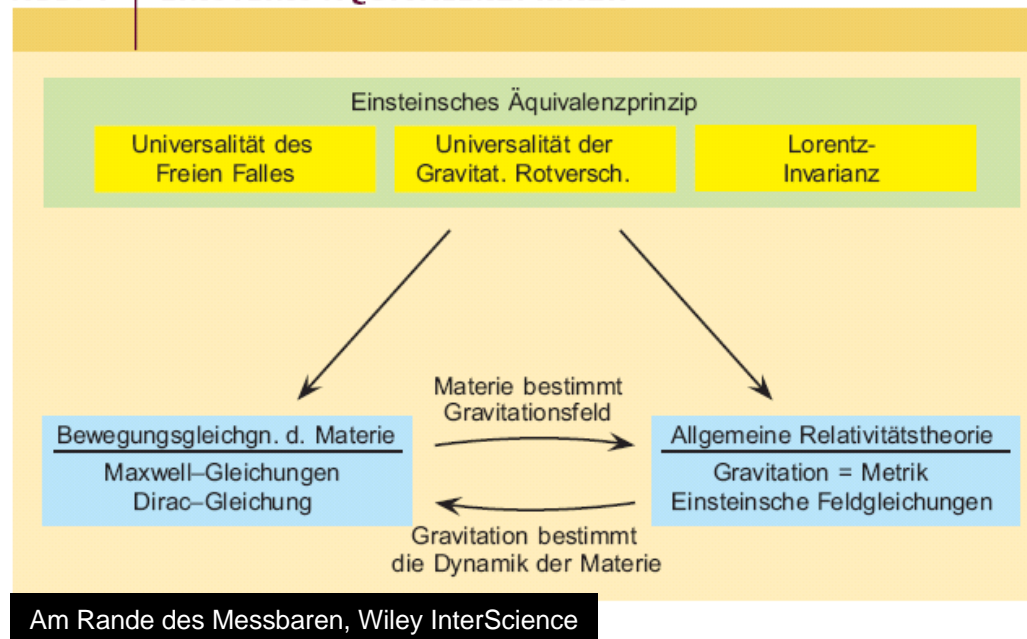
# Grundlegende Probleme der heutigen Physik

- Rahmentheorie gelten *für alle* physikalischen Phänomene
- Wechselwirkungstheorien sind *nur* auf die zugehörigen Teilchen anwendbar
- Sonderrolle der Gravitation: tritt auf Seite der Rahmentheorie *als auch* auf der Seite der Wechselwirkung auf
  
- Aber:
  - Quantentheorie und ART nicht kompatibel, denn ART läßt sich nicht nach den Regeln der Quantentheorie quantisieren. Die gravitative Wechselwirkung sollte aber quantisiert werden, da auch die sie erzeugende Materie quantisiert ist.
  - Problem Zeit: in der Quantentheorie ist Zeit ein äußerer Parameter, in der ART ist sie dynamisch, sie wird von der umliegenden Massenverteilung beeinflusst
  - Singularitäten in der ART – Widerspruch zur Quantentheorie, in der die Unschärferelation so etwas verhindert
  
- Suche nach einer neuen Rahmentheorie (ART + Quantentheorie):
  - Stringtheorie
  - Schleifen-Quantengravitation
  - Nichtkommutative Geometrie

# Einsteinsches Äquivalenzprinzip

- Nichtkommutative Geometrie:
  - Koordinaten sind keine Zahlen mehr, sondern Größen, die eine Kommutatorrelation erfüllen
  - **> führt zu einer modifizierten Dispersionsrelation, d.h. Licht unterschiedlicher Energie (Frequenz) hat verschiedene Vakuumlichtgeschwindigkeiten**
- Struktur aller physikalischer Theorien wird durch das Einsteinsche Äquivalenzprinzip bestimmt!! Die 3 Prinzipien können direkt experimentell getestet werden.

ABB. 1 | EINSTEINS ÄQUIVALENZPRINZIP





# How to make a Universe: the observer's recipe



One delicious Universe:

3 cups dark energy

1 cup dark matter

a pinch of baryonic matter for flavor

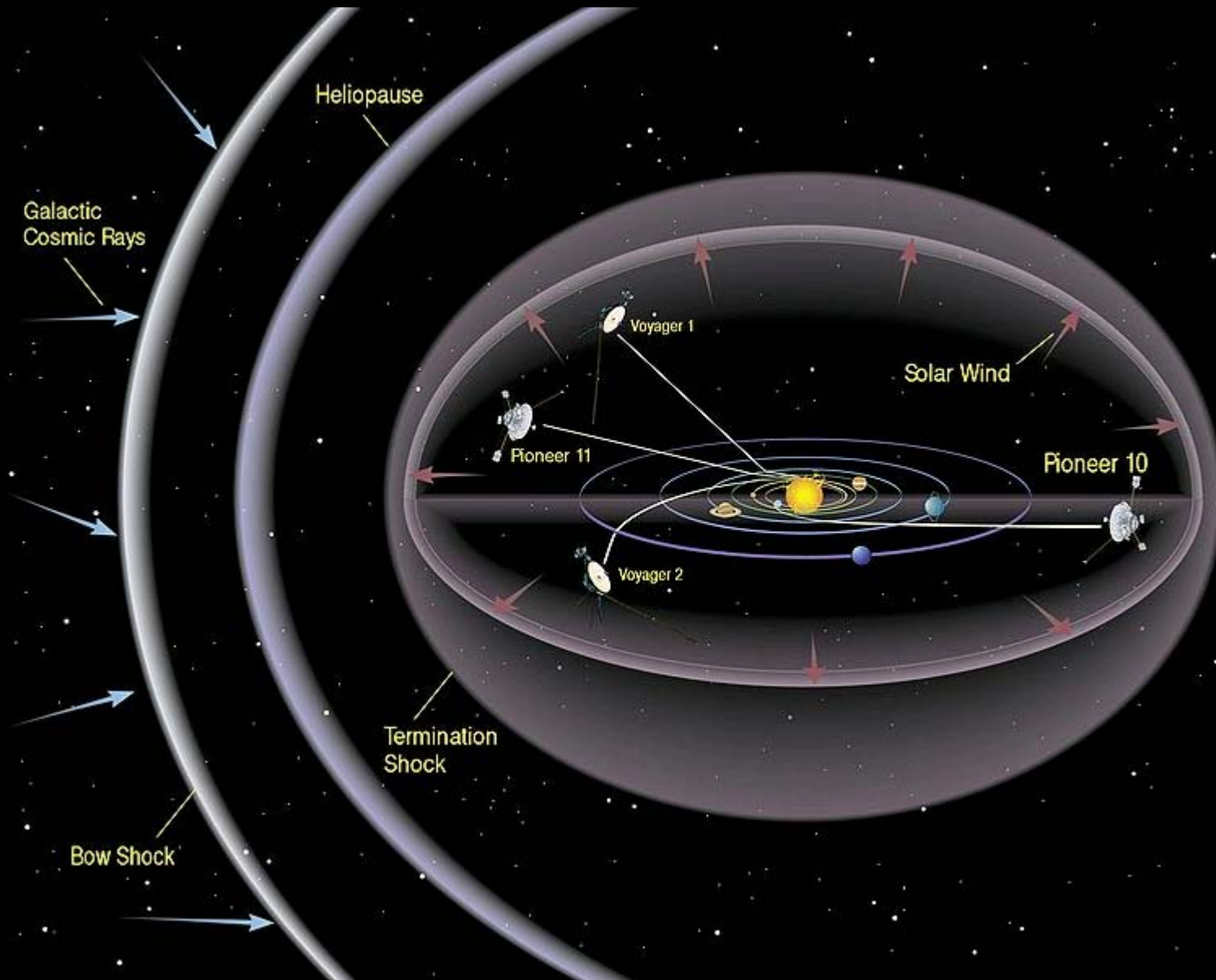
microwave at 2.7 K



# Grundlegende Probleme der Physik

- Um nur einige zu nennen:
  - Dunkle Energie (74% der Gesamtenergie, Natur völlig unklar, möglicherweise kosmologische Konstante aus den Einsteinschen Feldgleichungen; aus Beobachtungen von Supernovae Ia und der kosmischen Hintergrundstrahlung erhält man einen Wert von ca.  $10^{-52}\text{m}^2$ )
  - Dunkle Materie (22% der Gesamtenergie; Natur unbekannt; Feldgleichungen für die Gravitation abändern?)
  - Pioneer-Anomalie (Beschleunigung der Pioneer-Sonden, deren beobachtete Daten eine Anomalie zeigen)

# Pioneer-Anomalie



# Fly-by-Anomalien & Pioneer-Anomalie

- Fly-by-Anomalie: ein bisher ungeklärtes Phänomen der Gravitationsforschung. Eine kleine zusätzliche Geschwindigkeitszunahme, die mehrere Raumsonden bei einem Fly-by an der Erde erfahren haben
- Fly-by Manöver: Sonden fliegen teilweise mehrmals an der Erde vorbei, Abweichungen von der vorausberechneten Geschwindigkeit wurden erstmals 1990 bei der Raumsonde Galileo gemessen
  - 1990, Galileo, Geschwindigkeitszunahme von 3.92mm/s
  - 1998, Sonde NEAR Shoemaker, 13.46 mm/s
  - 2005, Rosetta, 1.82 mm/s
- Mögliche Erklärungen:
  - Daten- und Rechenfehler jeglicher Art
  - Effekte der Sonde selbst:
    - Rückstoss von austretendem Gas
    - Elektromagnetische Kräfte aufgrund elektr. Ladung der Sonde
    - Räumlich ungleichmäßige Wärmeabstrahlung von Plutonium-Energiequelle
    - Ungleichmäßige Alterung der Sondenoberfläche, resultierend in ungleichmäßiger Wärmeabstrahlung
  - Effekte des Sonnensystems:
    - Gravitationskräfte des Kuipergürtels
    - Reibungswiderstand durch interstellare Materie
    - Einschläge von Mikrometeoriten
    - Ungenaue Modelle der solaren Strahlung und des Sonnenwindes

# Fly-by-Anomalien & Pioneer-Anomalie

- Mögliche Erklärungen:
  - Grundlegend neue Effekte
    - „neue Physik“
- Die Wissenschaftler des Jet Propulsion Laboratory: „Bis mehr bekannt ist, müssen wir zugeben, dass die wahrscheinlichste Ursache des Effekts eine unbekannt systematische ist. (Wir selbst sind geteilter Ansicht darüber, ob „Gaslecks“ oder „Wärme“ diese „wahrscheinlichste Ursache“ ist.)
- Ähnlicher Effekt?
  - Pioneer-Anomalie: 1972 und 1973 gestartete Raumsonden Pioneer 10 und 11: konstante Abbremsung der Sonden auf ihren Bahnen: in 15 Jahren Abweichung um 100 000km

# Grundlegende Probleme der Physik

- Lösung **Quantengravitation**??
- Oder kann die konventionelle ART alle drei Phänomene bei richtiger Anwendung korrekt beschreiben??
- Aus Inkompatibilität von Quantentheorie und ART folgt, daß die Standardtheorien nicht vollkommen korrekt sein können – die Quantengravitation müßte die Standardphysik modifizieren – mit möglicherweise schon heute messbaren Effekten!!



# Messbare Effekte?

- Die Suche nach Verletzungen des Einsteinschen Äquivalenzprinzips ist wichtige Strategie im Aufspüren möglicher Effekte der Quantengravitation
- Mögliche Konsequenzen:
  - Struktur der Raumzeit: fluktuierende Raumzeit-Metrik, fluktuierende Topologien im Kleinen, Modifikationen der metrischen Struktur -> einzige Möglichkeit: die Dynamik von Teilchen und Felder explorieren
    - Verletzte Lorentz-Invarianz: Messergebnisse bestimmter Laborexperimente wären von der Orientierung oder Geschwindigkeit des Labors abhängig
    - Nichtlineare Zusatzterme: würde Superpositionsprinzip der Quantentheorie verletzen
    - Nichtunitäre Zusatzterme: Wahrscheinlichkeitserhaltung oder Stromerhaltung wären verletzt
    - etc.
  - Das führt zu den folgenden Effekten:
    - Anisotrope Lichtgeschwindigkeit, unterschiedliche Lichtausbreitung in verschiedenen Raumrichtungen – es gäbe dann doch ein vor allen anderen Inertialsystemen ausgezeichnetes, absolutes Bezugssystem
    - Ausmessung von Spektren würde von der Ausrichtung oder Geschwindigkeit des Labors abhängen
    - Verletzung der Universalität des freien Falls: Er hängt dann vom Bezugssystem ab. Verletzung der Universalität der gravitativen Rotverschiebung

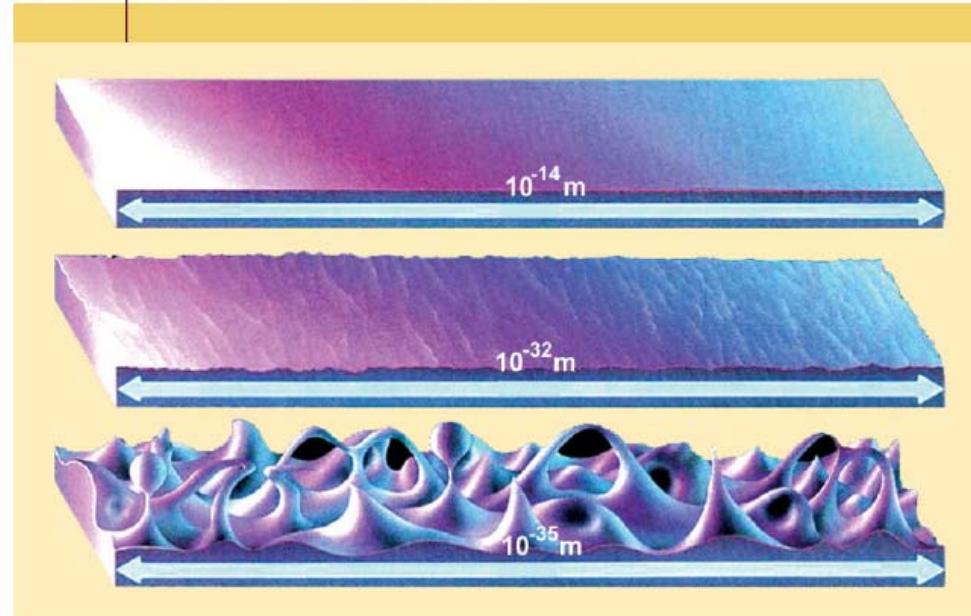
# Messbare Effekte?

- Das führt zu den folgenden Effekten:
  - Modifizierte Dispersionsrelation für die Lichtausbreitung im Vakuum – Lichtgeschwindigkeit im Vakuum von der Lichtfrequenz abhängig. Greisen, Kuzmin, Zatsepin GZK Cutoff würde modifiziert – Obergrenze in der Energie kosmischer Strahlung. Teilchen mit Energien über  $10^{19}$  eV können mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund wechselwirken. Da sie dabei Energie verlieren, können sie im Universum nur kürzere Strecken zurücklegen. Eine Beobachtung solcher hochenergetischer Teilchen legt eine quantengravitationsmodifizierte Dispersionsrelation nahe.
  - Ladungs- und Wahrscheinlichkeitserhaltung werden verletzt
  - Ungleichheit von aktiver und passiver Masse oder Ladung (aktive Masse erzeugt das Gravitationsfeld, passive Masse reagiert darauf) (Lunar Laser Ranging)
  - Dekohärenz quantenmechanischer Zustände, könnte Interferenzfähigkeit von Quantenfeldern beeinträchtigen
  - **Konstanten werden zeitabhängig, z.Bsp. die Feinstrukturkonstante**
  - etc.

# Messbare Effekte ?

- Stringtheorie:
  - Neben der Raumzeit-Metrik könnte es ein oder mehrere zusätzliche skalare Felder geben. Diese koppeln in unterschiedlicher Art an die Elementarteilchen. Dies führt zu einer Verletzung der Universalität des freien Falles und der gravitativen Rotverschiebung. Lorentz-Symmetrie könnte gebrochen sein, Relativitätsprinzip wäre verletzt durch ausgezeichnetes Inertialsystem
- Schleifen-Quantengravitation:
  - Fluktuierende Metrik, in der effektiven Schrödinger-Gleichung tauchen für die Quantenteilchen kleine Zusatzterme auf, die zu einer winzigen Verletzung der Wahrscheinlichkeitserhaltung führen, Verletzung der Lorentz-Invarianz, Modifikation der Dispersionsrelation
- Nichtkommutative Theorien:
  - Modifizierte Dispersionsrelationen, Verletzung der Lorentz-Invarianz

ABB. 3 | RAUMZEIT-FLUKTUATIONEN



*Auf der Planck-Skala ( $10^{-35}$  m) fluktuiert vermutlich die Raumzeit, diese Fluktuationen mitteln sich auf größeren Längenskalen heraus.*

# Sind die Effekte messbar?

- Quantengravitation wird charakterisiert durch
  - $c, G, h$
- Max Planck fand, daß sich daraus fundamentale Zeit-, Längen- und Energieeinheiten bilden lassen. Diese Planckschen Einheiten geben die Skala an, bei der die entsprechenden Effekte einer Quantengravitation auftreten sollten.
- Planck-Masse= $2.176 \times 10^{-8}$ kg; Planck-Länge= $1.616 \times 10^{-35}$ m; Planck-Zeit= $5.391 \times 10^{-44}$  s, Planck-Energie= $10^{28}$  eV
- ... sind Laborexperimenten noch unzugänglich, LHC wird  $10^{13}$  eV erreichen, höhere Energie kommen nur in der kosmischen Strahlung vor
- Bei einer Laborenergie von 1 eV, müßte man eine relative Genauigkeit von  $10^{-28}$  erreichen
- Quantenoptische Frequenzmessungen zählen derzeit zu den präzisesten Laborexperimenten: Genauigkeit von  $10^{-15}$

# Sind die Effekte messbar?

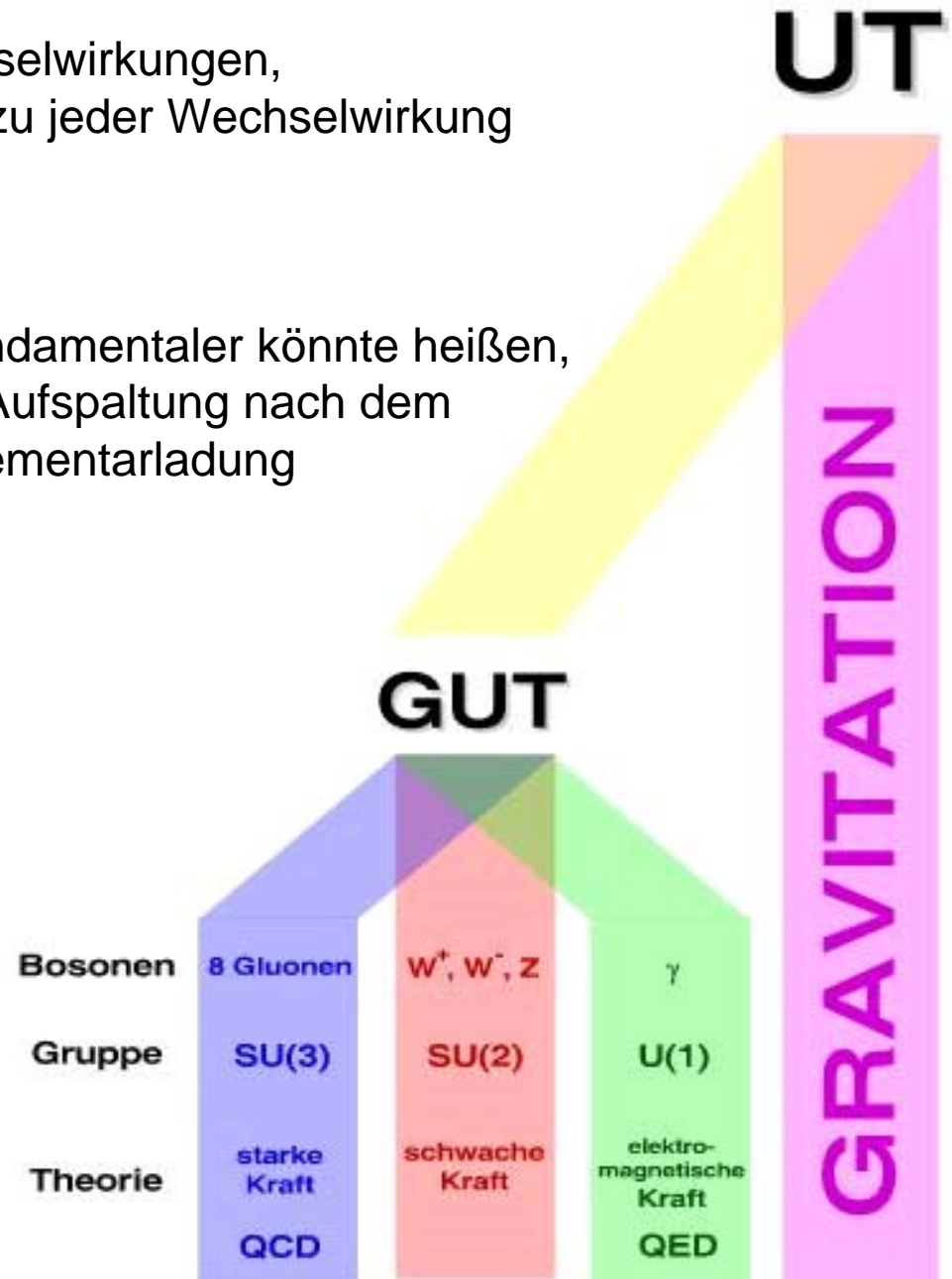
- Aber:
  - Aus den Daten der Teilchbeschleuniger läßt sich ablesen, daß die Vereinigungsenergie von elektroschwacher und starker WW, die GUT (Grand Unified Theory) bei etwa  $10^{25}$  eV liegt. Vermutlich erreicht die Gravitation auf dieser Skala dieselbe Stärke, damit läge die Energieskala der Quantengravitation drei Größenordnungen unterhalb der Planck-Energie – wäre also erreichbar
  - Unterschiedliche Teilchen könnten auf der Erde mit einer um  $10^{-12}\text{m/s}^2$  verschiedenen Beschleunigung fallen
  - Einige Naturkonstanten sollten von der Zeit abhängen – präziser Langzeitvergleich hochstabiler Uhren könnte das offenlegen
  - etc.



Stammbaum: Vereinigung der Wechselwirkungen, am Anfang waren alle zusammen – zu jeder Wechselwirkung sollte eine Naturkonstante existieren

Hierarchie:

$h$  und  $c$  sind fundamentaler als  $e$ : fundamentaler könnte heißen, daß die Konstanten  $h$  und  $c$  bei der Aufspaltung nach dem Urknall früher auftauchten als die Elementarladung



# Sind die Effekte messbar?

- Messgenauigkeit erhöhen oder experimentelles Neuland erkunden (Teilchen höchster Energie in kosmischer Strahlung)!! Bose-Einstein-Kondensate könnten bei extremer Kälte Raumzeit-Fluktuationen aufspüren, könnte sich in einer fundamentalen Dekohärenz von Quantenzuständen äußern. Extrem tiefe Temperaturen können durch den freien Fall erzeugt werden. Fallexperimente am Bremer Fallturm – über eine Sekunde lang von der Gravitation ungestört evolvieren zu lassen
- Pioneer-Sonden stellen das bisher größtskalige menschliche Experiment dar
- Gravitationswelleninterferometer im All
  
- **Bevorzugt untersuchen: Verletzung einer Universalität des freien Falls, der Universalität der gravitativen Rotverschiebung, Zeitabhängigkeit von Konstanten**

# Die Konstanz der Naturkonstanten

- Die Feinstrukturkonstante

# Die Konstanz der Naturkonstanten

G

$$6,6742 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$

Gravitationskonstante



Name: Gravitationskonstante  
Kürzel: Groß-G  
geboren: 1687  
Vater/Eltern: Isaac Newton  
bes. Kennz.: etwas schwach geraten

Name: Elementarladung  
Kürzel: e  
geboren: 1897  
Väter: Hermann von Helmholtz  
George Johnston Stoney  
Joseph John Thomson  
Robert A. Millikan  
bes. Kennz.: mal Teilchen, mal Welle

Name: Lichtgeschwindigkeit  
Kürzel: c  
geboren: 1905  
Stiefvater: Albert Einstein  
bes. Kennz.: keine Information ist schneller

$\alpha^{-1}$   
137,035 999 11  
Inverse  
Feinstrukturkonstante

$l_{PI}$

$$1,616 24 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Plancksche Länge

$\alpha$

$$7,297 352 568 \cdot 10^{-3}$$

Feinstrukturkonstante

# Die Konstanz der Naturkonstanten

**k**  $1,380\ 6505 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$   
Boltzmann-Konstante

**h**  $6,626\ 0693 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$   
Plancksches Wirkungsquantum

Naturkonstanten sind  
der Physiker Freud und Leid

- Eine **Naturkonstante** ist eine physikalische Größe, deren Größenwert sich weder räumlich noch zeitlich verändert.
- Unterscheidung zwischen elementaren oder grundlegenden und abgeleiteten Konstanten (Zuordnung unterliegt gewisser Willkür)
- Abgeleitete Konstanten lassen sich aus den elementaren Konstanten berechnen
- Zusammenfassung von Konstanten zu **Fundamentalkonstanten**
- **Sind die Naturkonstanten auch über astronomische Zeiträume hinweg wirklich konstant?? Thema dieser Vorlesung!!**



# Die Konstanz der Naturkonstanten

Ein kleiner Teil der Naturkonstanten:

- Elektromagnetismus: Coulomb-Konstante, Curie-Konstante, Elementarladung, ...
- Gravitation: Gravitationskonstante, ...
- Thermodynamik: Absoluter Nullpunkt, Boltzmann-Konstante, ..
- Teilchenphysik: Bohrscher Radius, Plancksches Wirkungsquantum, ...
- Elektron: Ruhemasse, Spezifische Ladung, ...
- Neutron: Ruhemasse, ..
- Proton: Gyromagnetisches Verhältnis, Verhältnis von Protonen-zu Elektronenmasse, ...
- Vermischtes: Faraday-Konstante, Atomare Masseneinheit, ...
- Die von-Klitzing-Konstante (universeller Wert zur Messung elektrischer Widerstände)
- Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix („Liebling der Teilchenphysiker“)
- etc. ....

Während Meter, Kilogramm und Sekunde bloße Konventionen sind, die selbst auf der Erde nicht überall Verbreitung gefunden haben, kommt den Planck-Einheiten universelle Bedeutung zu: Vertreter einer außerirdischen Zivilisation wüßten, was wir mit diesen Einheiten meinen (Planck-Masse= $2.176 \times 10^{-8}$ kg; Planck-Länge= $1.616 \times 10^{-35}$ m; Planck-Zeit= $5.391 \times 10^{-44}$  s)

## Wichtige Naturkonstanten

Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

Elementarladung

$$e = 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Planck'sches Wirkungsquantum

$$h = 6,6260693 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

Ruhemasse des Elektrons

$$m_e = 9,1093826 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Ruhemasse des Protons

$$m_p = 1,67262171 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Permeabilität des Vakuums

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$$

Dielektrizitätskonstante des Vakuums

$$\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$$

Gravitationskonstante

$$G = 6,6742 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

Avogadro-Konstante

$$N_A = 6,0221415 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Boltzmann-Konstante

$$k_B = 1,3806505 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

Feinstrukturkonstante

$$\alpha = e^2/2\epsilon_0hc = 1/137,03599911$$

- Einstein hielt Naturkonstanten wie  $c$ ,  $G$  und  $h$  nicht für wirklich fundamental, da ihr Zahlenwert noch von „konventionellen“ Einheiten abhängt. Erst wenn es gelingt, aus mehreren Konstanten eine Größe zu bilden, die ein reiner Zahlenwert ohne Maßeinheit ist, liegt nach Einsteins Ansicht eine wirklich universelle Konstante vor. Doch auch damit gab er sich nicht zufrieden: Der Zahlenwert einer solchen Konstante sollte durch die logische Grundlage der physikalischen Theorie zwingend festgelegt sein:

*„... ich kann mir keine einheitliche und vernünftige Theorie zwingend vorstellen, die explizit eine Zahl enthält, welche die Laune des Schöpfers ebenso gut anders hätte wählen können, wobei die Welt qualitativ anders in ihren Gesetzmäßigkeiten ausgefallen wäre.“ (A. Einstein)*

**Sein Ziel: alle Naturkonstanten zu erklären und damit aus dem Weg zu räumen!!**

# Die Null-Konstanten-Partei

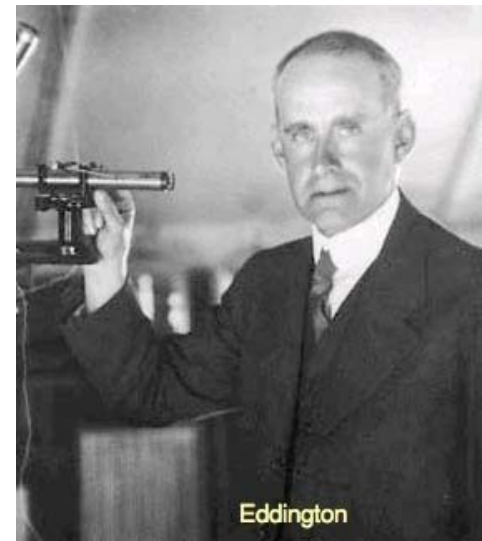


- Prof. Michael Duff (Direktor des Michigan Center for Theoretical Physics): gründet Null-Konstanten-Partei, Konstanten sind „willkürliche menschliche Konstrukte“, will sie aus der Physik verbannen. Wie die Formeln der Physik danach aussehen sollen, hat Duff bisher nicht verlauten lassen.
- John Barrow: „Die Naturkonstanten spiegeln zugleich unser größtes Wissen und unsere größte Ratlosigkeit wider.“
- Max Planck träumte von einer Theorie mit einer einzigen Konstanten, aus der man alle anderen ableiten könnte.
- Am meisten ärgern sich die Physiker über die krummen Werte ...
- W. Heisenberg versuchte Alpha aus einer Kombination „schönerer“ Zahlen zusammensetzen, multiplizierte, quadrierte und dividierte Zahlen 2,3 und pi bis es einigermaßen passte. Aber der geschönte Wert stimmte nicht mit den Experimenten überein. „Als Zahlenwerte vermute ich  $2^4 3^3/\pi$ , aber das ist natürlich Spielerei“ schrieb er in einem Brief an Dirac.

# Die Null-Konstanten-Partei



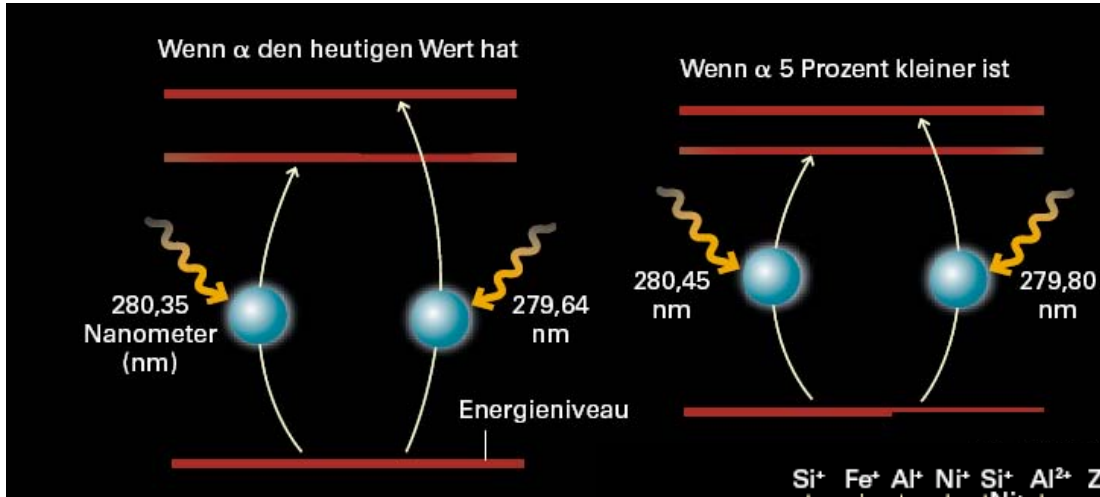
- Der Quantenphysiker W.Pauli fand heraus, dass das Wort der zahlenmystischen Geheimlehre Kabbala korrekt geschrieben die 137 ergibt: QABALAH, Q=100, B=2, L=30, H=5
- Pauli verfolgte die hässliche 137 unter Bruchstrich ( $1/137.036$ ) bis an sein Lebensende. Er starb in einem Krankenhauszimmer mit der Nummer 137.
- Eddington reduzierte in den 20er Jahren bekannte Größen wie Protonenmasse, Plancksches Wirkungsquantum oder die Lichtgeschwindigkeit auf dimensionslose Zahlen wie 1840 (Verhältnis von Protonen- zu Elektronenmasse), 137 (Alpha) und  $10^{40}$  (Verhältnis der elekt. Kraft zur Gravitationskraft zwischen Proton und Elektron) „Meine Schlussfolgerung ist, dass nicht nur die Naturgesetze, sondern auch die Naturkonstanten von erkenntnistheoretischen Überlegungen abgeleitet werden können.“



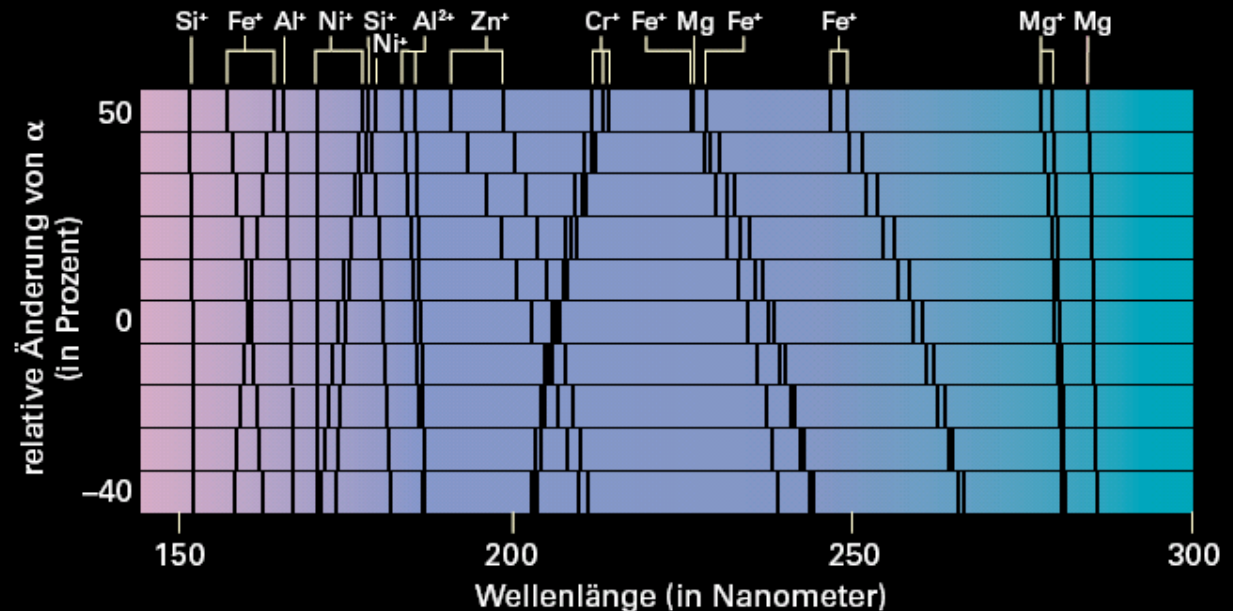


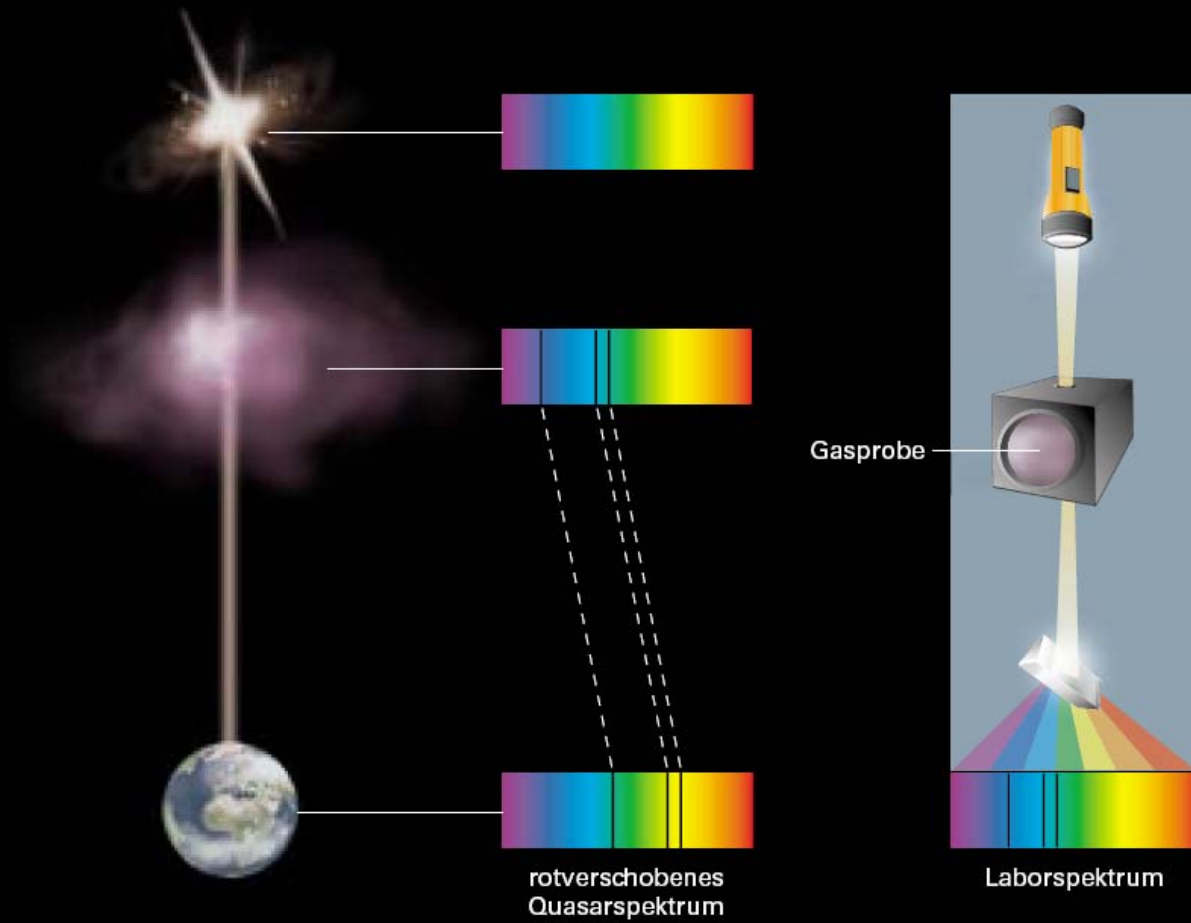
# Die Feinstrukturkonstante

Feinstrukturkonstante (137,035 999 679 (94)): bestimmt die Kraft zwischen den Atomkernen und den Elektronen in der Atomhülle,  $\alpha = e^2 / hc = 1/137.036$

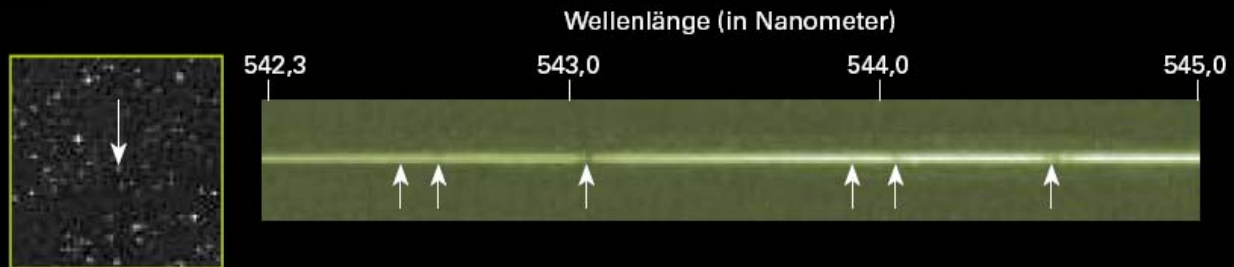


Spektrum der Wissenschaft





Spektrum der Wissenschaft



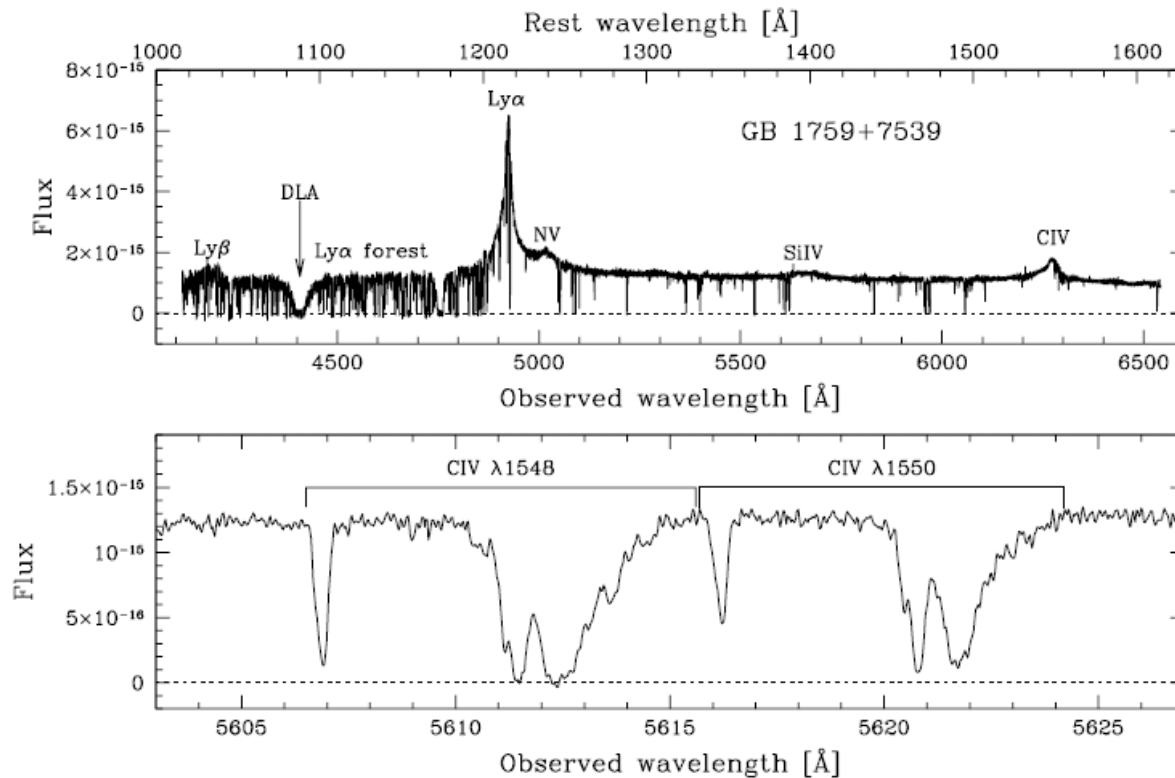
# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

- Im Fall geringer Variationen in  $\alpha$  ist die relative Wellenlängenseparation zwischen den Übergängen eines Alkali Dubletts (AD) proportional zu  $\alpha$ .
- Vorteil: große look-back Zeiten ( $\sim 10$  GJahre), Absorptionslinien – erzeugt durch interstellare Wolken- sind wesentlich schmaler als intrinsische Emissionslinien und erlauben genauere Messungen
- Murphy et al. 2001, 21 SI IV Dubletts

$$\Delta\alpha/\alpha = (-0.5 \pm 1.3_{\text{stat}}) \times 10^{-5}$$

- Murphy et al. 2002, 128 Absorptionssysteme, Rotverschiebung  $0.2 < z < 3.7$ ,  
 $\Delta\alpha/\alpha = (-0.57 \pm 0.10) \times 10^{-5} (5.7 \sigma)$

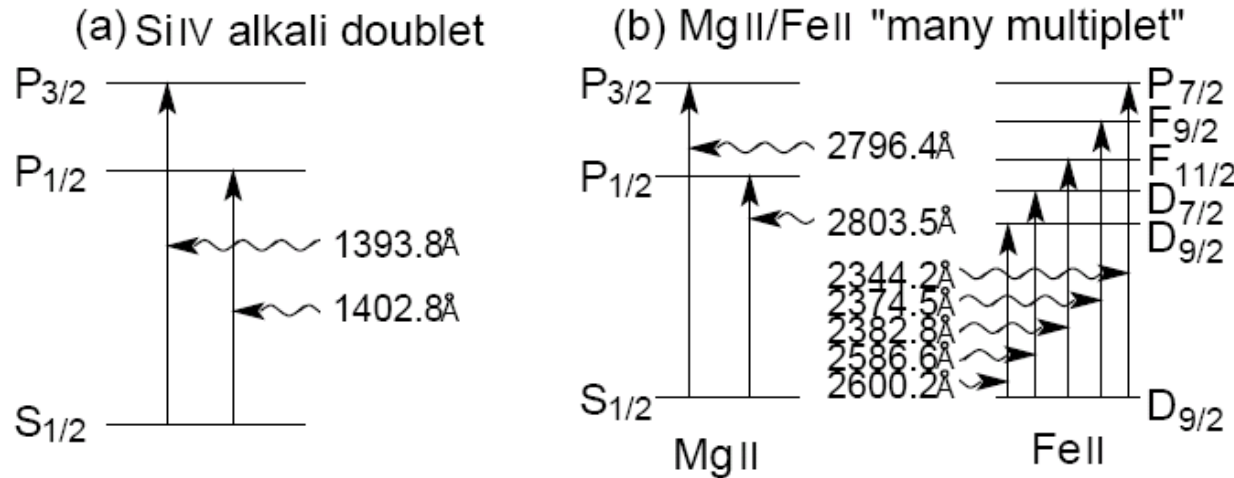
# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien



Murphy et al. 2002

Figure 1: *Keck/HIRES* spectrum of QSO GB 1759+7539 [9]. The full spectrum (upper panel) shows several emission lines intrinsic to the QSO (Ly- $\alpha$ , Ly- $\beta$ , NIV, SiIV, CIV). The damped Ly- $\alpha$  system (DLA) at  $z_{\text{abs}} = 2.6253$  gives rise to heavy element absorption lines in the red portion of the spectrum. The lower panel details a small region containing a CIV alkali doublet. The separation between corresponding velocity components in the two transitions is proportional to  $\alpha$  for  $\Delta\alpha/\alpha \ll 1$ .

# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

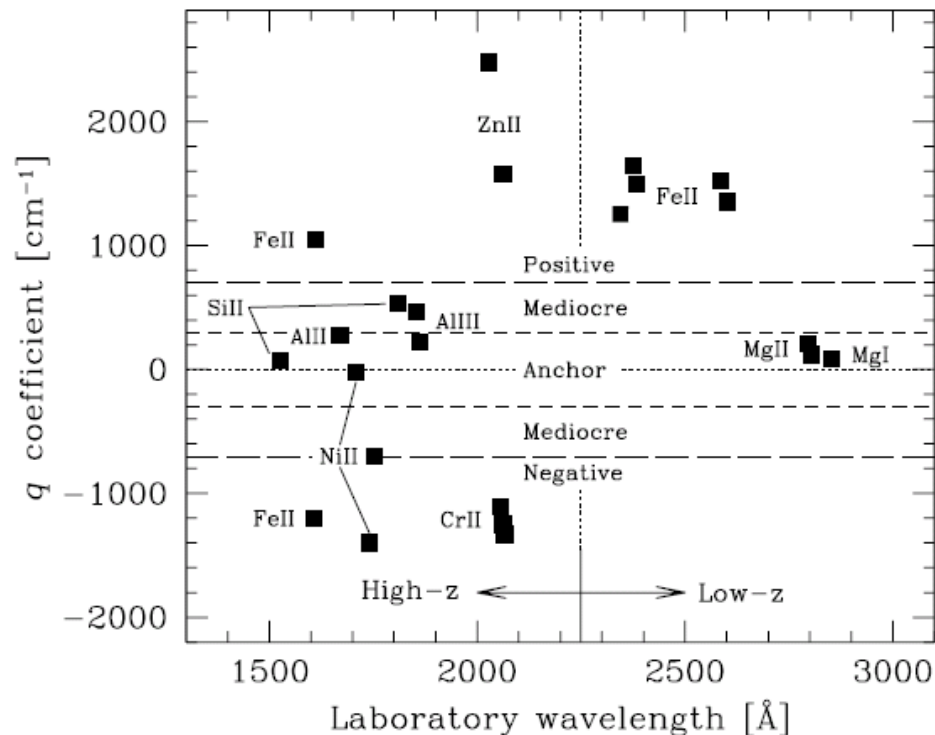


Murphy et al. 2002

Figure 2: (a) *The AD method is not sensitive to the maximal relativistic corrections in the common S ground state.* (b) *Comparison of different ions increases sensitivity to  $\Delta\alpha/\alpha$ , increases statistics and decreases systematic errors.*

- Problem der AD-Methode: Grundzustand s ist empfindlich für Änderungen in  $\alpha$  (hat die meisten relativistischen Korrekturen)
- Sicherer und unempfindlicher wäre es, die Übergänge zwischen verschiedenen Multiplets und/oder Atomen heranzuziehen

# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien



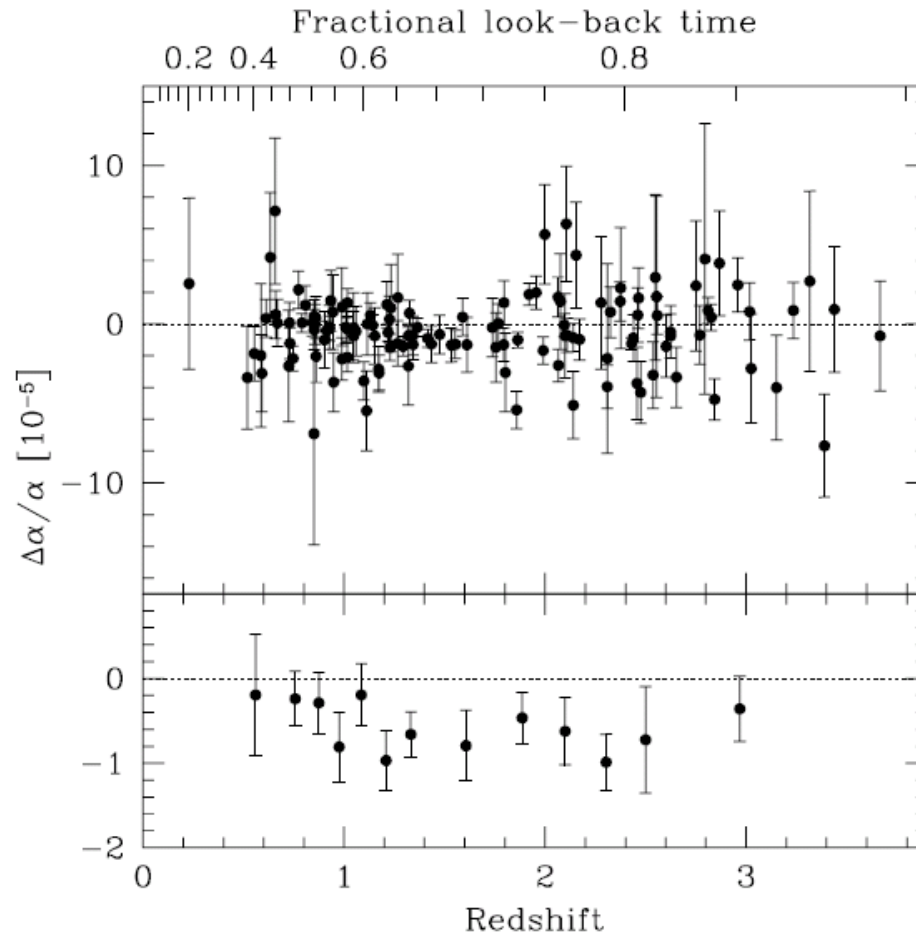
Murphy et al. 2002

Figure 3: *Distribution of  $q$  coefficients for the transitions used in the MM method. For the low- $z$  Mg/Fe systems, a compression of the spectrum can mimic  $\Delta\alpha/\alpha < 0$ . However, the complex arrangement at high- $z$  indicates resistance to such systematics.*

- Der  $q$ -Koeffizient enthält alle relativistischen Korrekturen und mißt die Empfindlichkeit für jede Übergangsfrequenz bzgl. Änderungen von  $\alpha$



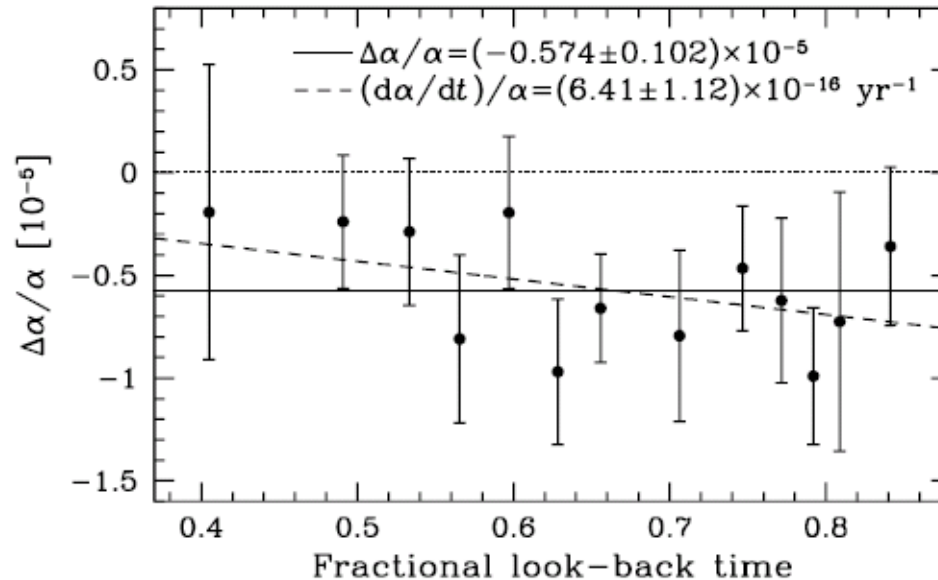
# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien



Murphy et al. 2002

Figure 4: *Distribution of  $\Delta\alpha/\alpha$  over absorption redshift. The upper panel shows  $\Delta\alpha/\alpha$  for 128 absorption systems with  $1\sigma$  errors. We bin  $\Delta\alpha/\alpha$  in the lower panel, presenting the weighted mean  $\Delta\alpha/\alpha$  and  $1\sigma$  error at the mean redshift for each bin.*

# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

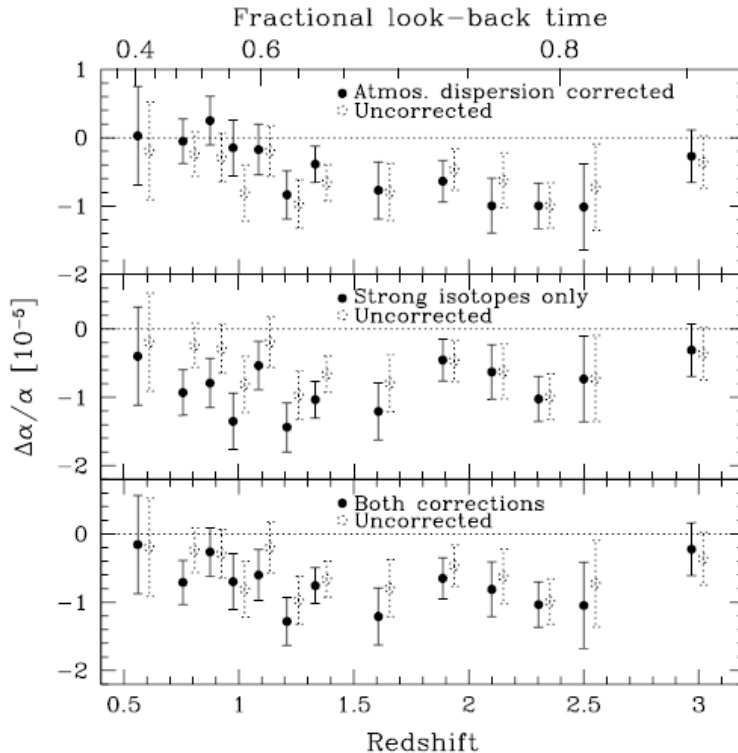


Murphy et al. 2002

Figure 5: *Temporal variation in  $\alpha$ . The points are the binned values of  $\Delta\alpha/\alpha$  from Fig. 4, the solid line is the weighted mean and the dashed line is a fit to the raw (i.e. unbinned) data fixed to  $\Delta\alpha/\alpha = 0$  at  $z = 0$ . A  $\chi^2$  analysis indicates that an evolving  $\Delta\alpha/\alpha$  is preferred.*

# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

- Atmosphäreneffekte (Erde)
- Isotopenverhältnisse auf Erde getestet, könnten im interstellaren Raum anders sein



Murphy et al. 2002

Figure 6: *Summary of systematic effects. The top two panels compare the uncorrected results in Fig. 4 with those corrected for our two most important potential systematic effects: atmospheric dispersion and isotopic ratio evolution. The lower panel combines the two corrections.*

# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

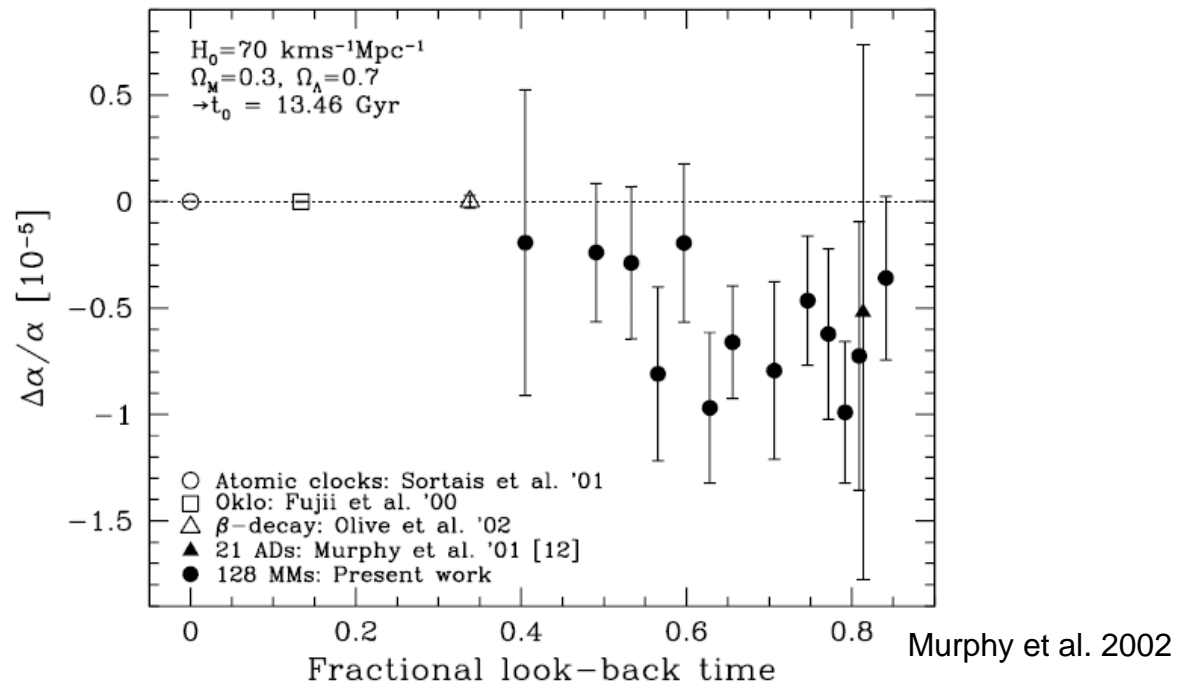
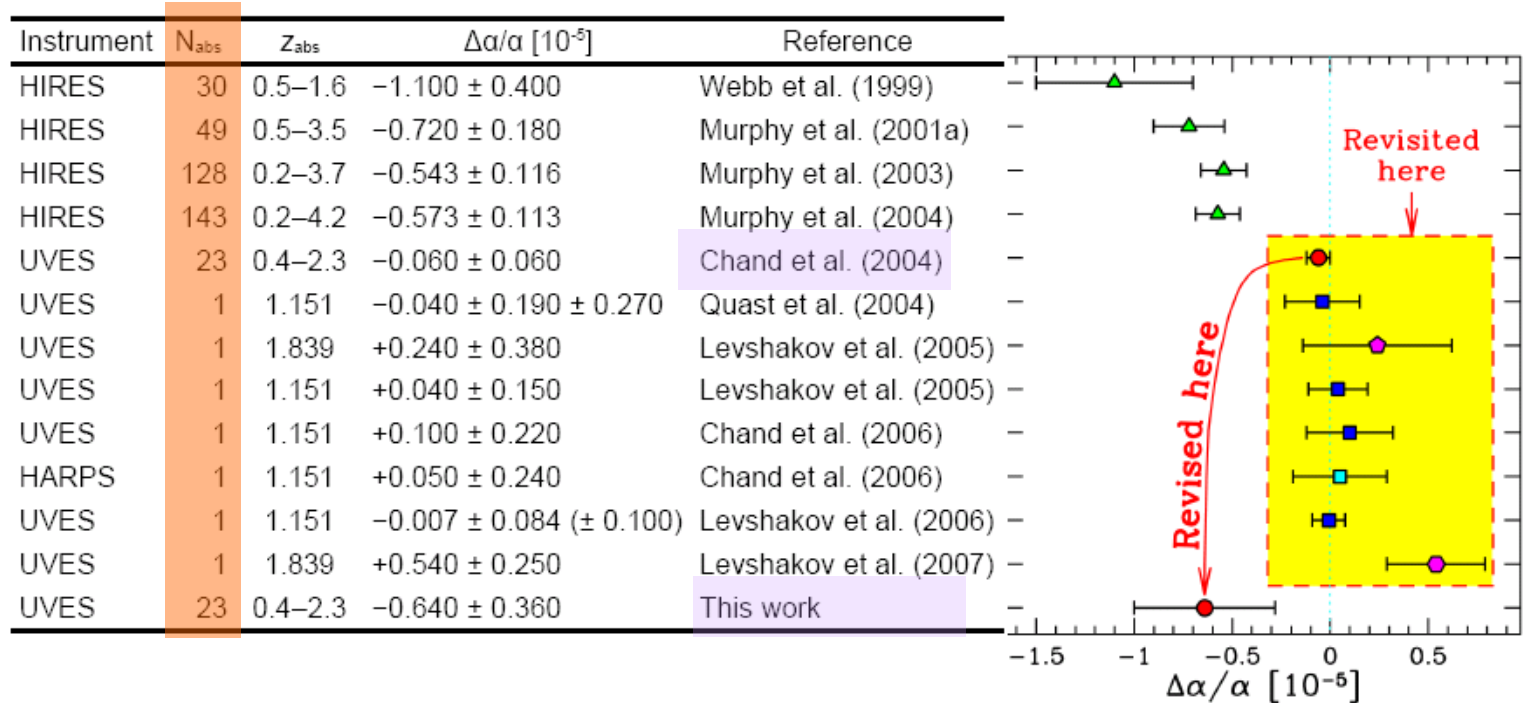


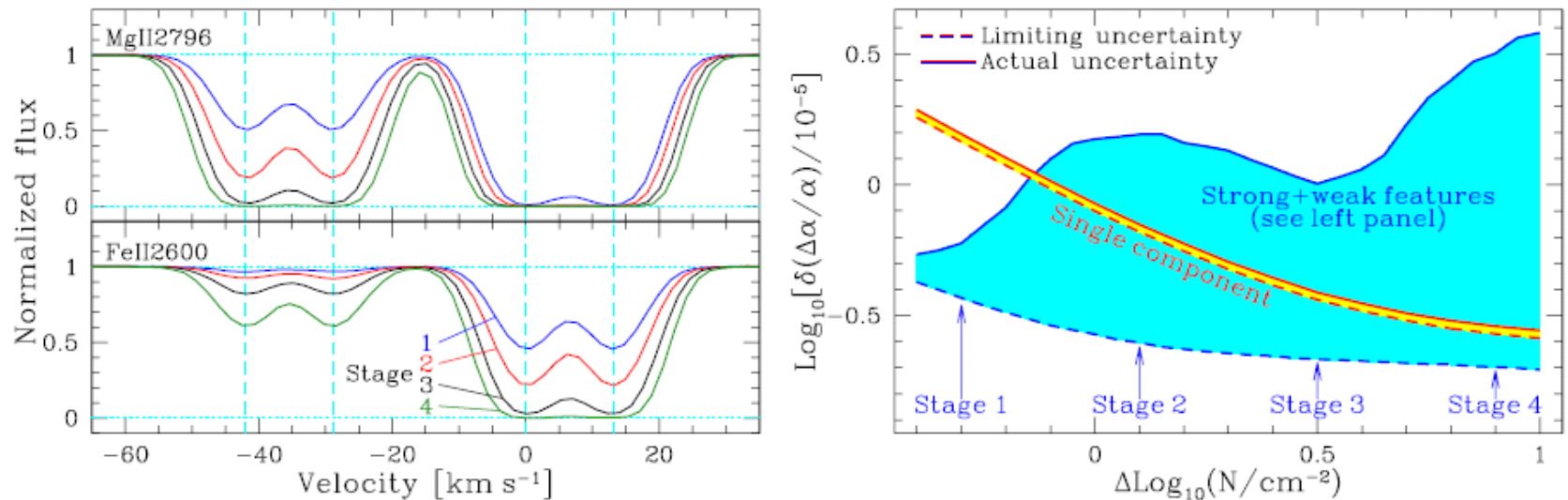
Figure 7: Comparison of the strongest current constraints on  $\Delta\alpha/\alpha$  from 'local' tests (open symbols) and QSO absorption lines (solid symbols).

# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

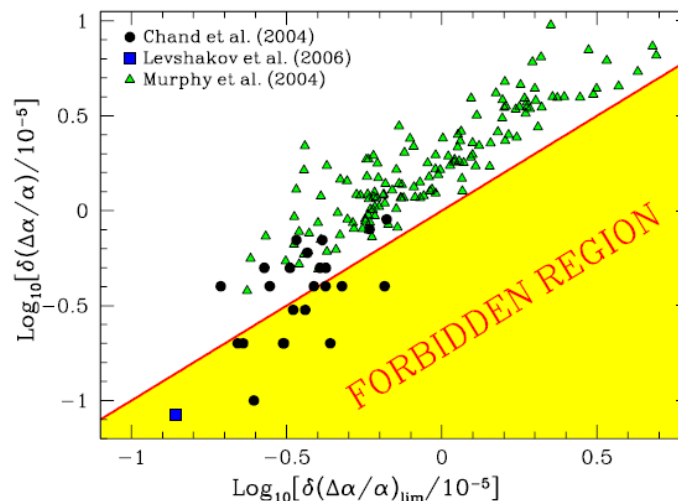
2 *M. T. Murphy, J. K. Webb, V. V. Flambaum*



**Figure 1.** Summary of the many-multiplet constraints on  $\Delta\alpha/\alpha$  in the literature. The table shows the instrument used, the sample size ( $N_{\text{abs}}$ ), the absorption redshift (or range), the value of  $\Delta\alpha/\alpha$  with  $1\text{-}\sigma$  error (for statistical samples, the weighted mean value and its  $1\text{-}\sigma$  error are quoted) and the corresponding references. The plot allows easy comparison of the  $\Delta\alpha/\alpha$  values and their  $1\text{-}\sigma$  errors but there are several important caveats the reader should note: (i) We demonstrate in this paper that some UVES and HARPS constraints are based on flawed parameter estimation techniques and are not reliable. The reliability of other UVES constraints is also questioned in this work; (ii) Many points are not independent. Points in the plot with the same symbols use the same data (to varying extents); (iii) The sample sizes are very different. Some samples contain only a single absorption system; random errors for statistical samples are systematic errors for single absorbers; (iv) The redshift ranges vary considerably. If  $\alpha$  does vary from absorber to absorber then that information is lost here; (v) The typical signal-to-noise ratio of the spectra in each sample is different; (vi) Some error-bars on  $\Delta\alpha/\alpha$  contain a systematic component which is combined with the statistical one into a single error term. Other points contain no systematic error term. Quast et al. (2004) quote a separate systematic term. Levshakov et al. (2006) do calculate a systematic term but do not quote it together with the statistical term.



**Figure 2.** Left-hand panel: Simulation of two transitions in a multi-component absorber. Both transitions have the same velocity structure: two main spectral features, each comprising two blended velocity components with equal column densities. Labelled are distinct stages of differential saturation in the two main spectral features. Right-hand panel: The difference between the limiting precision,  $\delta(\Delta\alpha/\alpha)_{\text{lim}}$ , and the actual precision (as derived by  $\chi^2$ -minimization analysis) varies strongly from stage to stage. In a single-component absorber the actual uncertainty tracks  $\delta(\Delta\alpha/\alpha)_{\text{lim}}$ , as expected. See text for discussion.

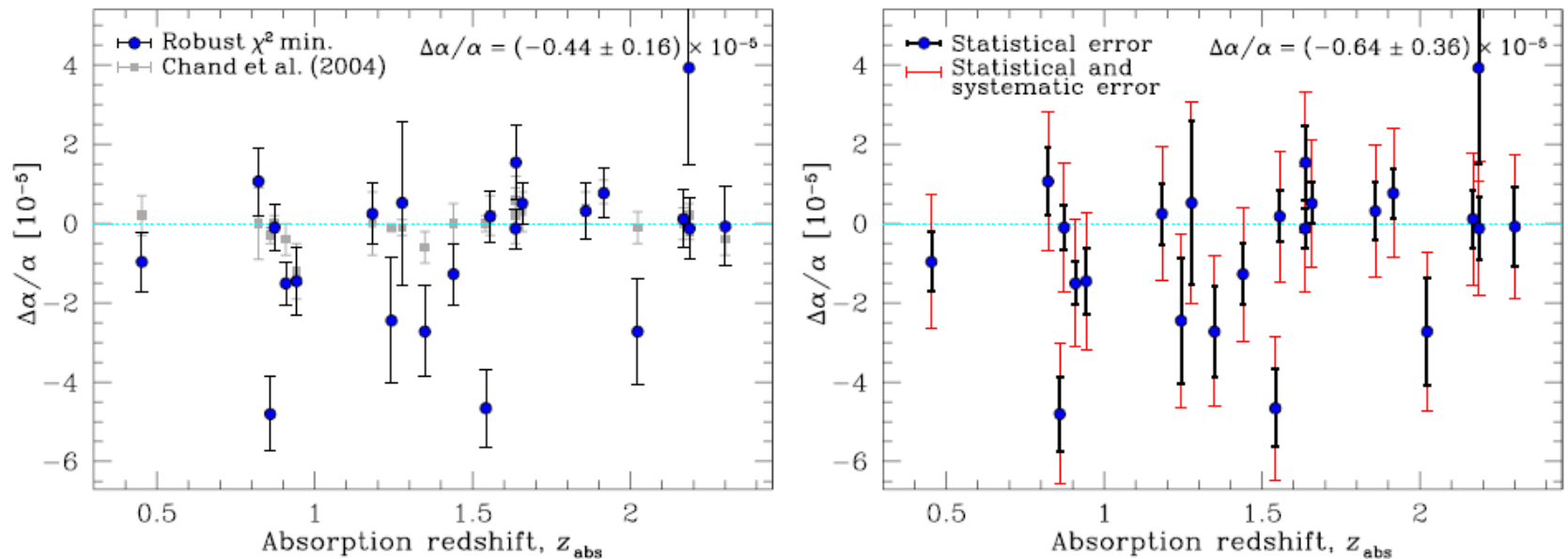


**Figure 3.** Quoted errors on  $\Delta\alpha/\alpha$  versus the limiting precision,  $\delta(\Delta\alpha/\alpha)_{\text{lim}}$ , for current samples. The Chand et al. (2004) and Levshakov et al. (2006) samples fail the basic requirement that  $\delta(\Delta\alpha/\alpha)$  must be greater than  $\delta(\Delta\alpha/\alpha)_{\text{lim}}$ .



# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

Murphy et al. 2007



**Figure 4.** Left: Our new results (filled circles) are inconsistent with those of Chand et al. (2004) (grey squares) even though the same reduced data and profile fits were used. The only difference is that our  $\chi^2$  minimization procedure is robust. The weighted mean  $\Delta\alpha/\alpha = (-0.44 \pm 0.16) \times 10^{-5}$  is consistent with our previous HIRES results but the scatter in the new results indicate remaining systematic errors in the data and fits. Right: To account for this additional scatter, we increase  $1\text{-}\sigma$  errors by adding a constant amount in quadrature such that the final  $\chi^2_{\nu} = 1$  about the weighted mean. The most conservative weighted mean result therefore becomes  $\Delta\alpha/\alpha = (-0.64 \pm 0.36) \times 10^{-5}$ .

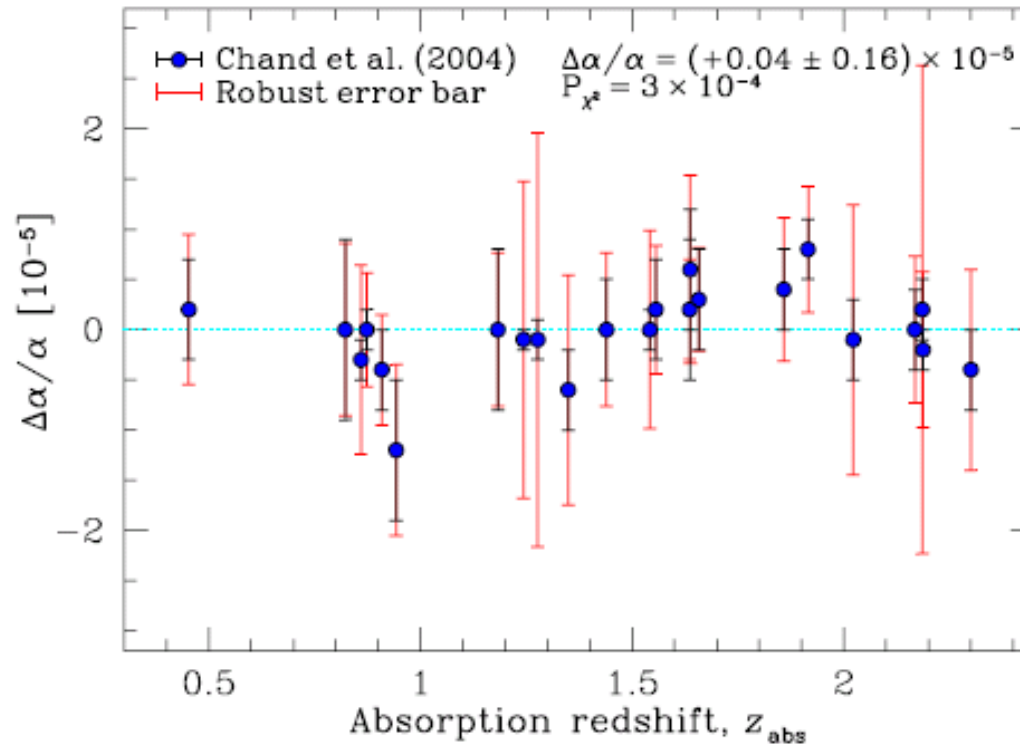
# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

**Table 1.** Comparison of results from Chand et al. (2004) and this paper. Columns 1 & 2 give the J2000 and B1950 quasar names; the quasar emission redshifts are given in column 3. Column 4 gives the redshifts of the absorption systems. Columns 5 & 6 give the values from Chand et al. (2004) of  $\Delta\alpha/\alpha$  and  $\chi^2$  per degree of freedom,  $\chi^2_\nu$ , for the absorption profile fit. Columns 7 & 8 give the results of our attempt to reproduce those values. Column 9 gives our estimate of the wavelength calibration errors derived using the method of Murphy et al. (2007). All uncertainty estimates are  $1-\sigma$ .

Quasar name		$z_{\text{em}}$	$z_{\text{abs}}$	Chand et al. (2004)		This work		$(\Delta\alpha/\alpha)_{\text{ThAr}}$ [ $10^{-5}$ ]
J2000	B1950			$\Delta\alpha/\alpha$ [ $10^{-5}$ ]	$\chi^2_\nu$	$\Delta\alpha/\alpha$ [ $10^{-5}$ ]	$\chi^2_\nu$	
J000344–232355	HE 0001–2340	2.280	0.4524	$0.2 \pm 0.5$	1.10	$-0.963 \pm 0.747$	3.27	$-0.260 \pm 0.093$
J000344–232355	HE 0001–2340	2.280	2.1854	$0.2 \pm 0.3$	1.15	$3.926 \pm 2.431$	2.16	$0.145 \pm 0.099$
J000344–232355	HE 0001–2340	2.280	2.1872	$-0.2 \pm 0.2$	1.20	$-0.122 \pm 0.774$	2.10	$-0.089 \pm 0.099$
J000448–415728	Q 0002–422	2.760	1.5419	$0.0 \pm 0.2$	0.66	$-4.655 \pm 0.988$	1.00	$-0.090 \pm 0.103$
J000448–415728	Q 0002–422	2.760	2.1679	$0.0 \pm 0.4$	1.03	$0.115 \pm 0.731$	0.78	$-0.102 \pm 0.069$
J000448–415728	Q 0002–422	2.760	2.3006	$-0.4 \pm 0.4$	0.99	$-0.075 \pm 1.001$	2.54	$-0.066 \pm 0.086$
J011143–350300	Q 0109–3518	2.410	1.1827	$0.0 \pm 0.8$	0.98	$0.249 \pm 0.764$	1.70	$0.011 \pm 0.107$
J011143–350300	Q 0109–3518	2.410	1.3489	$-0.6 \pm 0.4$	1.08	$-2.724 \pm 1.144$	2.28	$0.091 \pm 0.083$
J012417–374423	Q 0122–380	2.189	0.8221	$0.0 \pm 0.9$	0.87	$1.062 \pm 0.859$	2.27	$-0.088 \pm 0.078$
J012417–374423	Q 0122–380	2.189	0.8593	$-0.3 \pm 0.2$	1.29	$-4.803 \pm 0.941$	2.81	$0.027 \pm 0.078$
J012417–374423	Q 0122–380	2.189	1.2433	$-0.1 \pm 0.1$	0.89	$-2.447 \pm 1.579$	4.10	$0.376 \pm 0.095$
J024008–230915	PKS 0237–23	2.223	1.6359	$0.2 \pm 0.7$	0.82	$-0.124 \pm 0.498$	2.00	$-0.062 \pm 0.105$
J024008–230915	PKS 0237–23	2.223	1.6372	$0.6 \pm 0.6$	1.16	$1.539 \pm 0.939$	2.93	$0.054 \pm 0.068$
J024008–230915	PKS 0237–23	2.223	1.6574	$0.3 \pm 0.5$	0.92	$0.510 \pm 0.514$	2.29	$0.121 \pm 0.127$
J045523–421617	Q 0453–423	2.660	0.9084	$-0.4 \pm 0.4$	1.82	$-1.507 \pm 0.549$	4.21	$-0.141 \pm 0.122$
J045523–421617	Q 0453–423	2.660	1.8584	$0.4 \pm 0.4$	1.13	$0.315 \pm 0.712$	3.77	$0.467 \pm 0.118$
J134427–103541	HE 1341–1020	2.134	0.8728	$0.0 \pm 0.2$	1.19	$-0.100 \pm 0.567$	2.49	$-0.065 \pm 0.071$
J134427–103541	HE 1341–1020	2.134	1.2767	$-0.1 \pm 0.2$	1.01	$0.524 \pm 2.062$	4.30	$0.531 \pm 0.097$
J134427–103541	HE 1341–1020	2.134	1.9154	$0.8 \pm 0.3$	1.49	$0.767 \pm 0.627$	2.08	$0.058 \pm 0.072$
J135038–251216	HE 1347–2457	2.534	1.4393	$0.0 \pm 0.5$	1.10	$-1.272 \pm 0.767$	4.60	$0.024 \pm 0.114$
J212912–153841	PKS 2126–158	3.268	2.0225	$-0.1 \pm 0.4$	1.19	$-2.725 \pm 1.344$	2.65	$0.034 \pm 0.111$
J222006–280323	HE 2217–2818	2.406	0.9425	$-1.2 \pm 0.7$	0.90	$-1.453 \pm 0.852$	2.43	$-0.258 \pm 0.114$
J222006–280323	HE 2217–2818	2.406	1.5558	$0.2 \pm 0.5$	1.22	$0.183 \pm 0.639$	2.93	$-0.112 \pm 0.114$

# Feinstrukturkonstante: Quasar Absorptionslinien

Murphy et al. 2007



**Figure 6.** The  $1\text{-}\sigma$  uncertainties from our analysis (grey/red bars) compared with those of Chand et al. (2004) (black bars). The tight distribution of  $\Delta\alpha/\alpha$  values from Chand et al. (2004) has a probability of just  $P_{\chi^2} = 3 \times 10^{-4}$  of occurring by chance given our new robust error estimates.



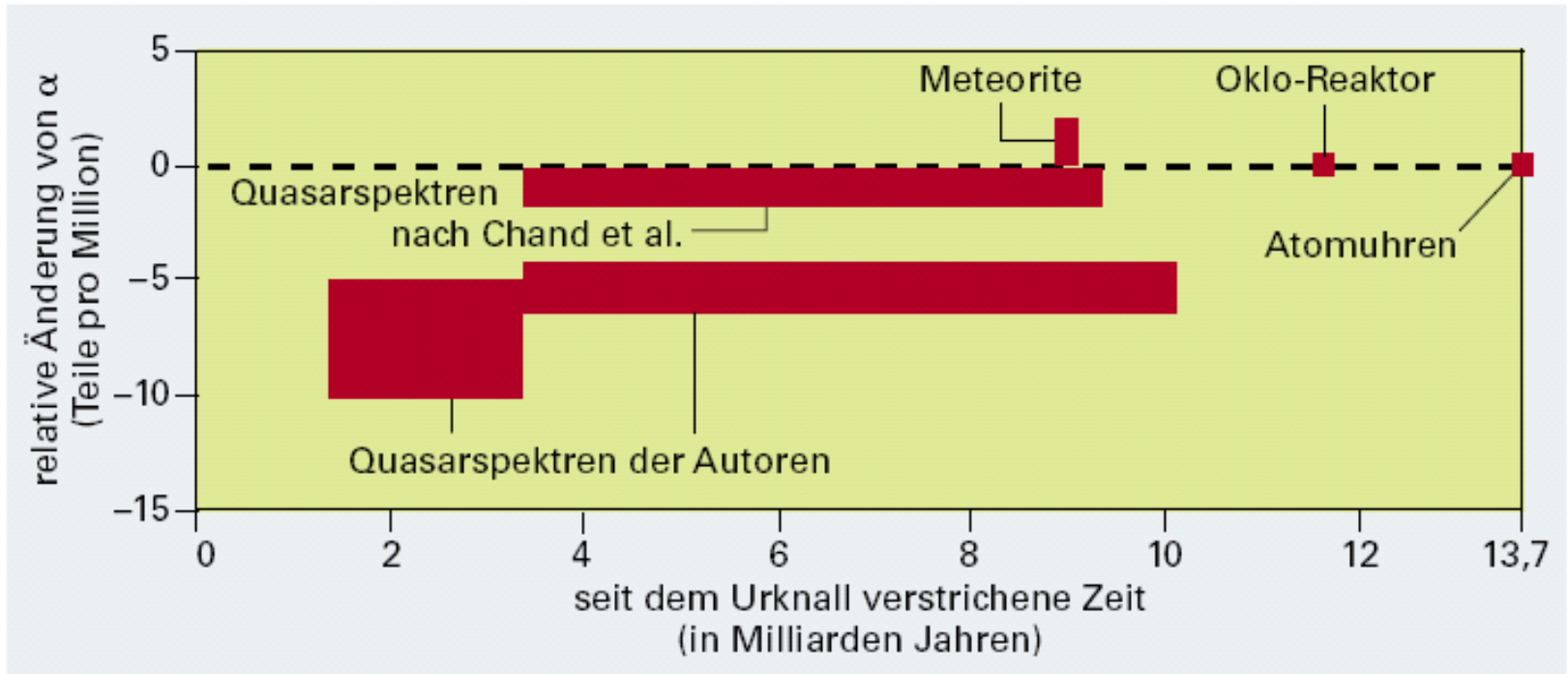
## **Potential systematic effects:**

- **Laboratory wavelength errors:** New, mutually consistent laboratory spectra from Imperial College, Lund University and NIST
- **Data quality variations:** Can only produce systematic shifts if combined with laboratory wavelength errors
- **Heliocentric velocity variation:** Smearing in velocity space is degenerate with fitted redshift parameters
- **Isotopic ratio shifts:** Very small effect possible if evolution of isotopic ratios allowed
- **Hyperfine structure shifts:** same as for isotopic shifts
- **Magnetic fields:** Large scale fields could introduce correlations in  $\Delta\alpha/\alpha$  for neighbouring QSO site lines (if QSO light is polarised) - extremely unlikely and huge fields required
- **Wavelength miscalibration:** mis-identification of ThAr lines or poor polynomial fits could lead to systematic miscalibration of wavelength scale
- **Temperature changes during observations:** Refractive index changes between ThAr and QSO exposures – random error
- **Line blending:** Are there ionic species in the clouds with transitions close to those we used to find  $\Delta\alpha/\alpha$ ?
- **Atmospheric refraction effects:** Different angles through optics for blue and red light – can only produce positive  $\Delta\alpha/\alpha$  at low redshift
- **Instrumental profile variations:** Intrinsic IP variations along spectral direction of CCD?

# Die Feinstrukturkonstante

- Daten aus der Oklo-Mine in Westafrika, vor ca. 2 Milliarden Jahren war dort Uran so stark angehäuft, dass eine natürliche Kettenreaktion stattfand: Feinstrukturkonstante hat sich seitdem nicht geändert!
- Messungen der Spektrallinien von Quasaren mit dem Keck-Teleskop auf Hawaii deuten auf eine leichte Abnahme der Feinstrukturkonstante um etwa ein hundertstel Promille im Verlauf von 10 Milliarden Jahren hin (variable Elektronenladung oder Lichtgeschwindigkeit??)
- Messungen der Spektrallinien von Quasaren mit dem VLT deuten auf Konstanz der Feinstrukturkonstanten hin
- Präzisionsmessungen im Labor seit Kurzem möglich: Untersuchungen von T. Hänsch am MPI für Quantenoptik belegen die Konstanz der Feinstrukturkonstante mit einer Genauigkeit von 15 Nachkommastellen über einen Zeitraum von 4 Jahren

# Feinstrukturkonstante



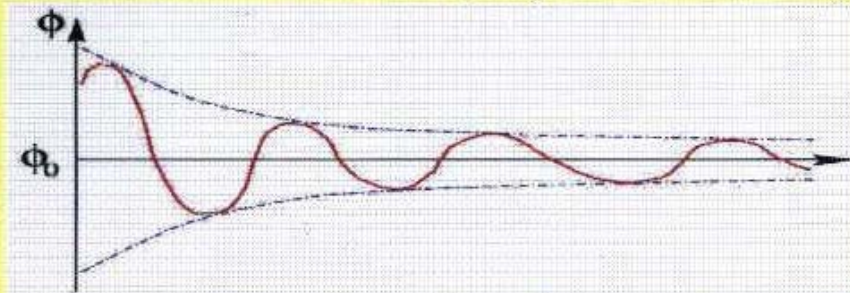
AUSON KENDALL NACH: JOHN K. WEBB



## “Motivating” comments from the literature:

- “Unified theories applied to cosmology suffer generically from a problem of predicting time-dependent coupling constants.” – Fujii Y., Omote M., Nishakoa T., 1994, Prog. Theor. Phys., 92, 3
- “ ... in cosmology with extra dimensions people try to find solutions with the external dimensions expanding while the extra dimensions remain static. But at present no mechanism for keeping the internal spatial scale static has been found.” – Li L. –X, Gott J. R. III, 1998, Phys. Rev. D, 58, 103513  $\alpha \propto G / R_{KK}^2$
- “ ...  $dR_{KK}/dt \neq 0$  ... could give rise to observable time variations in the fundamental “constants” of our four-dimensional world and thereby provide a window to the extra dimensions.” – Marciano W. J., 1984, Phys. Rev. Lett., 52, 489
- “ ... all coupling constants and masses of elementary particles, being dependent on the dilaton scalar field, should be, generally speaking, space and time dependent, and influenced by local circumstances.” – Damour T., Polyakov A. M., 1994, Nucl. Phys. B, 423, 532

$$\alpha = \alpha(\phi)$$



- $\alpha = e^2/hc$  - “The minimal varying- $c$  theory is of interest because it offers a means of solving the so-called cosmological problems: the horizon, flatness, cosmological constant, entropy, and homogeneity problems.” – Barrow J. D., Magueijo J., 1998, Phys. Lett. B, 443, 104

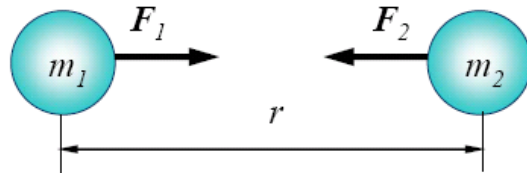
# 17.04. : Die Konstanz der Naturkonstanten

- Die Gravitationskonstante

# Gravitationskonstante

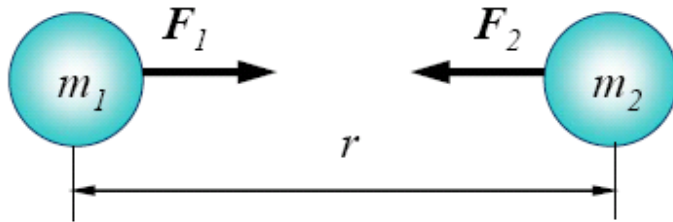
## Gravitation

---



- Gravitation = Wechselwirkung zwischen Materie
- Art der Wechselwirkung: Kraft
- Anziehende Kraft
- Es ist keine Abschirmung der Kraft möglich

# Gravitationskonstante



Messungen zwischen zwei kugelförmigen Gegenständen ergeben:  
Die Anziehungskraft ist

- proportional zu  $m_1$
- proportional zu  $m_2$
- proportional zum Reziprokwert des Quadrates des Abstandes der Kugelmittelpunkte

$$F \sim \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2} \quad (\text{oder } \text{m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2})$$

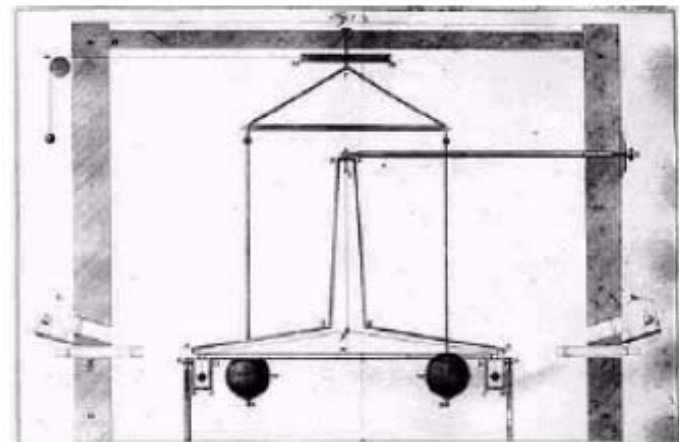
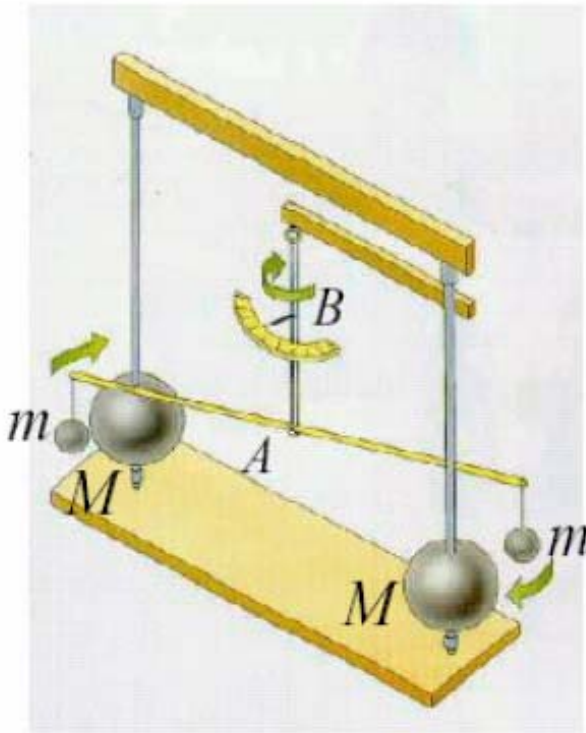


# Gravitationskonstante

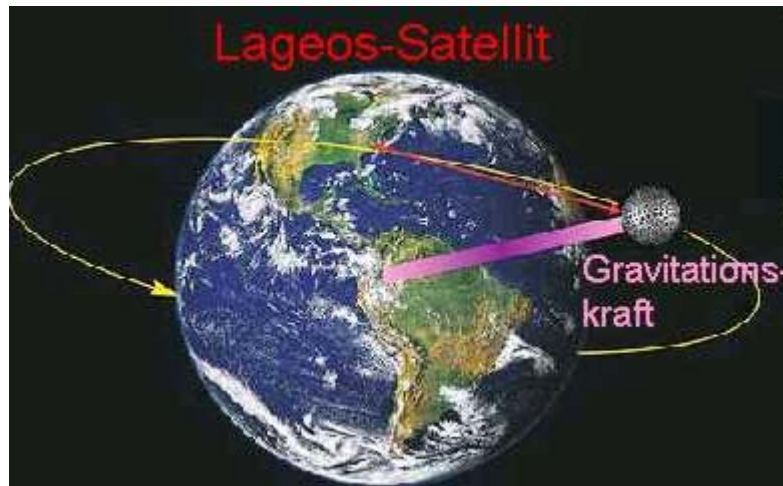
- Der erste experimentelle Beweis des Gravitationsgesetzes und Bestimmung des Wertes der Gravitationskonstante  $G$

- Unter der Wirkung des angreifenden Kräftepaars dreht sich der Waagebalken  $A$
- Faden  $B$  verdrillt
- => Messung des Drehwinkels

(H. Cavendish (1731—1810))



# Cavendish und die Gravitationskonstante



Quelle: American institute of physics



$G = 6,67390 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{s}^2$  mit einer Unsicherheit von 0,0014%



## „Die Fallbeschleunigung“

$F = G \cdot \frac{m_E^S \cdot m^S}{r_E^2}$	1 N	Gravitationskraft der Erde
$F = g \cdot m^S$	1 N	Gravitationskraft mit „Fallbeschleunigung“
$g = G \cdot \frac{m_E^S}{r_E^2}$	1 N	„Fallbeschleunigung“
$g = 9,81$	1 m/s <sup>2</sup>	Betrag der Fallbeschleunigung an der Erdoberfläche

# Gravitationskonstante

Labor	$G \cdot 10^{11}$
New Zealand MSL	6.6742(6)
Zürich	6.6749(14)
Wuppertal	6.6735(9)(13)
JILA	6.6873(94)
BIPM	6.683(11)
Karagioz (Russia)	6.6729(5)
Luther/Towler 1982	6.6726(5)
PTB 1995	6.71540(56)

# Gravitationskonstante

- Bisherige Messungen der Gravitationskonstante schwanken um knapp ein Prozent – ein Skandal in einer Welt der Präzisionsphysik!
- Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig liegt am weitesten neben anderen Metrologie-Instituten
- Terry Quinn, Präsident des Bureau International des Poids et Mesures in Paris hat einen Wert veröffentlicht, der um 0.4 Promille neben den meisten anderen liegt.
- Aber:  $G$  ist ungleich schwerer zu bestimmen als  $\alpha$ , da die Gravitationskraft so schwach ist
- Theoretiker spekulieren über eine zeitliche Variation von  $G$
- Paul Dirac, einer der Väter der Quantenmechanik schlug eine zeitabhängige Gravitationskonstante vor – allerdings schrieb er den Artikel während der Flitterwochen (Gamow: „Das passiert, wenn Leute heiraten.“)

# Programm SoSe 09

03.04.	Überblick über die Themen des Semesters
17.04.	Die Konstanz der Naturkonstanten
08.05.	Einstein & das Äquivalenzprinzip
22.05.	Zeit & die Schleifen-Quantengravitation
05.06.	Zeitreisen
19.06.	Gibt es Extraterrestrisches Leben?
03.07.	

User: heidelberg

Passwd: so2009