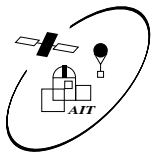


Pioneer 10/11 und die Gültigkeit der Gravitationstheorie

Jörn Wilms

Institut für Astronomie und Astrophysik

1. Einleitung
2. Überprüfung im Kleinen
3. Überprüfung im Großen
 - Rotationskurven von Galaxien
 - Dunkle Materie
 - MOND
4. Pioneer und MOND
 - anomale Beschleunigung
 - alternative Physik?
 - systematische Fehlerquellen
5. Zusammenfassung



Gravitationsgesetz

Newton:

$$\mathbf{F} = -\frac{GMm}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r}$$

(natürlich auch ableitbar aus ART...)

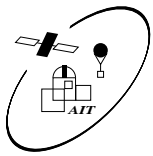
Gravitationstheorie gut überprüft für mittlere und starke Gravitationsfelder (z.B. Will, 1993):

- **Lichtablenkung** (Sonnenfinsternisse...)
- **Hulse & Taylor Pulsar PSR 1913+16**
- **Knotendrehung des Merkur**
- **Shapiro Delay** (Venus)
- **Newtonsches Limit** (Planetensystem)

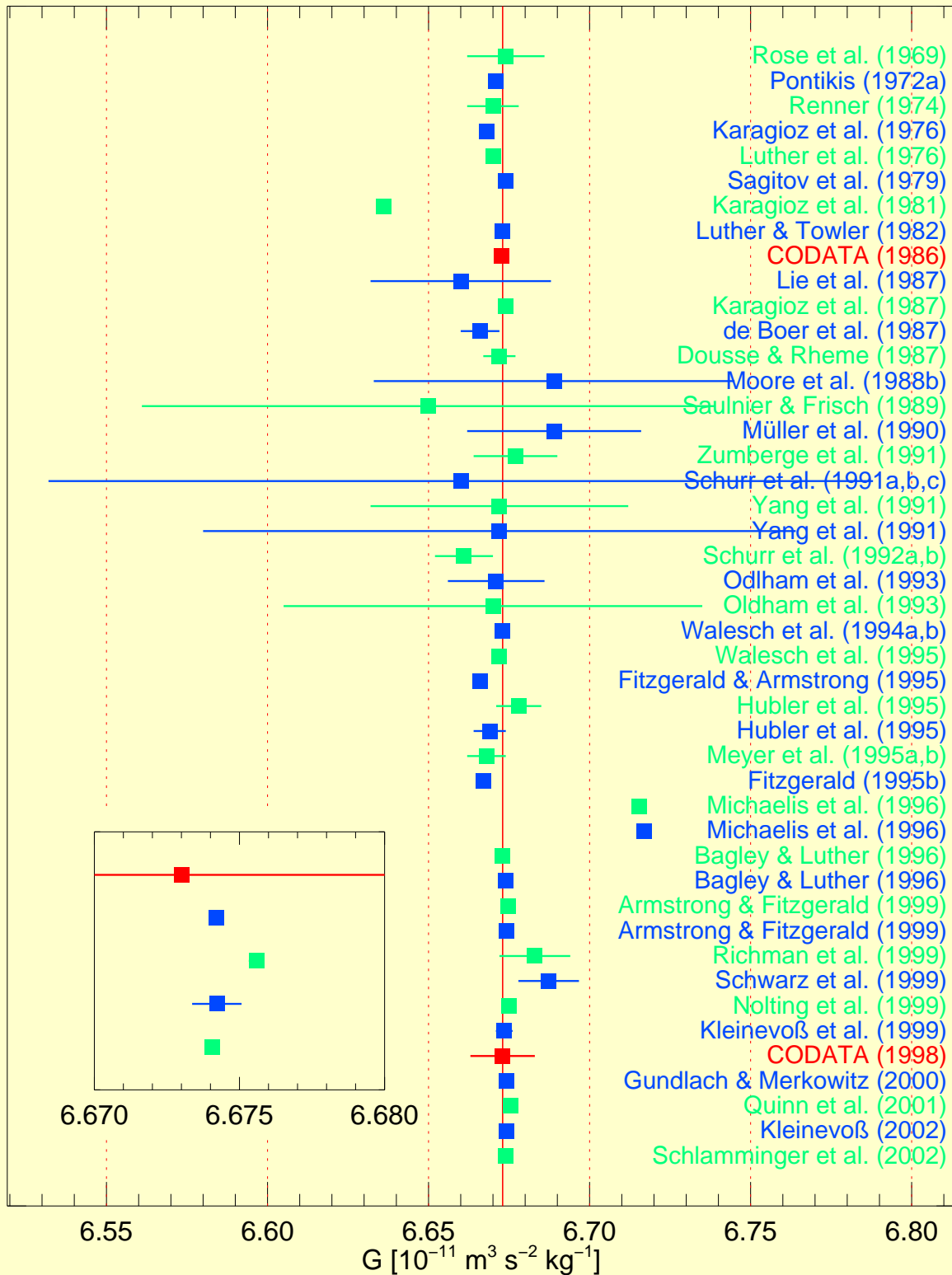
usw.

Allerdings gibt es auch Bereiche **ohne/wenig experimentelle Verifikation**:

- **G ungenaueste Naturkonstante**
- Gültigkeit von r^{-2} bei **Abstand $d \lesssim 10^{-3}$ m**
- Gültigkeit von r^{-2} bei **$d \gtrsim 10^{12}$ m**

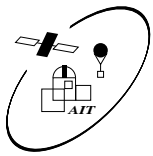


Unsicherheit von G

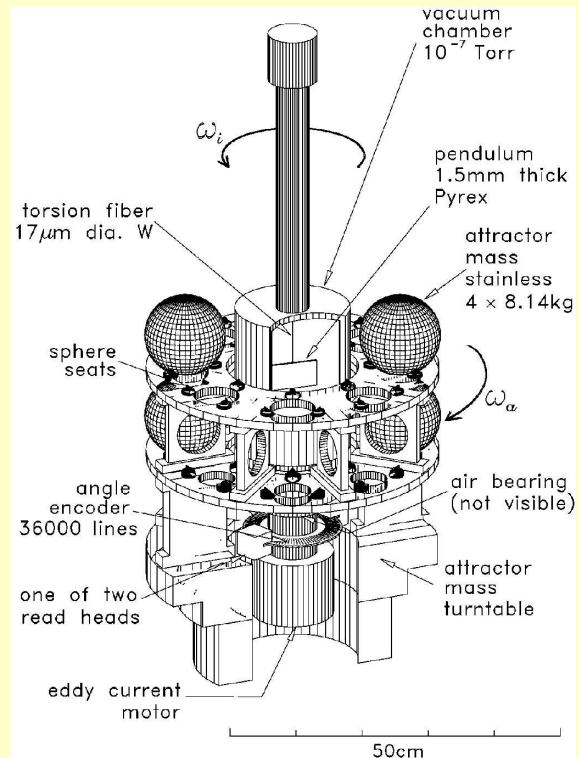


(erweitert nach Gillies [1997, RPP 60, 151; 1999, Meas. Sci. Tech. 10, 421]). **CODATA (1998): $6.673(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$**



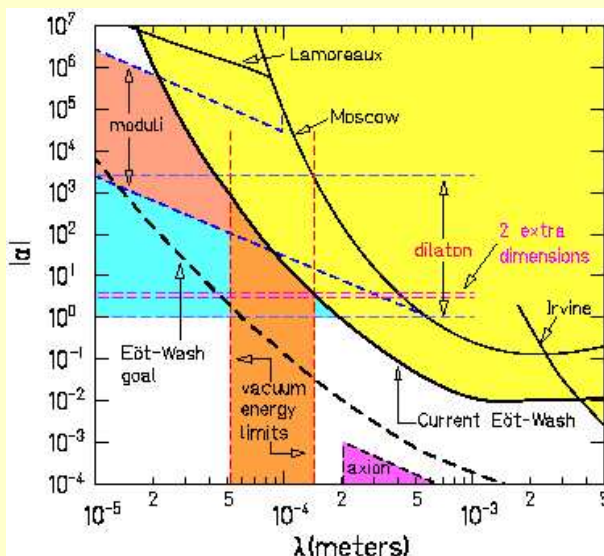


Überprüfung im Kleinen



Gundlach & Merkowitz (2000, PRL 85, 2869)

Neue Messungen: **Torsionswaagen mit Kompensation der Torsion des Quarzfadens** \implies **Vermeidung systematischer Fehler** (Anelastizität!); ~ 15 ppm Fehler.



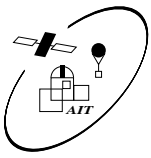
Ähnlicher Setup (Eöt-Wash Group) erlaubt Test von r^{-2} bis $d \sim 150 \mu\text{m}$.

Bislang keine Abweichung von r^{-2} gefunden!

(Hoyle et al., 2001, PRL 86, 1418)

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$





Spiralgalaxien

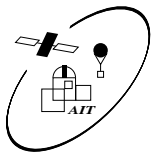


NGC 1232 (ESO VLT [UT1+FORS])
 $d = 30$ Mpc, Bilddurchmesser ~ 70 kpc)

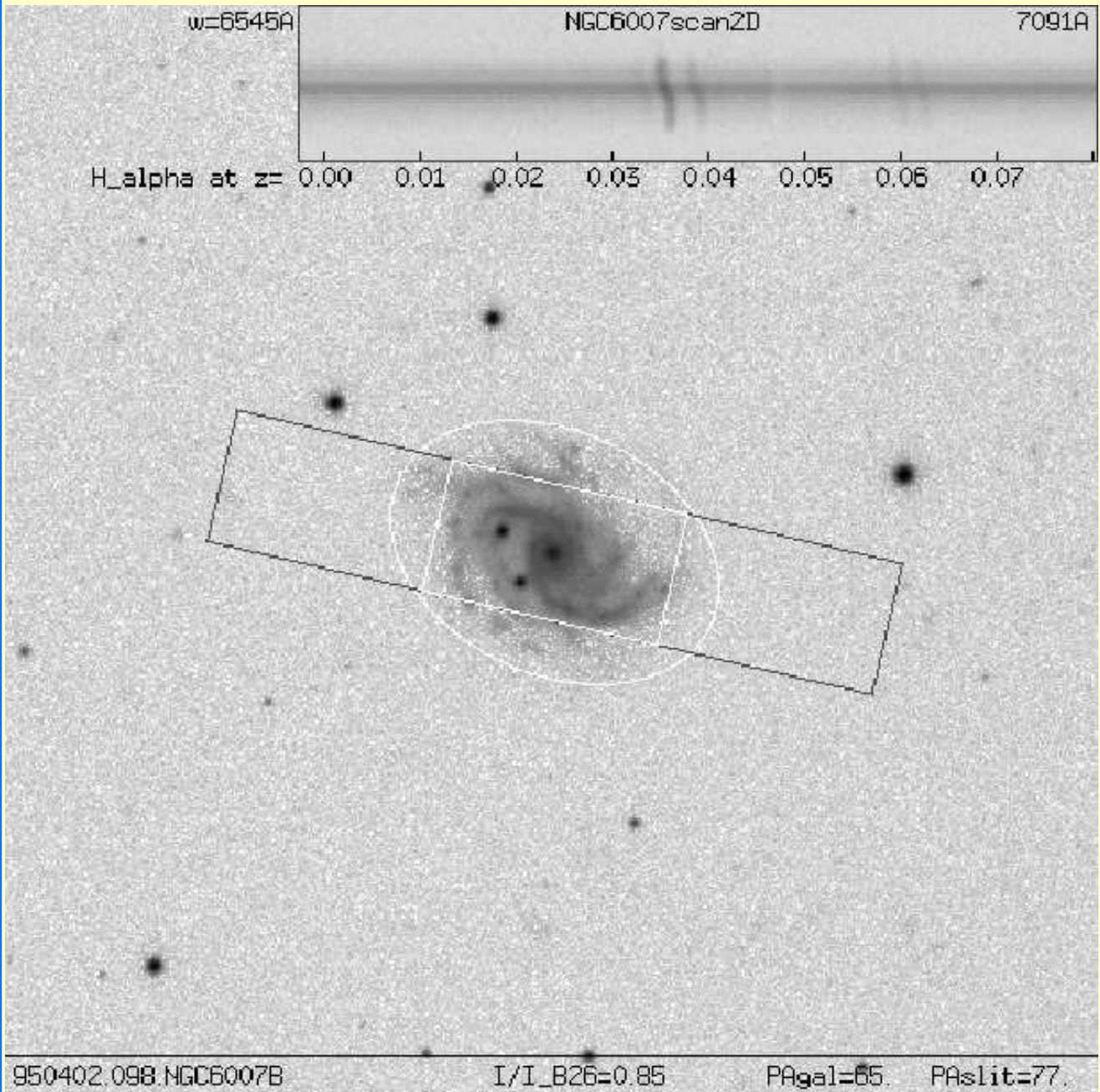
Überprüfung des Gravitationsgesetzes auf großen Skalen: **Rotation von Spiralgalaxien**

Typische Parameter von Spiralgalaxien:

- typische **Leuchtkraft**: $\sim 1 \dots 15 \times 10^9 L_{\odot}$
($1 L_{\odot} = 4 \times 10^{26}$ W)
- typische (sichtbare) **Masse**: $\sim 10 \dots 300 \times 10^9 M_{\odot}$
($1 M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ kg).
- typische **Größenskalen**: **Radius** $\sim 20 \dots 30$ kpc,
z-Ausdehnung ~ 1 kpc ($1 \text{ pc} = 3.26 \text{ Ly} = 3.1 \times 10^{16}$ m)

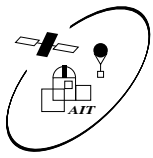


Rotationskurven: Messung, I

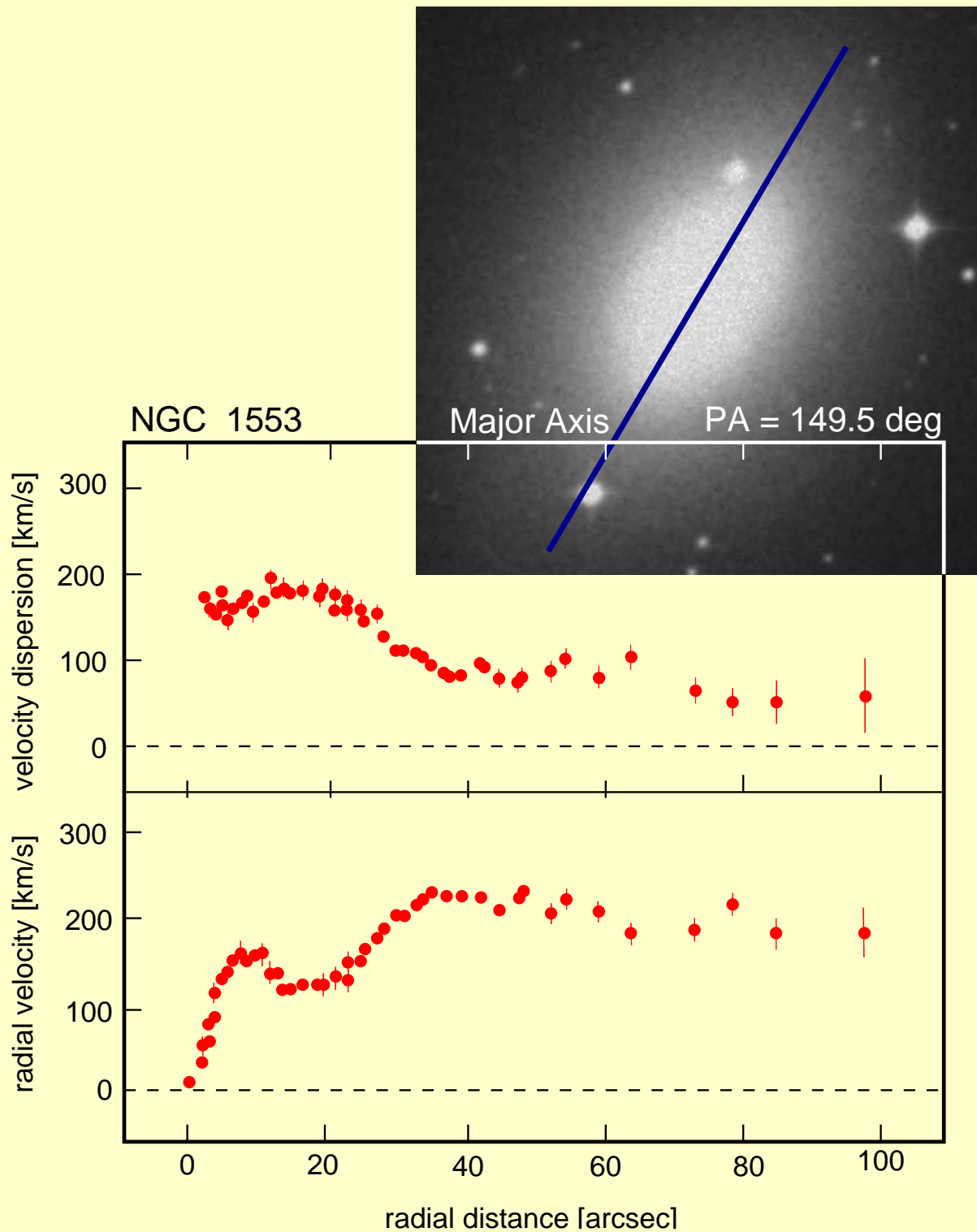


NGC 6007 (Jansen; <http://www.astro.rug.nl/~nfgs/>)

IAAT



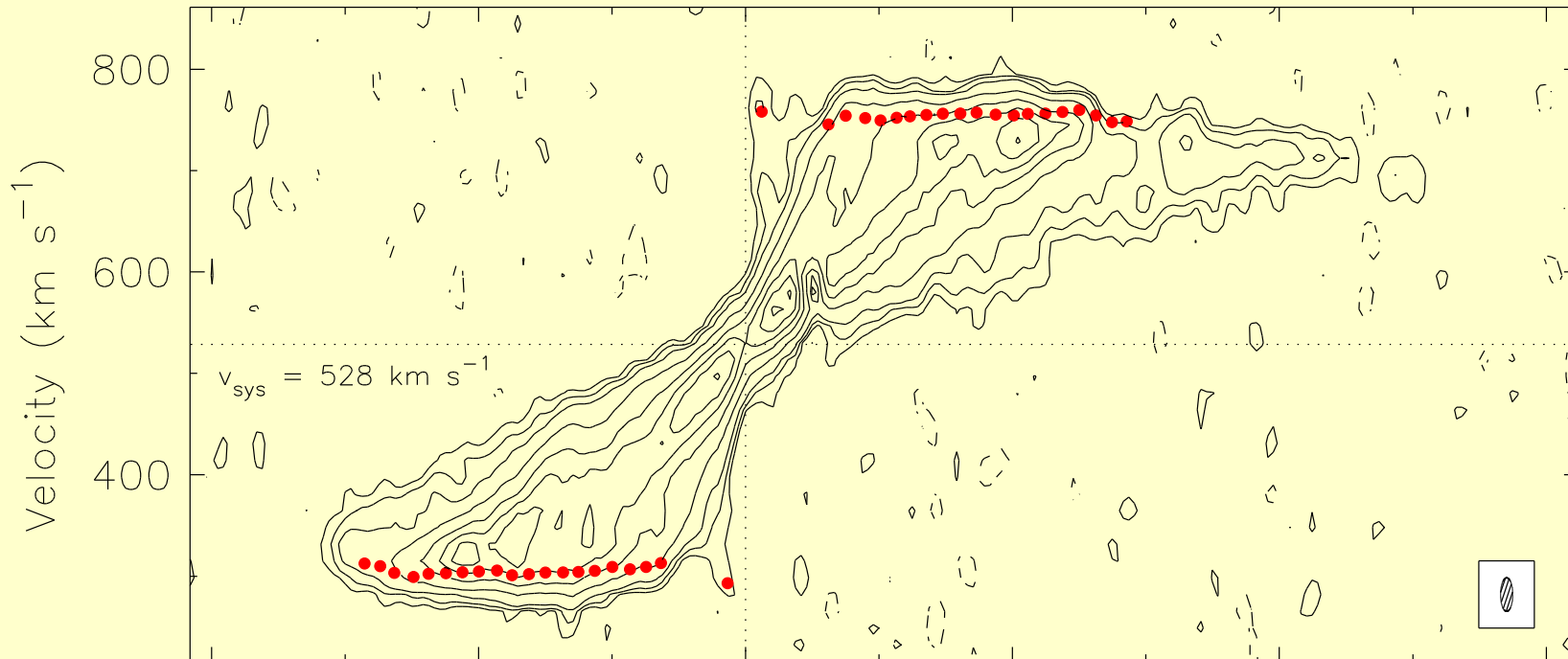
Rotationskurven: Messung, II



NGC 1553 (S0) nach Kormendy (1984, ApJ 286, 116)

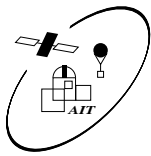


Rotationskurven: Messung, III



NGC 891 (Swaters et al., 1997, ApJ 491, 140 / Paul LeFevre, S&T Nov. 2002)

IAAT



Rotationskurven: Interpretation



NGC 891, KPNO 1.3 m
Barentine & Esquerdo

Sternbewegung aufgrund
Masse innerhalb r :

$$\frac{GM(\leq r)}{r^2} = \frac{v_{\text{rot}}^2(r)}{r}$$

$$\implies M(\leq r) = \frac{v_{\text{rot}}^2 r}{G}$$

Daher:

$$v \sim \text{const.} \implies M(\leq r) \propto r.$$

Für Scheibe in Spiralgalaxien gilt aber

$$I(r) = I_0 \exp(-r/h) \quad (1)$$

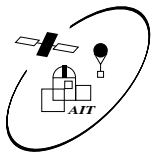
$$L(r < r_0) = I_0 \int_0^{r_0} 2\pi r \exp(-r/h) dr \quad (2)$$

$$\propto h^2 - h(r+h) \exp(-r/h) \quad (3)$$

so daß für $r \rightarrow \infty$: $L(r < r_0) \rightarrow \text{const.}$

Ist $M/L \sim \text{const.} \implies$ Widerspruch mit Beobachtungen!
(würde $v \propto r^{-1/2}$ erwarten!)

Kanonische Interpretation: ein Großteil des gravitativ wirkenden Materials sendet kein Licht aus \implies Spiralgalaxien haben große massereiche Halos aus **dunkler Materie** und $M/L \sim 30$.



MOND

Modified Newtonian Dynamics (Milgrom, 1983ff.; **MOND**): **Alternative zur Dunklen Materie**

Reviews: Sanders & McGaugh, 2002, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 40, 263; Milgrom, 2001, astro-ph/0112069

Idee: **Modifikation des Newtonschen Gesetzes:**

Beschleunigung auf Testteilchen a im Gravitationsfeld:

$$a = \frac{GM}{r^2} \cdot \frac{1}{\mu(a/a_0)}$$

wo

$$\mu(x) \longrightarrow \begin{cases} 1 & \text{für } x \rightarrow \infty \\ x & \text{für } x \rightarrow 0 \end{cases}$$

d.h. für **Beschleunigungen** $a \ll a_0$,

$$a \longrightarrow \sqrt{GMa_0/r^2}$$

Damit Kreisbahnbewegung im Limit kleiner Beschleunigungen:

$$\sqrt{\frac{GM(\leq r)a_0}{r^2}} = \frac{v^2}{r} \implies M(\leq r) = \frac{v^4}{Ga_0}$$

und damit **unabhängig von r !**

MOND kann die flachen Rotationskurven von Spiralgalaxien erklären.



MOND

Aus Fits an Rotationskurven folgt

$$a_0 = 1.2 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$$

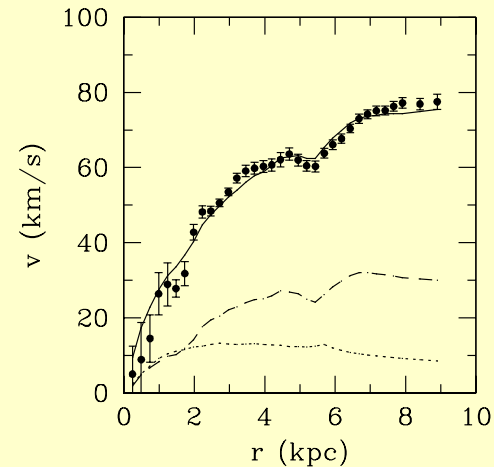
sowie $M/L \sim 1$.

Ferner Erklärung...

- der Geschwindigkeitsdispersion von Galaxienhaufen
- der Tully-Fisher Relation
- der Struktur von Zwerg-Sphäroid Galaxien

Allerdings: kaum physikalische Begründung der Theorie, Verletzung des starken Äquivalenzprinzips, usw.

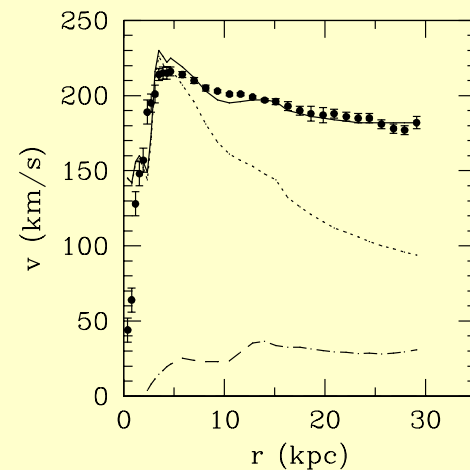
⇒ Experimentelle Überprüfung (und weiterer Ausbau der Theorie) dringend notwendig.



NGC 1560

$$\langle \mu_B \rangle = 23.2 \text{ mag/arcsec}^2$$

$$(M/L_B)_{\text{disk}} = 0.4$$



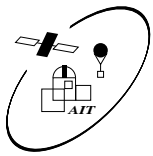
NGC 2903

$$\langle \mu_B \rangle = 20.5 \text{ mag/arcsec}^2$$

$$(M/L_B)_{\text{disk}} = 1.9$$

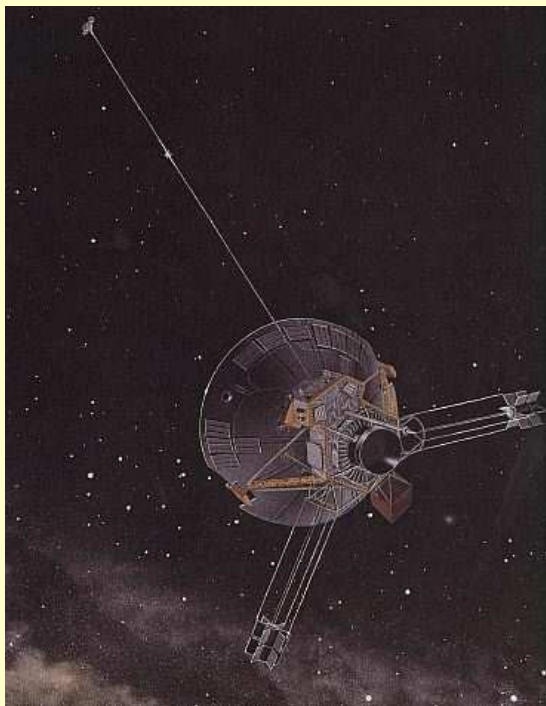
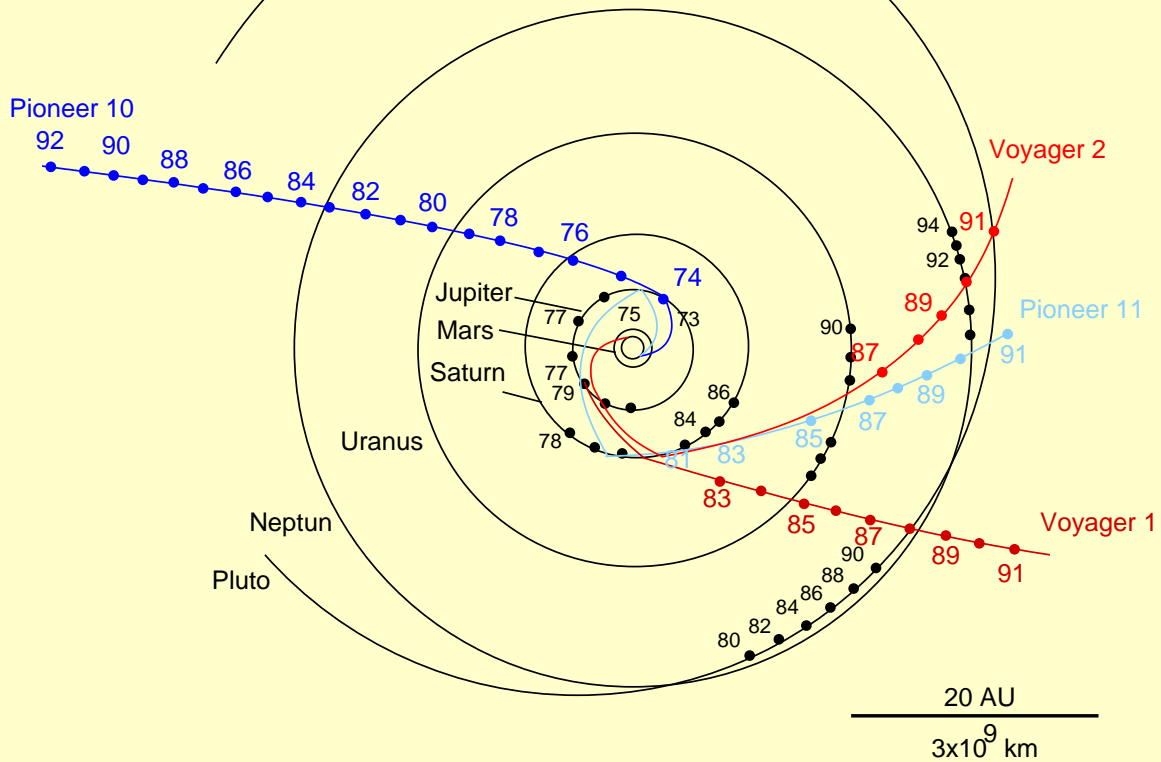
Sanders & McGaugh (2002)

IAAT



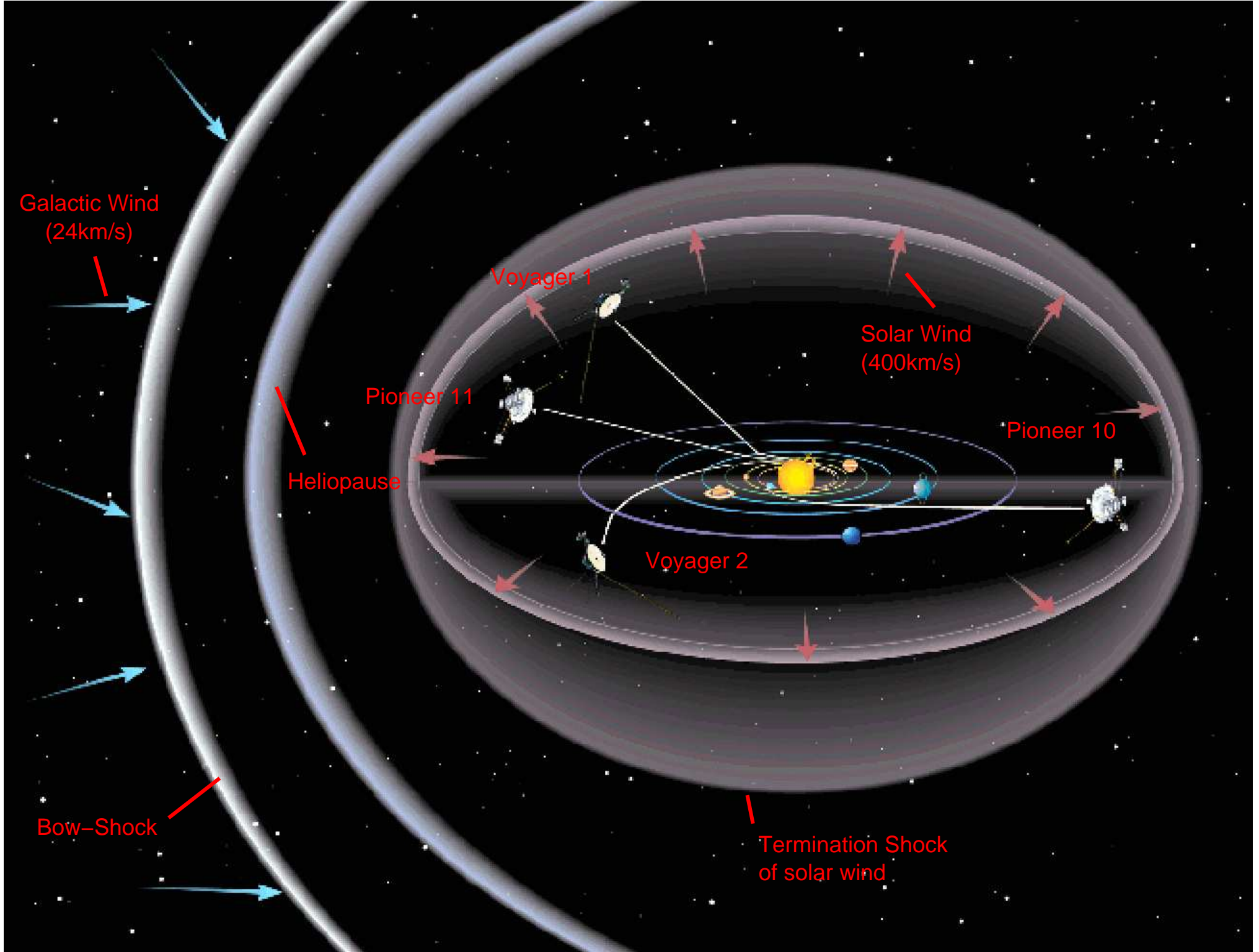
Pioneer 10, I

Blick auf das Sonnensystem vom ekliptikalen Nordpol aus

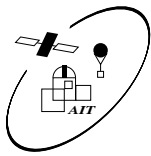


- **P10: Erste Sonde ins äußere Planetensystem**
(Start: 1972 März 2)
- Spinstabilisiert
- Offizielles Missionsende
1997 März 31 ($d = 67$ AU)
- **immer noch Kontakt**
[2002-07-22] (81.55 AU,
12233 km/s, round trip
22h38min, signal -185 dBm,
Telemetrie ~ 16 bps)

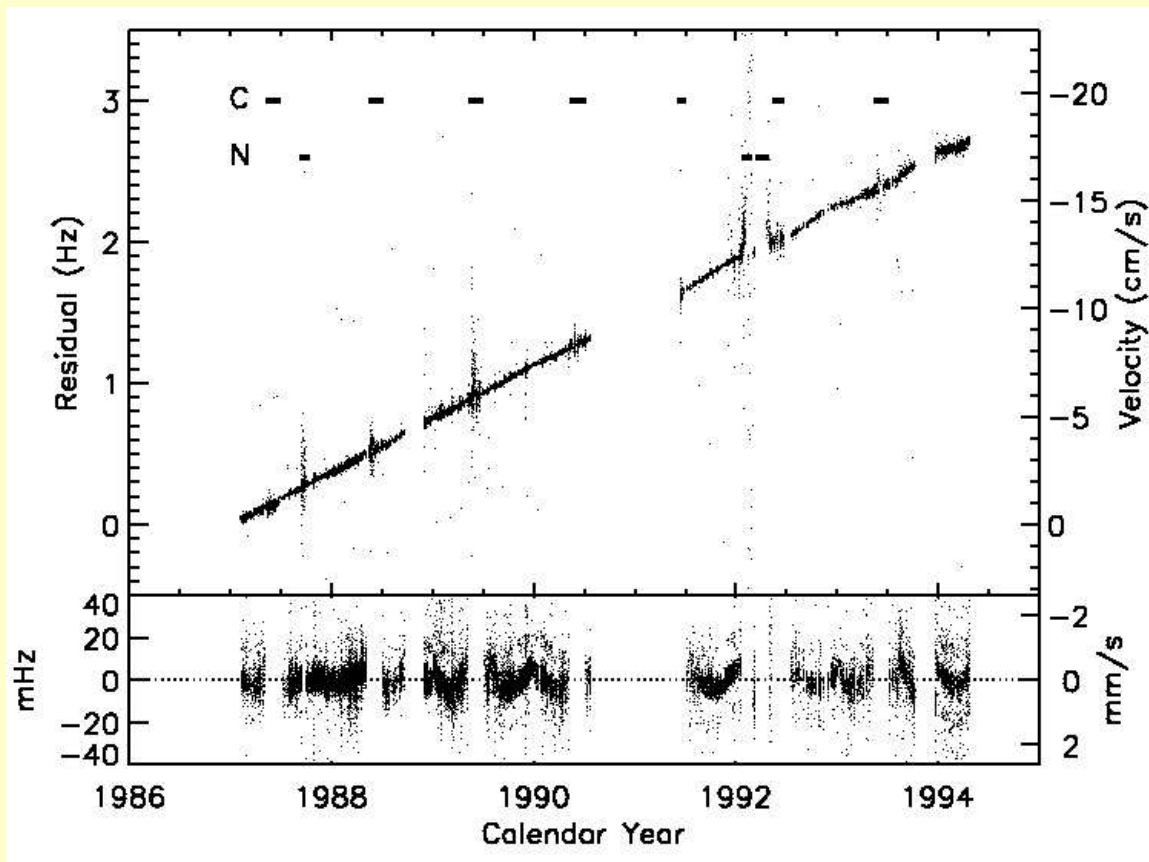
IAAT



erweitert nach Pioneer 10/11 WWW-Seite



Pioneer: Datenanalyse



Markwardt (PRD, subm. [gr-qc/0208046])

Geschwindigkeitsmessung via Doppler: Abweichung in vorhergesagter Frequenz \implies Pioneer 10 zeigt

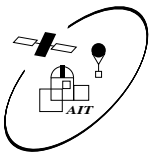
konstante anomale Beschleunigung von $7.84 \pm 0.01 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$ in Richtung auf Sonne.

(Anderson et al., 1998, PRL 81, 2858; 2002, PRD 65, 082004)

Auch gefunden bei

- **Pioneer 11** ($a = 8.55 \pm 0.02 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$),
- **Ulysses** ($a = 12 \pm 3 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$)

nicht Voyager 1, 2 (3-Achsen stabilisiert \implies Bahnmanöver).



MOND Interpretation

Anomale Beschleunigung \sim **ähnliche Größenordnung wie a_0 aus MOND**

ABER: Beschleunigung **zusätzlich** zum Gravitationsfeld der Sonne!

$$(a = GM_{\odot}/r^2 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-2} (r/5 \text{ AU})^{-2})$$

Milgrom, 2001: "MOND could naturally explain such an anomalous acceleration".

Warum?

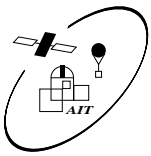
Annahme im starken Newtonschen Limit:

$\mu \sim 1 - \xi \cdot (a/a_0)^{-1}$, so daß

$$a = \frac{GM_{\odot}}{r^2} + \xi a_0$$

\implies Anomale Beschleunigung

Funktioniert, weil MOND das starke Äquivalenzprinzip verletzt!



Schmutzfaktoren

Nichtgravitative Kräfte auf Sonden / Andere
Unsicherheitsfaktoren (Auswahl!)

- **Bahnmanöver**

Maximalfehler $\sim 2 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$ pro Manöver, es gab nur wenige \implies . Erklärt Langzeittrend nicht.

- **Rundungsfehler?**

Drei unabhängige Programme liefern sehr ähnliche Ergebnisse.

- **Laufzeit Sonnenkorona**

Modelliert mit verschiedenen Koronamodellen, kein Einfluß

- **Strahlungsdruck?**

$$a(r) = \frac{K f_{\odot} A \cos \theta(r)}{cM} \frac{1}{r^2} \sim 70 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2} \cdot \left(\frac{5 \text{ AU}}{r} \right)^2$$

\implies Kein Einfluß, abhängig von r .

- **Sonnenwind?**

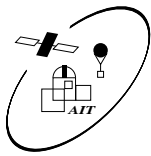
$a \sim 10^{-13} \text{ cm s}^{-2} (r/20 \text{ AU})^{-2} \implies$ vernachlässigbar

- **Kuiper-Belt?**

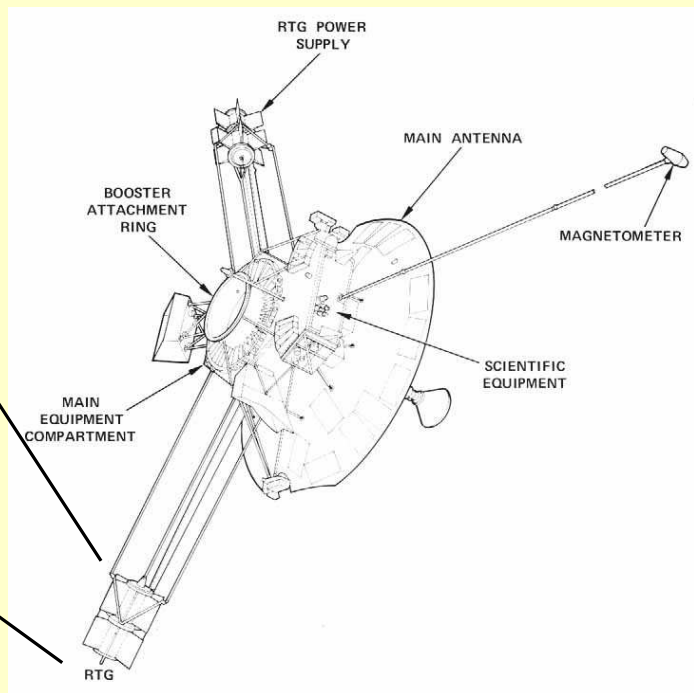
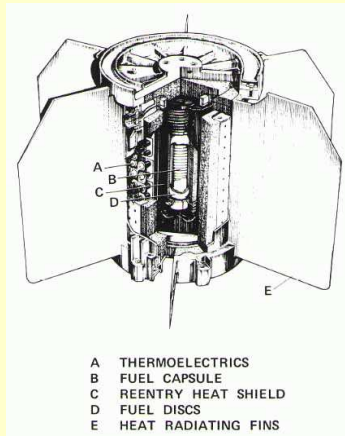
$1 M_{\odot}$ verschmiert über 30... 65 AU $\implies a \sim 10^{-10} \text{ cm s}^{-2} \implies$ vernachlässigbar; überdies ortsabhängig [**Vortrag S. Jordan!**]

- **Abstrahlung von Radio zur Erde**

Poynting-Druck, 8 W $\implies a \sim 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$



Systematische Unsicherheit



nach NASA SP-348

Am häufigsten vermuteter Schmutzfaktor:

Wärmeabstrahlung der Sonde.

(z.B. Scheffer, gr-qc/0107092; Katz, 1999, PRL 83, 1892)

Batterien ~ 2000 W thermische Energie, falls Faktor f ungerichtet:

$$a \sim f \frac{P}{Mc} \quad \text{wo } M \sim 241 \text{ kg}$$

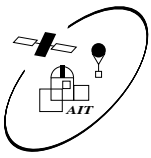
\Rightarrow 60 W gerichtete Abstrahlung (Antenne!): $a \sim 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$

aber: zeitabhängig!

(RTG: ${}_{94}^{238}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{234}\text{U} + {}_2^4\text{He}$; $\tau_{1/2} = 87.74 \text{ a}$).

\Rightarrow Messungen in einigen Jahren sollten Annahme bestätigen können





Zusammenfassung

1. Gravitationstheorie in manchen Bereichen nicht besonders gut getestet.
2. Beobachtungen von Spiralgalaxien:
 - Annahme $M/L \sim 1$
 \implies Newtonsches Gesetz falsch (=MOND).
 - Annahme $M/L \gg 1$
 \implies Dunkle Materie.
3. MOND verlangt Abweichungen bei Beschleunigungen $\sim 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$.
4. Solche werden bei Pioneer 10 beobachtet, sind vielleicht durch MOND erklärbar; prosaische Erklärung m.E. wahrscheinlicher.

Persönliche Anmerkung: MOND funktioniert o.k. für Galaxien, allerdings sind die Forderungen von MOND – Verletzung des starken Äquivalenzprinzips, keine wirkliche theoretische Untermauerung, keine Theorie für MOND auf großen Skalen, usw. – mindestens gleich exotisch wie die derer, die Dunkle Materie fordern \implies sehr unbefriedigend, daher sind DM Modelle sinnvoller.