



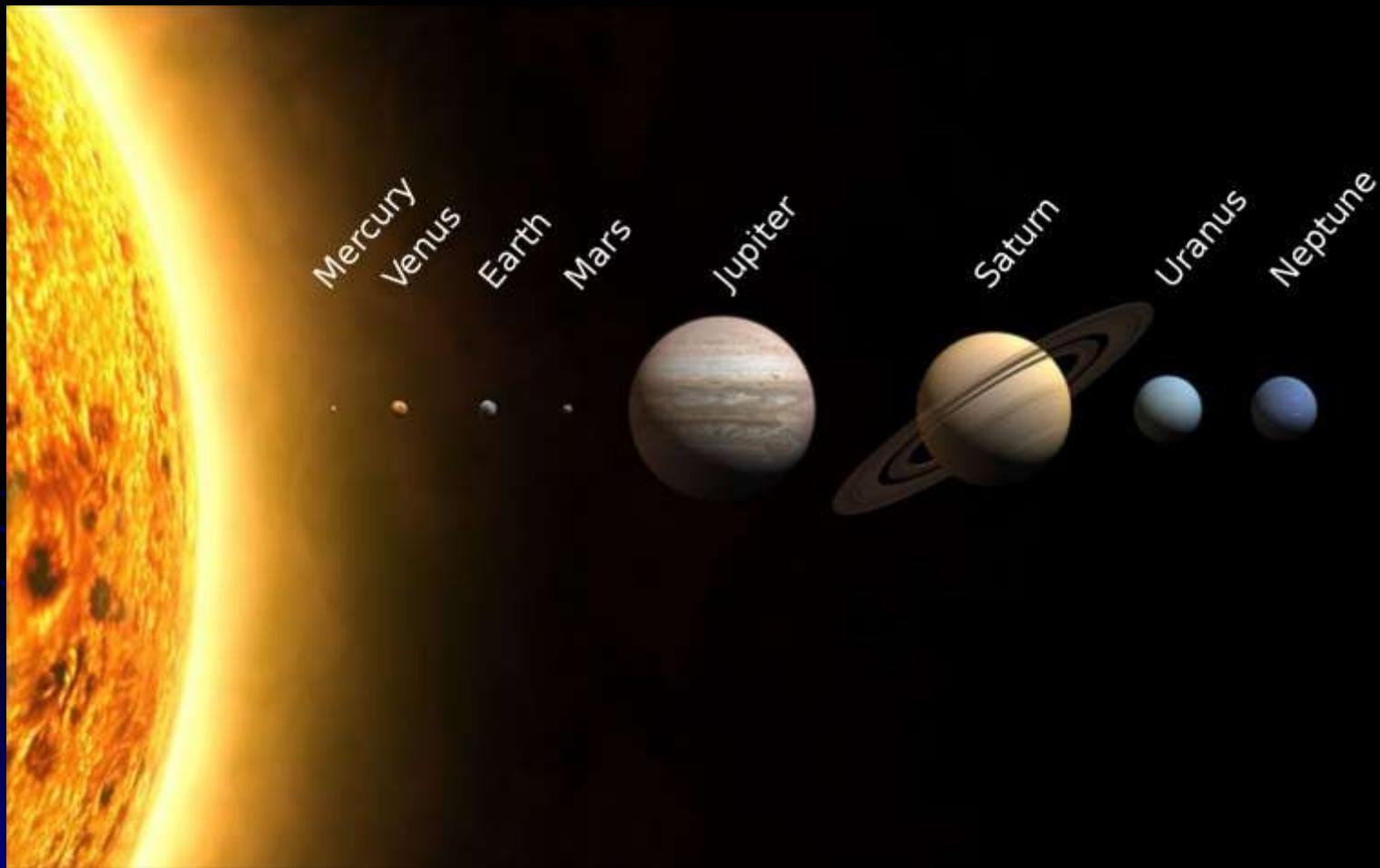
Gravitáció a Naprendszerben

A Pioneer-szondáktól a gravitációs óriástávcsőig

Tóth, Viktor T.

Fazekas-fesztivál, Budapest
2020 március 4.

A Naprendszer ábrázolása



A Naprendszer

- Mekkora a Naprendszer? Kezdjük egy focipályával...



Mekkora a Naprendszer?

- Képzeljünk el egy nagy strandlabdát az átellenes sarokban



Méretskálák

- Mekkora a Föld? És a Hold?



És a Jupiter?

- Fél kilométerre a focipályától...



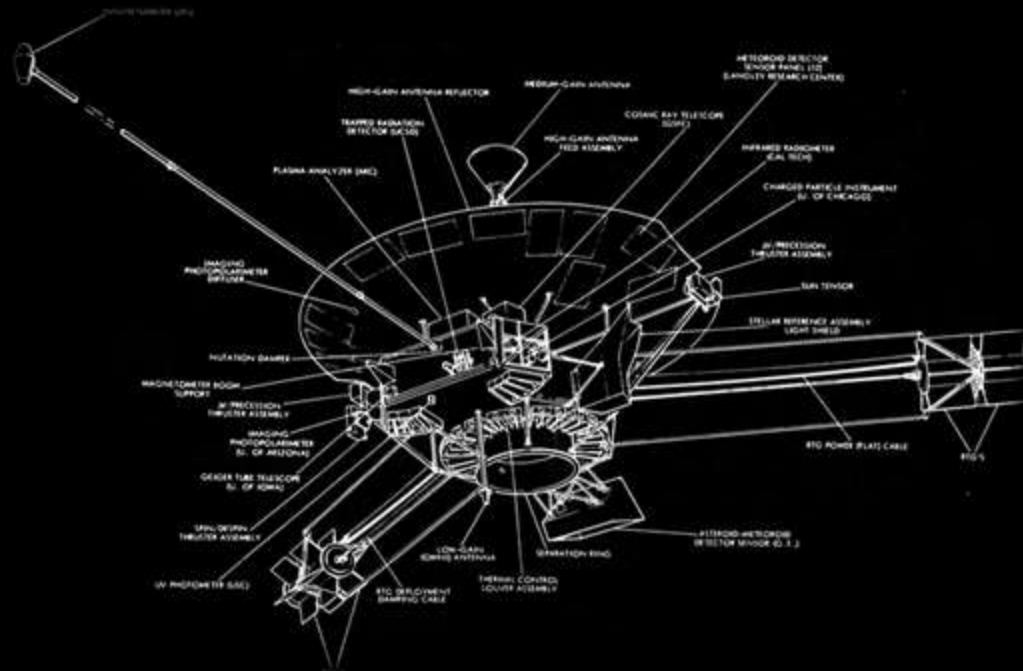
A Pioneer 10/11

- Kilövés 1972-ben ill. 1973-ban
- Elsőként a Mars pályáján túl
- Elsőként a Jupiternél és a Szaturnusznál
- Tervezett élettartam: 600-900 nap



Részletek a szondákról

- Tömeg: ~250 kg
- Forgás által stabilizált (4.8 rpm névleges fordulatszám)
- **Radioizotóp Termoelektromos Generátorok (RTG)**
- Elektromos teljesítmény: ~160 W (kilövéskor)
- 11 tudományos műszer
- 2.75 m antenna
- Adóteljesítmény: 8 W
- Adatsebesség: 16-2048 bps

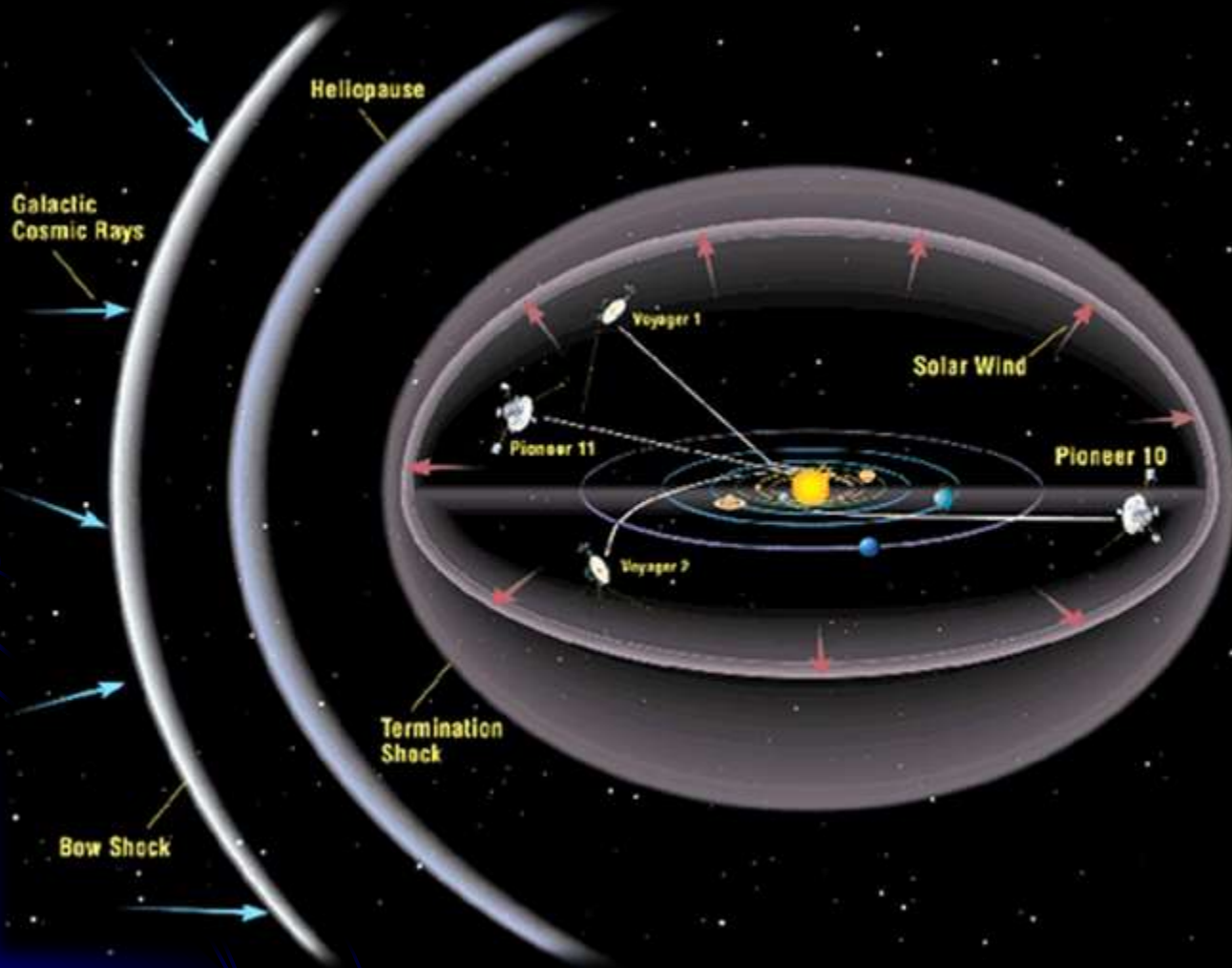


Küldetés

- Elsődleges küldetés
 - Az aszteroida-övezet felderítése
 - Kutatás a Marson túl
 - A Jupiter közeli megfigyelése
- Másodlagos küldetés
 - A külső naprendszer kutatása
 - Gravitációs hullámok figyelése
 - Az „X-bolygó” kutatása



A Pioneer és Voyager szondák a külső naprendszerben



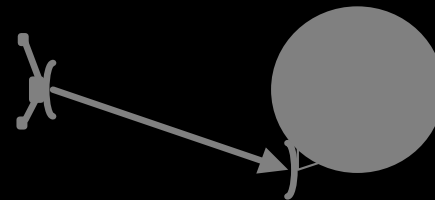
Pioneer 10 harminc év után

- Távolság a naptól: ~80 Cs. E.
- Fénysugár útja oda-vissza: ~21 hours
- Heliocentrikus sebesség: ~12 km/s
- Egy műszer (GTT) még üzemben (lekapcsolási parancs elküldve, konfirmáció sosem érkezett meg)
- Elektromos rendszer ~ 26VDC feszültségen a névleges 28VDC helyett
- Adó kristályoszillátora tönkrement (valószínű a hidegtől)
- Adó továbbra is működött koherens üzemmódban
- Számos hőmérsékletérték kalibrált mértékhatáron alul
- Üzemanyagvezetékek befagyva (manőverezés lehetetlen)

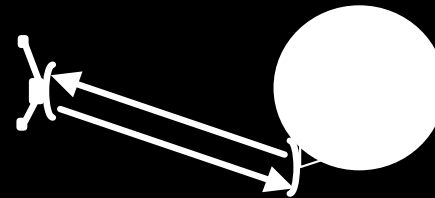
Doppler adatok analízise

- A megfigyelések kétutas vagy háromutas Doppler adatok

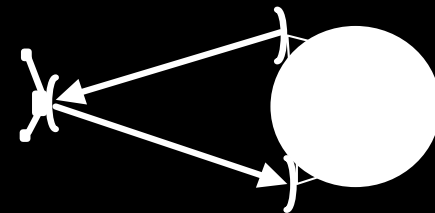
- Egyutas Doppler



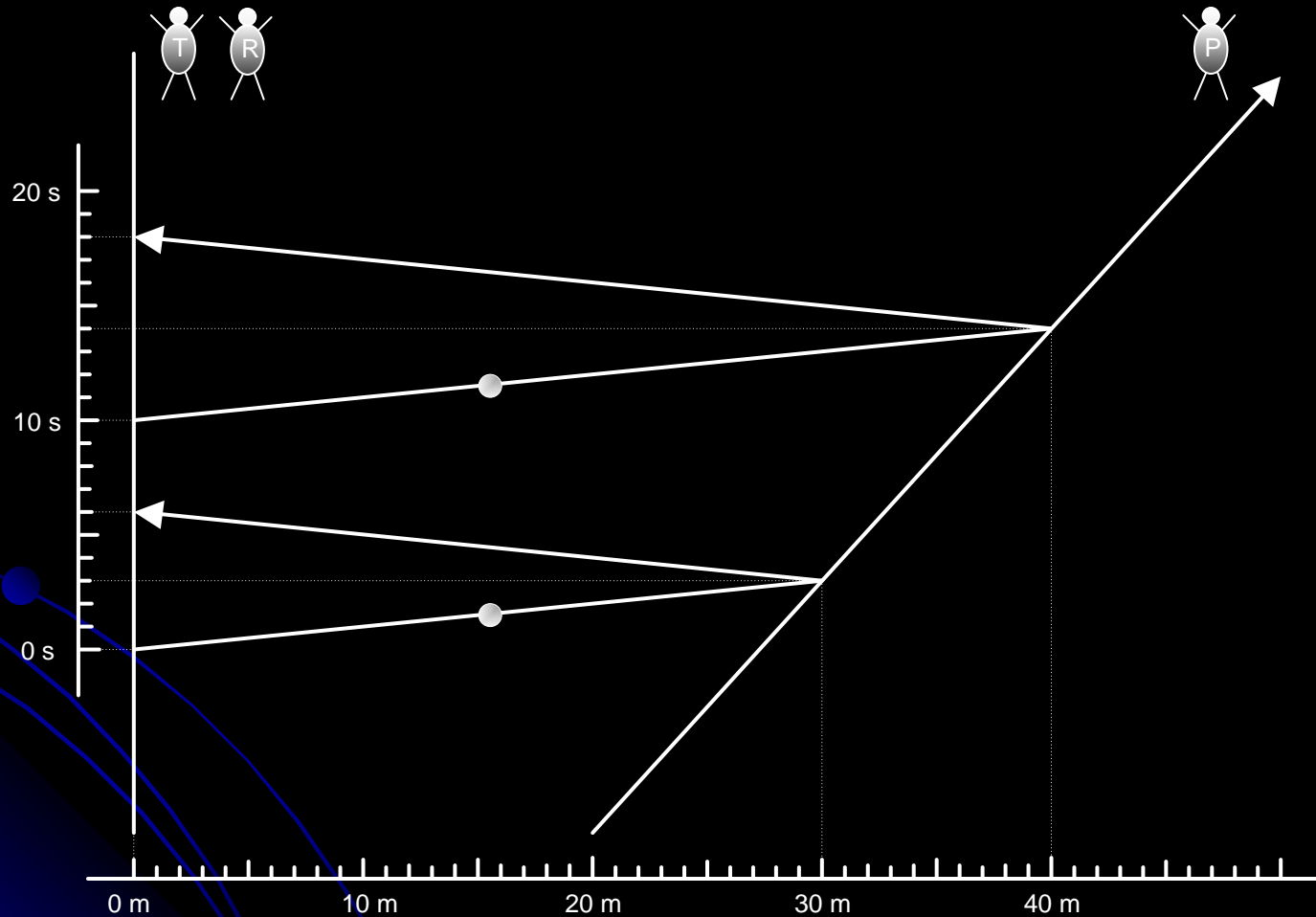
- Kétutas Doppler



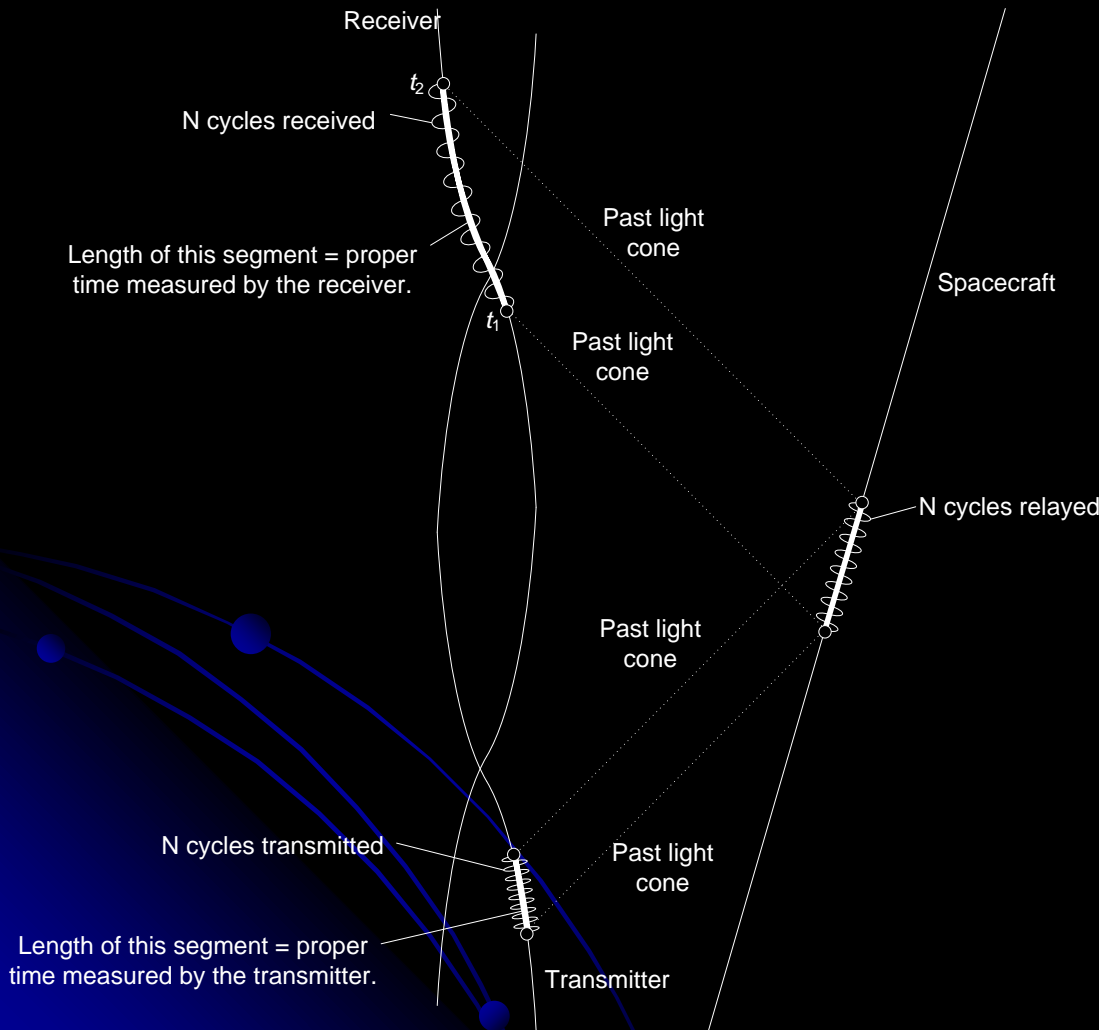
- Háromutas Doppler



Kétutas (vagy háromutas) Doppler



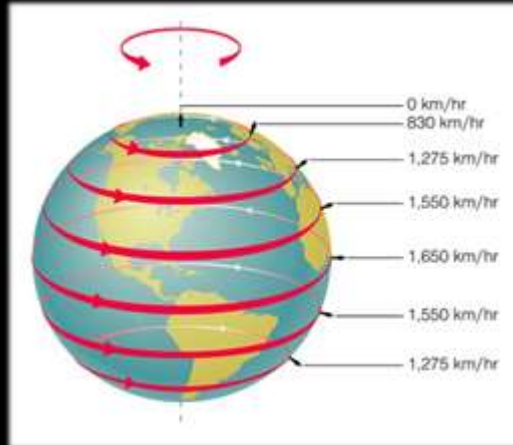
Doppler mérések



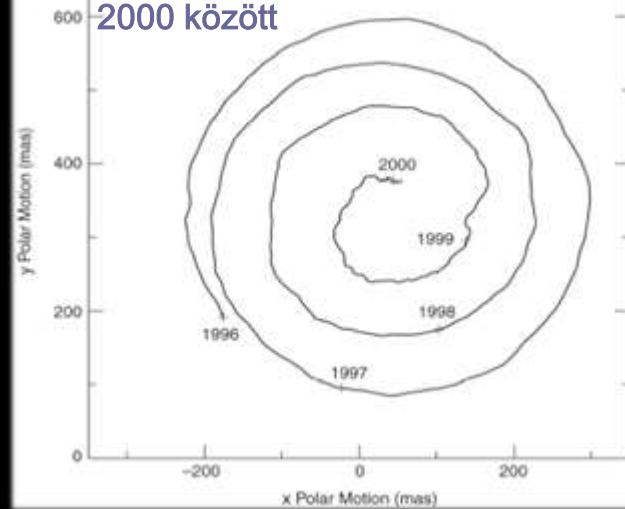
- A vevőnél történő mérés t_1 és t_2 időpillanat között
- Időpillanatok a múltba vetítjük a szonda ill. az adóállomás számított világvonalára. A számítás figyelembe veszi a következőket:
 - Nagyobb naprendszerbeli testek PPN-gravitációja
 - Manőverek
 - Kis nemgravitációs erők (pl. szivárgó üzemanyag)
 - Shapiro-késés
 - Bolygóközi közeg hatásai (napszélplazma)
 - Atmoszférikus hatások
 - Földi állomás helye (árapály, kontinensvándorlás)
- A kibocsátott ciklusok száma az adó frekvenciájából számolható
- Ezt összehasonlítjuk a vevő által számolt vett ciklusok számával
- A modellt iterálva minimalizáljuk a reziduális különbséget.

Földi hatások

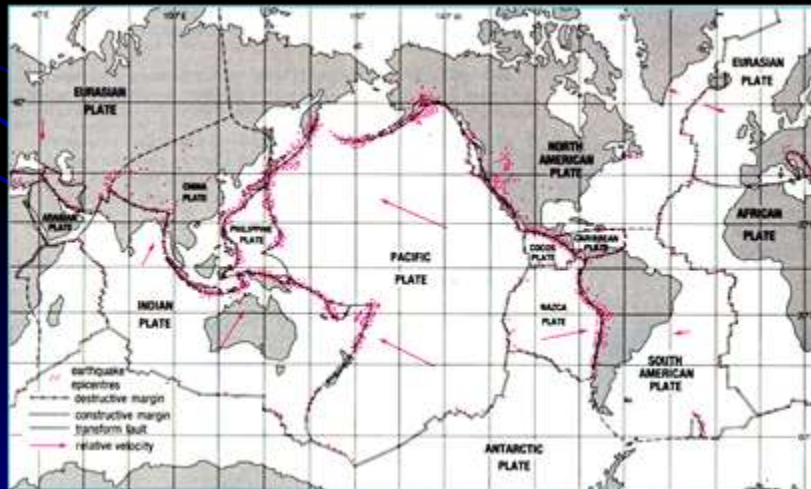
A Föld forgása



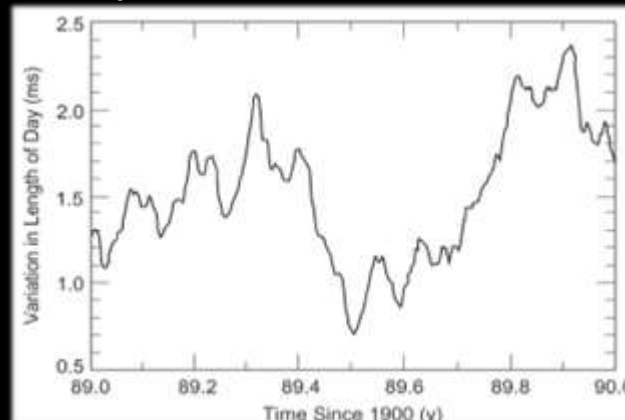
A forgástengely változása 1996-2000 között



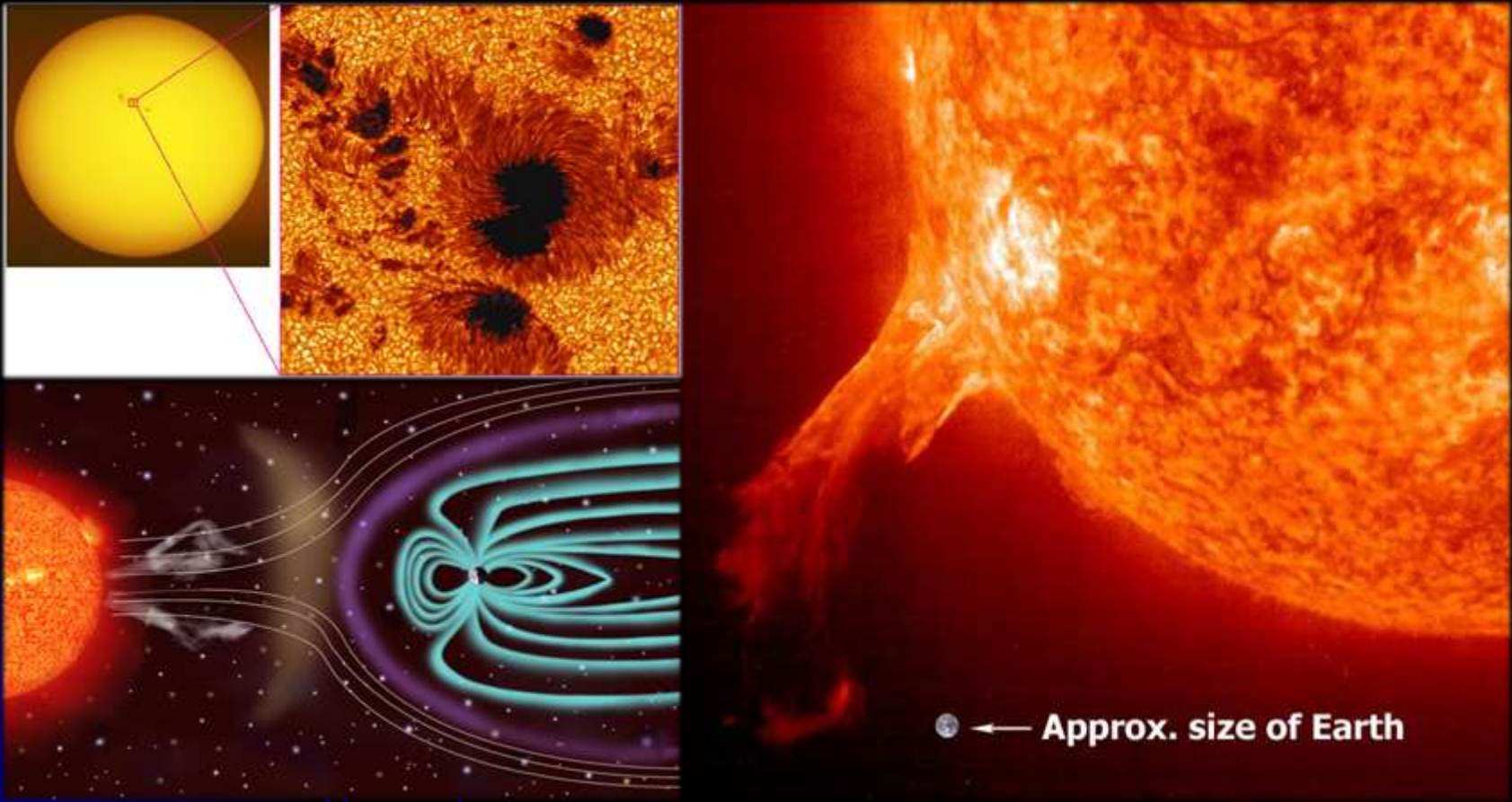
Tektonikus mozgás



A nap hosszának változása 1990 óta

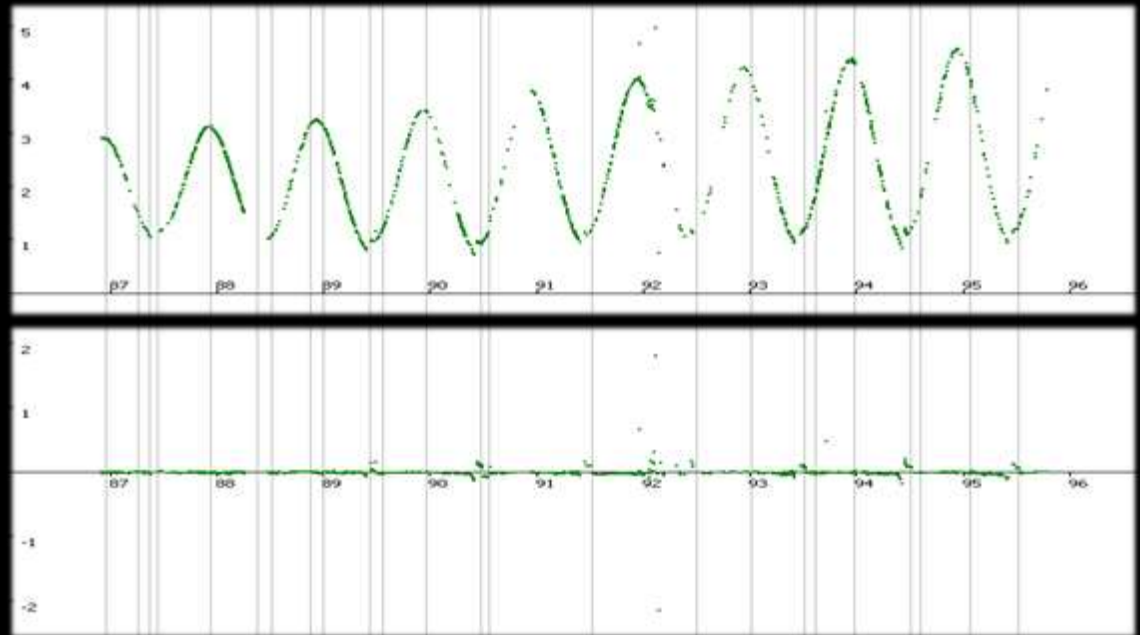


A nap hatása



Doppler illesztések

- Model jósolja a szonda mozgását és a Dopplert
- Antenna a tényleges Dopplert méri
- A különbség a „Doppler reziduum”
- „Rossz” illesztés:

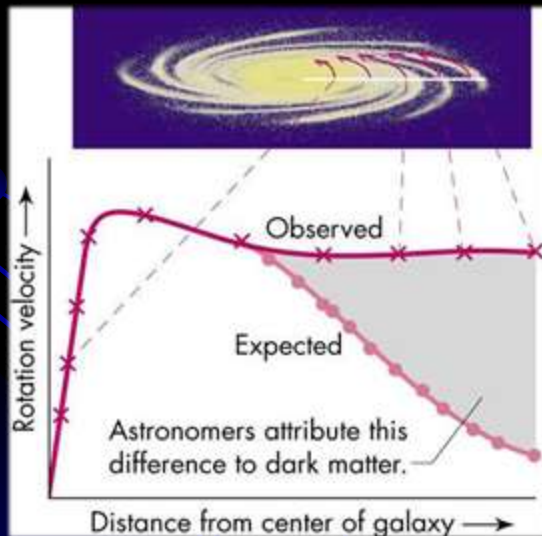


- „Jó” illesztés:

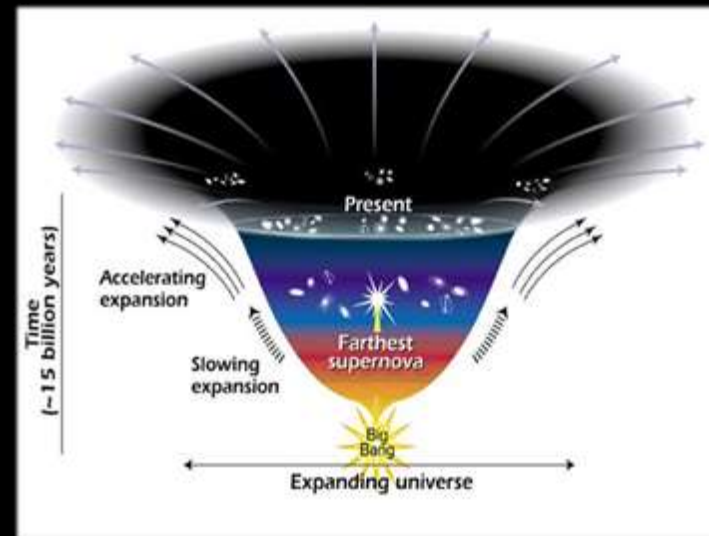
- A pontosságot mHz-ben mérjük!

A gravitáció huncutságai kozmikus méretskálán

- Galaxisok nem a várakozás szerint forognak
- Szupernóvák, kozmikus háttérsugárzás gyorsuló tágulást mutatnak



Sötét anyag?



Sötét energia?

Avagy a külső naprendszerben?

VOLUME 81, NUMBER 14

PHYSICAL REVIEW LETTERS

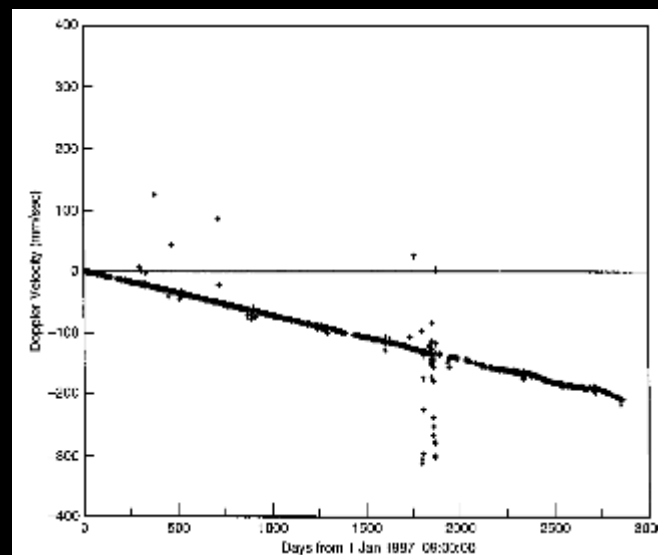
5 OCTOBER 1998

Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration

John D. Anderson,^{1,*} Philip A. Laing,^{2,†} Eunice L. Lau,^{1,‡} Anthony S. Liu,^{3,§}
Michael Martin Nieto,^{4,||} and Slava G. Turyshev^{1,¶}

Radio metric data from the Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses spacecraft indicate an apparent anomalous, constant, acceleration acting on the spacecraft with a magnitude $\sim 8.5 \times 10^{-8} \text{ cm/s}^2$, directed towards the Sun. Two independent codes and physical strategies have been used to analyze the data. A number of potential causes have been ruled out. We discuss future kinematic tests and possible origins of the signal. [S0031-9007(98)07300-1]

We conclude, from the JPL-ODP analysis, that there is an unmodeled acceleration a_P towards the Sun of $(8.09 \pm 0.20) \times 10^{-8} \text{ cm/s}^2$ for Pioneer 10 and of $(8.56 \pm 0.15) \times 10^{-8} \text{ cm/s}^2$ for Pioneer 11. The error is determined by use of a five-day batch sequential filter with radial acceleration as a stochastic parameter subject to white Gaussian noise (~ 500 independent five-day samples of radial acceleration) [4,5]. *No magnitude variation of a_P with distance was found, within a sensitivity of $2 \times 10^{-8} \text{ cm/s}^2$ over a range of 40 to 60 AU.*



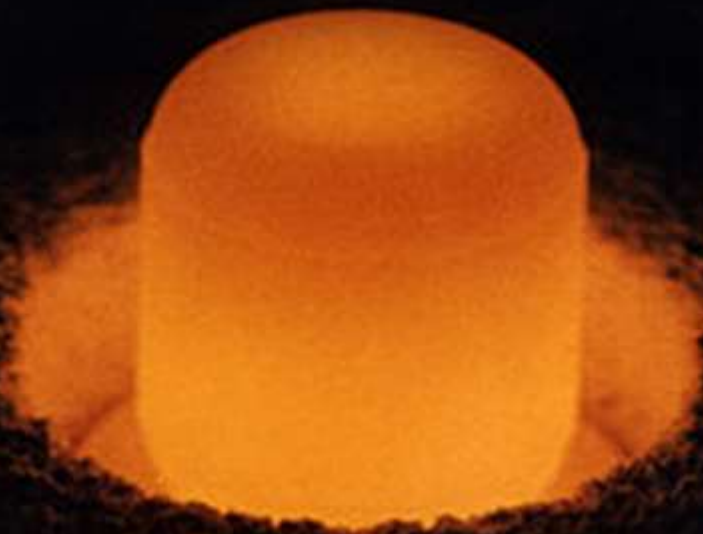
Az anomália felfedezése

- 1979-ben kezdődő kutatás (az „X bolygó” után)
- Anomália első jele 1980-ban
- Kezdeti JPL ODP analízis 1990-95-ben
- Aerospace Corporation megerősíti: 1996-98
- Független kutatók is megerősítik:
Markwardt (2002), Olsen (2005), Toth (2009)
- Korlátozott adatmennyiség állt rendelkezésre;
nem volt telemetria, nem volt termális modell.

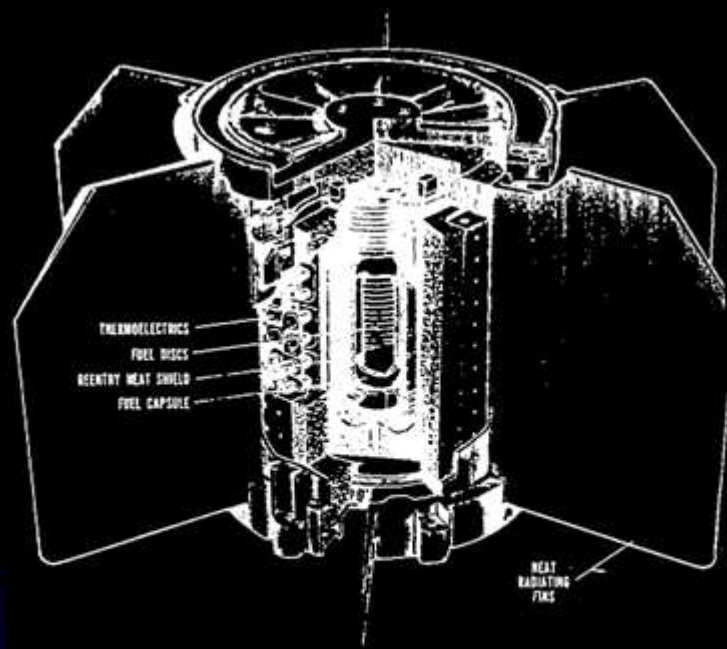
Az anomália analízise

- Rendellenesség vagy „új fizika”
- Felvetett értelmezések
 - Gravitáció-módosítás (MOND, MSTG, Yukawa potenciál)
 - Sötét anyag
 - Kozmológiai eredet ($|a_p| \approx cH_0$: véletlen?)
- A fedélzeten termelt majd kisugárzott hő ellenhatását nem vizsgálták kellőképpen.
- Hadd alapozzam meg hogy ez miért fontos:

A fedélzeten termelt hő



Pioneer áramforrás



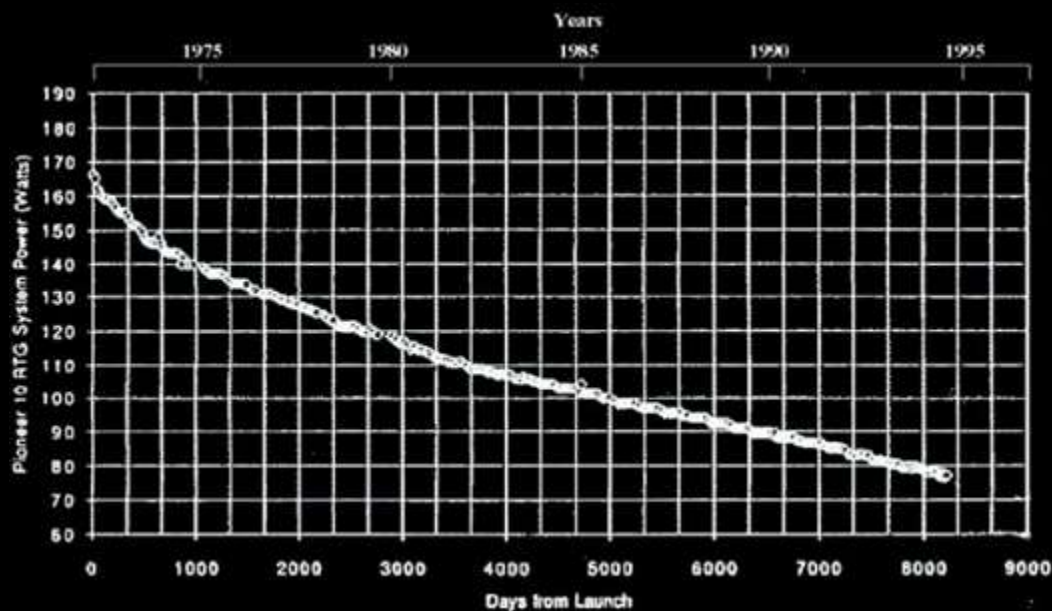
SNAP 19/PIONEER RADIOISOTOPE THERMOELECTRIC GENERATOR

RTG hőteljesítmény: ~650W

Elektromos teljesítmény: ~40W

4 RTG szondánként

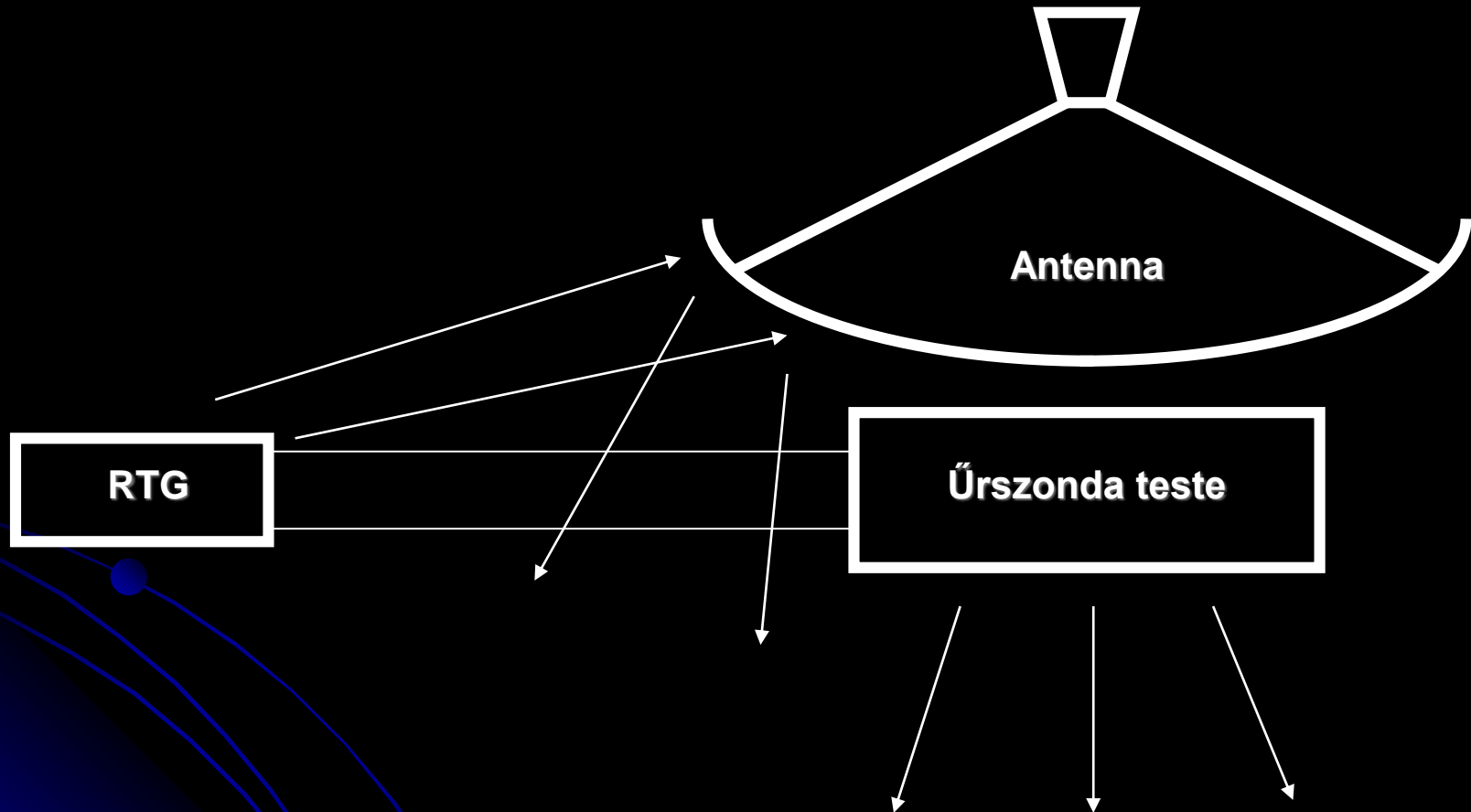
~4.6 kg ^{238}Pu a fedélzeten



Termális analízis

- Kérdés: Mekkora erőhatást jelent a fedélzetről kisugárzott hő?
- A hőforrások ismertek:
 - RTG hulladékhő (~2.5 kW)
 - Elektromos hő (~100 W)
 - Radioizotópos melegítők (~10 W)
 - Hajtóművek (tranzien্স)

A hőszugárzás geometriája



A javaslat korán felmerült...

- Murphy (1999): Elektromos hő
- Katz (1999): Elektromos hő és visszavert RTG hulladékhő
- Scheffer (2003): Konvencionális hatások (ideértve felületi korróziót, változásokat)

...de túl hamar elvetették?

- Leegyszerűsített érvelések

- Naivan számolgatni könnyű

$$P_{1 \rightarrow 2} = \iint P_1 \cos \chi_1 \cos \chi_2 / \pi r^2 dA_1 dA_2$$

- A korrekt számítás nehéz.

A termális hipotézis

- Hőteljesítmény: 2.5 kW
- Kis anizotrópia: -2.5% egyik irányba, $+2.5\%$ a másikba elegendő
- A termális modellek közelítő modellek
- Az anizotrópia mértéke majdnem 2 nagyságrenddel kisebb mint az alapjául szolgáló jelenségek

A pontosságnak határa van

- A szondák majd fél évszázada készültek
- A dokumentáció hiányos, részben szemétből (!) lett kimentve
- Egyes anyagi tulajdonságok nem ismertek
- A mélyűr hatásai hosszú távon nem ismertek

A mi erőfeszítésünk

- Össze telemetria-adatot megmentettük
- Kétszeres Doppler-adat áll rendelkezésre
- Megmentettük a projektdokumentációt
- Új Doppler-analízis
- Részletes termális analízis
- Új módja a termális analízis és a pályameghatározás integrációjának

Új Doppler-analízis

PRL 107, 081103 (2011)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
19 AUGUST 2011



Support for Temporally Varying Behavior of the Pioneer Anomaly from the Extended Pioneer 10 and 11 Doppler Data Sets

Slava G. Turyshev,¹ Viktor T. Toth,² Jordan Ellis,¹ and Craig B. Markwardt³

¹*Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, California 91109-0899, USA*

²*Ottawa, Ontario K1N 9H5, Canada*

³*NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, USA*

(Received 14 April 2011; published 19 August 2011)

The Pioneer anomaly is a small sunward anomalous acceleration found in the trajectory analysis of the Pioneer 10 and 11 spacecraft. As part of the investigation of the effect, the analysis of recently recovered Doppler data for both spacecraft has been completed. The presence of a small anomalous acceleration is confirmed by using data spans more than twice as long as those that were previously analyzed. We examine the constancy and direction of the Pioneer anomaly and conclude that (i) the data favor a temporally decaying anomalous acceleration ($\sim 2 \times 10^{-11}$ m/s²/yr) with an over 10% improvement in the residuals compared to a constant acceleration model, (ii) although the direction of the acceleration remains imprecisely determined, we find no support in favor of a Sun-pointing direction over the Earth-pointing or along the spin-axis directions, and (iii) support for an early “onset” of the acceleration remains weak in the pre-Saturn Pioneer 11 tracking data. We present these new findings and discuss their implications for the nature of the Pioneer anomaly.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.081103

PACS numbers: 04.80.Cc, 95.10.Eg, 95.55.Pe

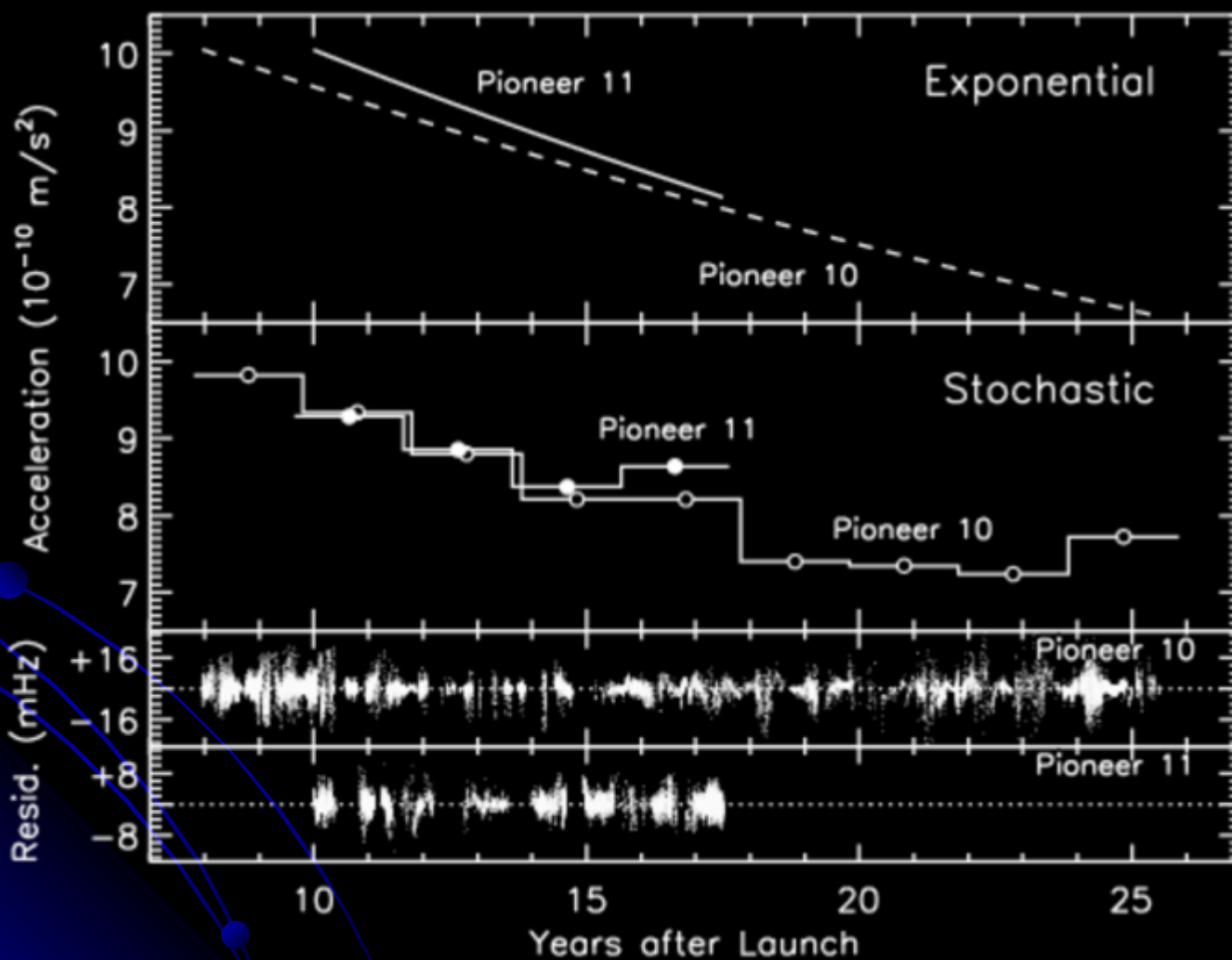
Új Doppler-analízis

- Kétszer annyi adat mint korábban:
 - ~20 évnyi Pioneer 10 adat
 - ~10 évnyi Pioneer 11 adat
- Korai adat is rendelkezésre áll, a Jupiter, Szaturnusz elérése előttről

A Doppler-analízis eredménye

- Az anomália jelen van az új adathalmazban
- Időbeli változás lehetséges
- A Föld iránya lehetséges

Sztochasztikus és exponenciális modell



Az új termális analízis

PRL 108, 241101 (2012)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
15 JUNE 2012



Support for the Thermal Origin of the Pioneer Anomaly

Slava G. Turyshev,¹ Viktor T. Toth,² Gary Kinsella,¹ Siu-Chun Lee,³ Shing M. Lok,³ and Jordan Ellis¹

¹*Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, California 91109-0899, USA*

²*Ottawa, Ontario K1N 9H5, Canada*

³*Applied Sciences Laboratory, 13111 Brooks Drive, Suite A, Baldwin Park, California 91706-7902, USA*

(Received 6 March 2012; published 12 June 2012)

We investigate the possibility that the anomalous acceleration of the Pioneer 10 and 11 spacecraft is due to the recoil force associated with an anisotropic emission of thermal radiation off the vehicles. To this end, relying on the project and spacecraft design documentation, we constructed a comprehensive finite-element thermal model of the two spacecraft. Then, we numerically solve thermal conduction and radiation equations using the actual flight telemetry as boundary conditions. We use the results of this model to evaluate the effect of the thermal recoil force on the Pioneer 10 spacecraft at various heliocentric distances. We found that the magnitude, temporal behavior, and direction of the resulting thermal acceleration are all similar to the properties of the observed anomaly. As a novel element of our investigation, we develop a parametrized model for the thermal recoil force and estimate the coefficients of this model independently from navigational Doppler data. We find no statistically significant difference between the two estimates and conclude that, once the thermal recoil force is properly accounted for, no anomalous acceleration remains.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.108.241101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.241101)

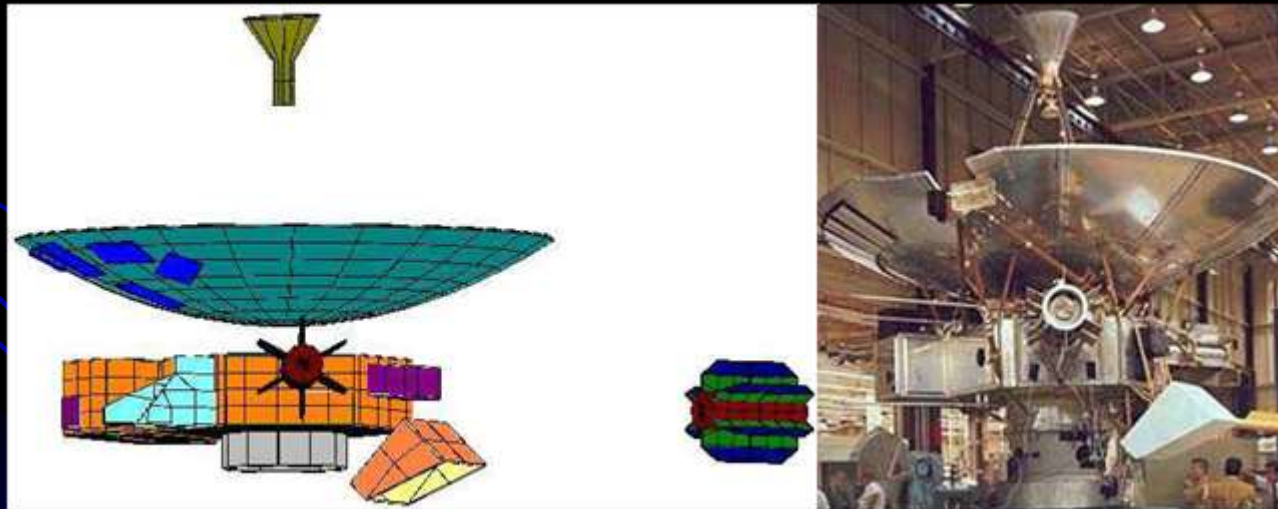
PACS numbers: 04.80.-y, 95.10.Eg, 95.55.Pc

Az új termális analízis

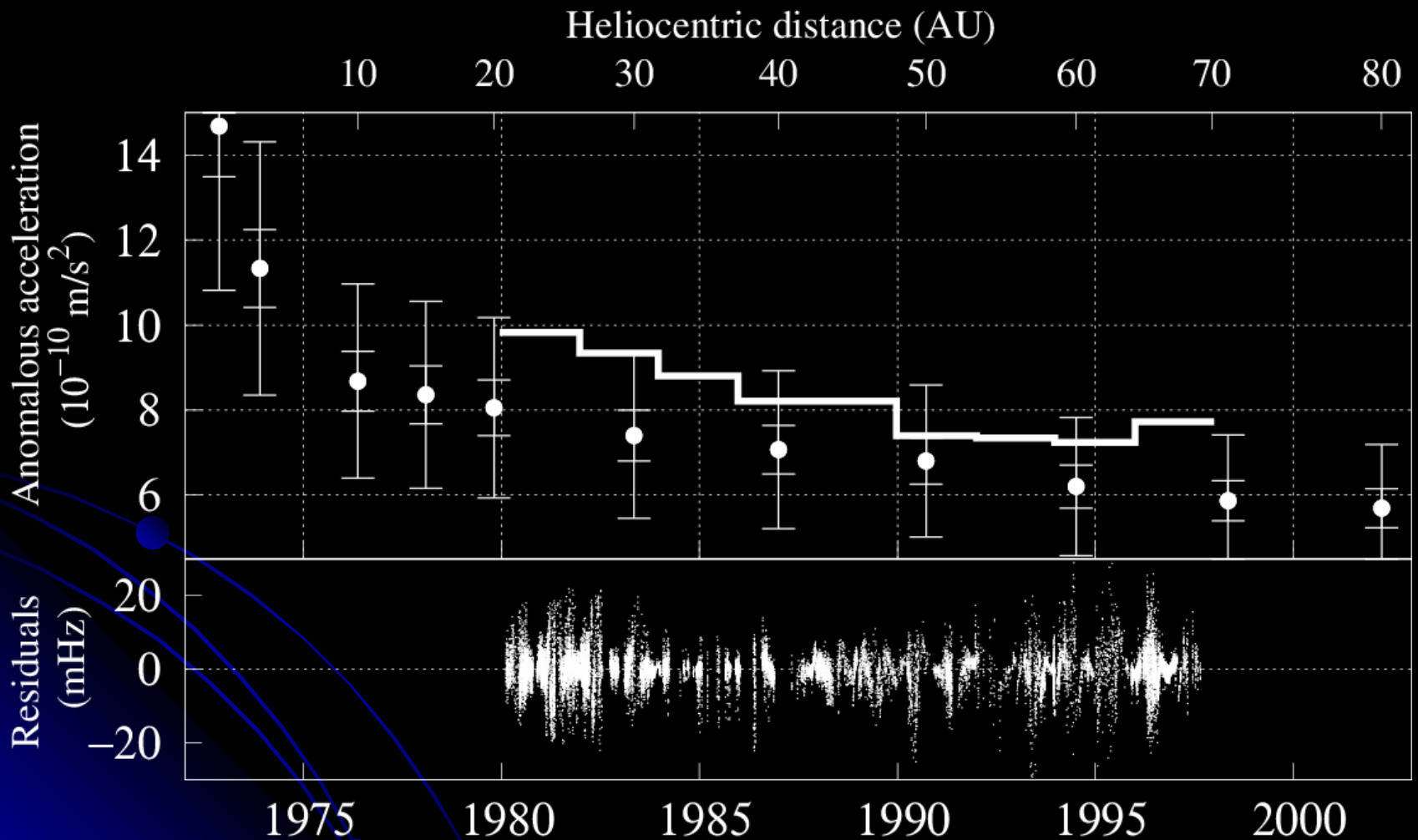
- Részletes termális modell
- Minden adat használatban: A termális modellt telemetria igazolja
- A modellt beépítettük a pályameghatározásba, így kiszámítva a mért mennyiséget (Doppler)

Részletes modell

- JPL mérnökei által készített, szabványszerű modell



Termális eredmény



Lineáris viselkedés

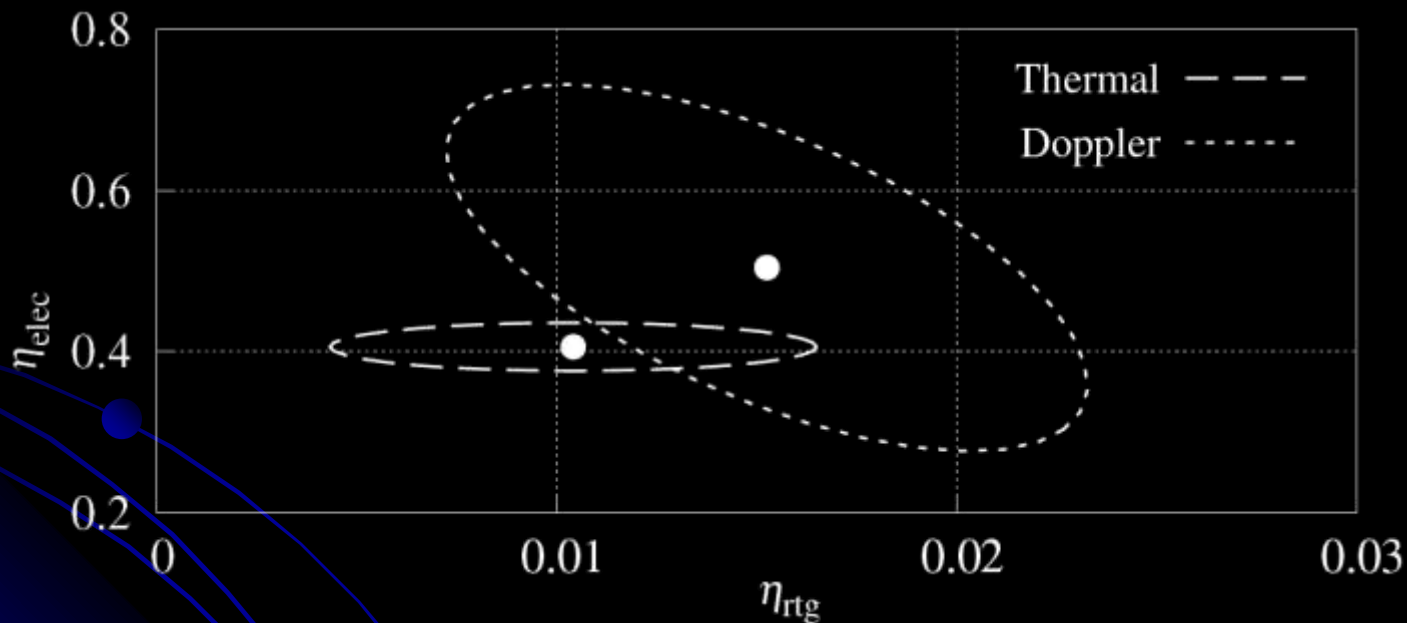
- A két, jelentőséggel bíró nemtranziens hőforrás az elektromos hő és az RTG hulladékhő:

$$F \approx c^{-1} \sum \eta_i Q_i \quad (i = \text{rtg, elec})$$

- Nincs jelentős tárolt hő (nincs késés)
- A szonda hőmérsékletén a felszint borító anyagok termális tulajdonságai érdemben nem változnak
- A szonda fizikai konfigurációja nem változott a küldetés során

Összehasonlítás

- Az η paraméterek egymástól függetlenül becsülhetők a Doppler és termális analízis alapján



- Semmiféle statisztikai jelentőséggel bíró anomália nem marad.

Néhány nyitott kérdés

- A Pioneer 11 viselkedése (nem számítunk meglepetésre)
- Forgás változása
- Az anomália kezdeti viselkedése
- Külső borítóanyagok gázkibocsátása
- RTG borítóanyagok
- Statisztikai viselkedés
- A DSN jelerősség változásai

Más szondák

- New Horizons: anyagi fedezet hiánya Doppler-megfigyelésekhez; lehetőség elveszett
- Voyager-szondák: nem forognak
- Más szondák: nem megfelelő pálya, nagy RTG-k, gyakori manőverek, stb.
- A Pioneer 10 és 11 maradnak a legprecízebben navigált szondák a külső naprendszerben a belátható jövőben.

Összefoglalás

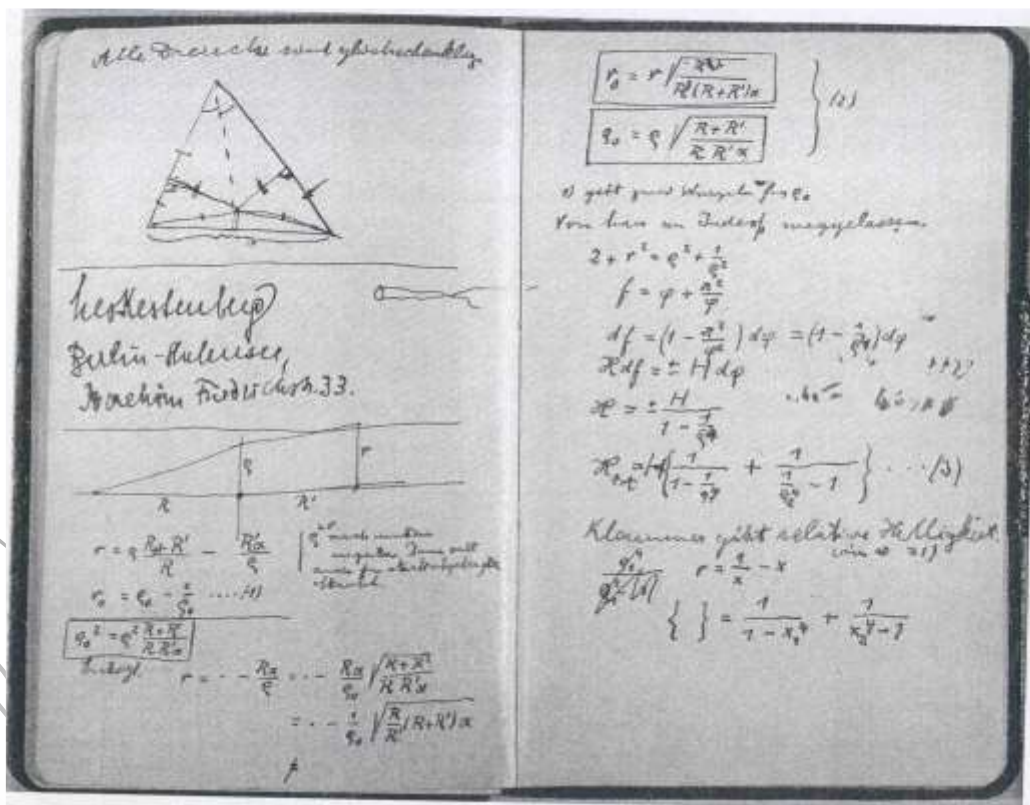
- A belátható jövőben a Pioneer-10/11 marad a legpontosabb, legnagyobb méretskálán végrehajtott gravitációs kísérlet
- Csodálatos lett volna eltérést tapasztalni az Einstein-féle elmélettől a Naprendszerben
- Az anomália látszatjelenség volt
- Tanulságok:
 - Navigációs pontosság határai
 - Nyers adatok, eredeti dokumentáció megőrzésének fontossága
 - „Körülbelüli” számítások alkalmatlanok igen kicsi jelenségek becslésére

A gravitáció és a fény

- A gravitáció fénysugarakra hatással van
- Newton a fényt részecskéknek képzelte
- A Newton-féle fizikában egy, a nap mellett elhaladó fényrészecske kb. 0.9 szögmásodperccel térül el
- Az Einstein-féle elmélet fényhullámokra is áll
- Az eltérés megkétszereződik, kb. 1.75"

Az első levezetés

- Einstein jegyzetfüzete, c. 1911



Einstein sikere

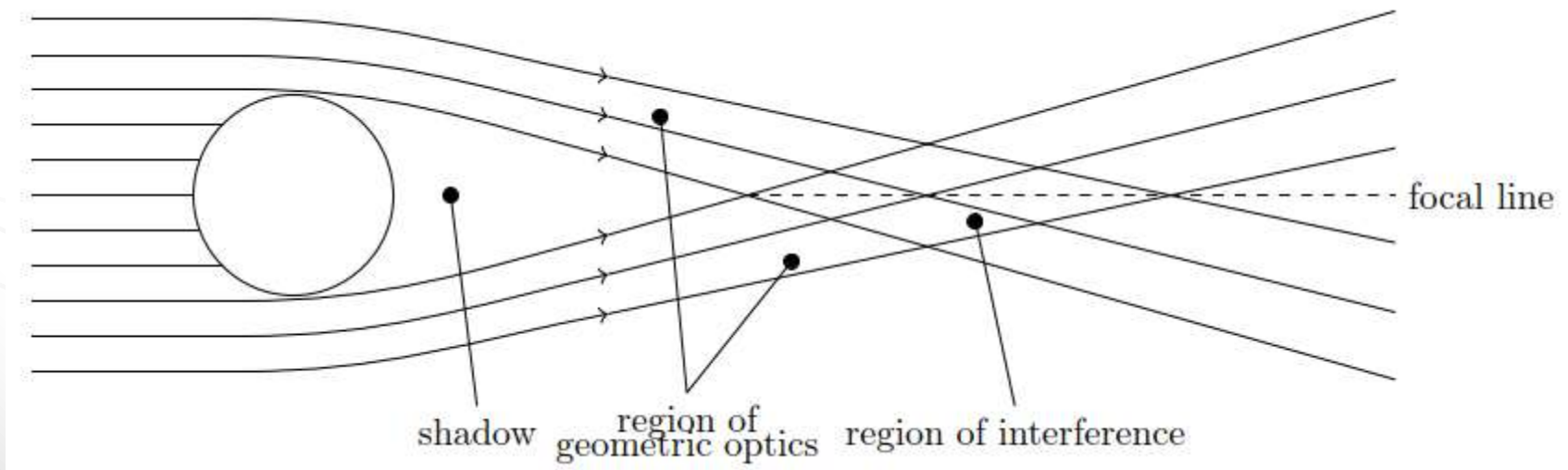
- 1919: Eddington napfogyatkozás-expedíciója



New York Times, 1919 november 10

Fókusz távolság

- Az elhajló fénysugarak összeérnek
- A Naptól való távolság ~550 Cs. E.



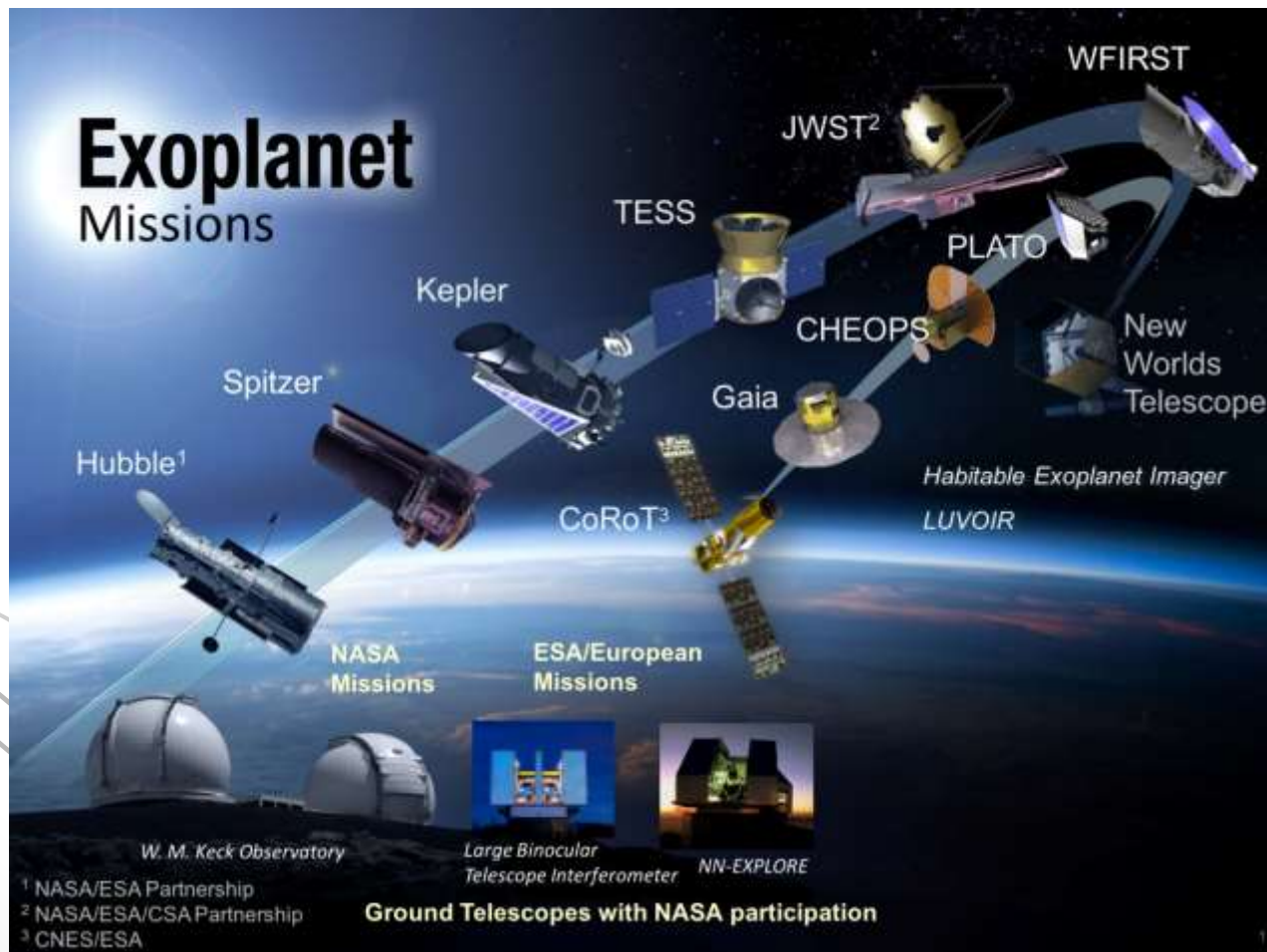
Óriási nagyítás és fényerősítés

- Ha távcsőként tudnánk használni, a Nap gravitációs tere fantasztikus paraméterekkel rendelkezik:
 - Maximum fényerősítés: 10^{11} (láthatóvá tenne egy gyertyalángot a Holdon)
 - Szögfelbontás: 10^{-11} szögmásodperc (centiméteresnél kisebb tárgyak láthatóak lennének a Holdon)

Exobolygó-kutatás

- Távoli bolygók ezreit fedezzük fel indirekt eszközökkel
- Még nem találtunk ilyen, de hamarosan életet hordozó bolygó is lehet közöttük
- Megfigyelni nem tudjuk: a legjobb űrtávcső sem ad többet mint egy elmosódott pixelt

Exobolygó-kutatás



Hagyományos távcsövek

- Egy 100 fényévre lévő Föld-szerű bolygóról éles fénypontot egy 90 km-es távcső tudna készíteni
- A jel annyira gyenge hogy évezredekig kellene folyamatosan gyűjteni a fényt a háttérzaj kiszűréséhez

De a Nap nem jól fókuszál



Ki emlékszik a Hubble-teleszkópra?

- 1990-ben hibás tükörrel bocsátották pályára
- Elmosódott, homályos képeket adott

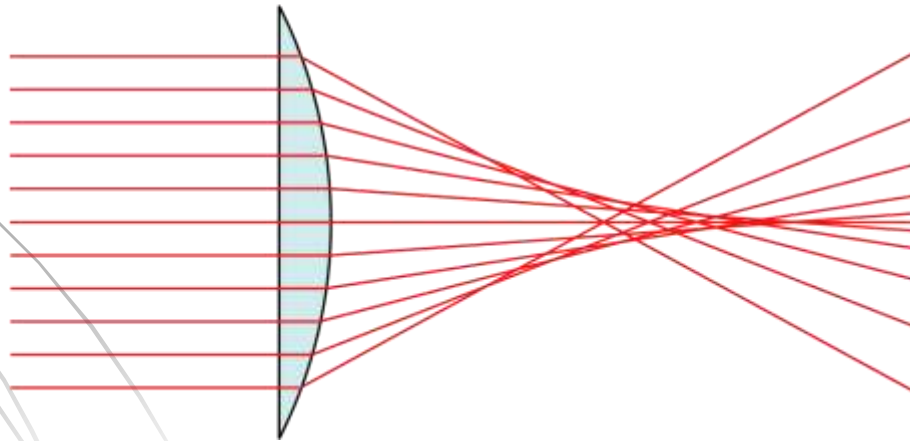
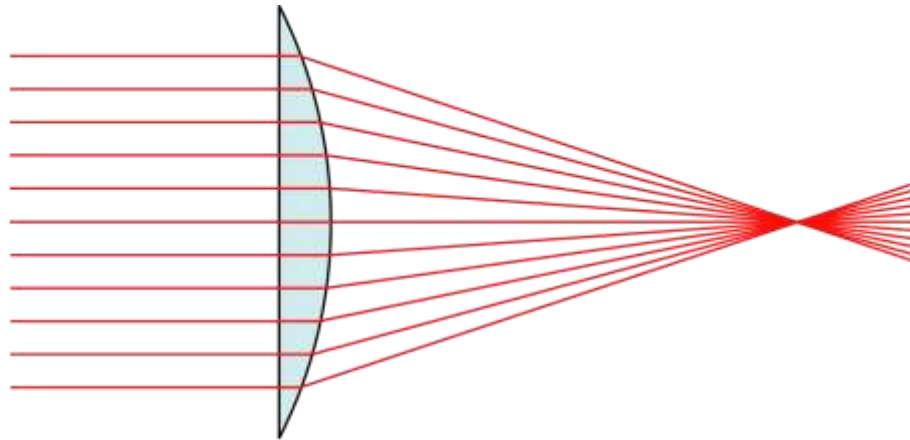


Dekonvolúció

- A pontos optikai tulajdonságok ismeretében az éles kép helyreállítható

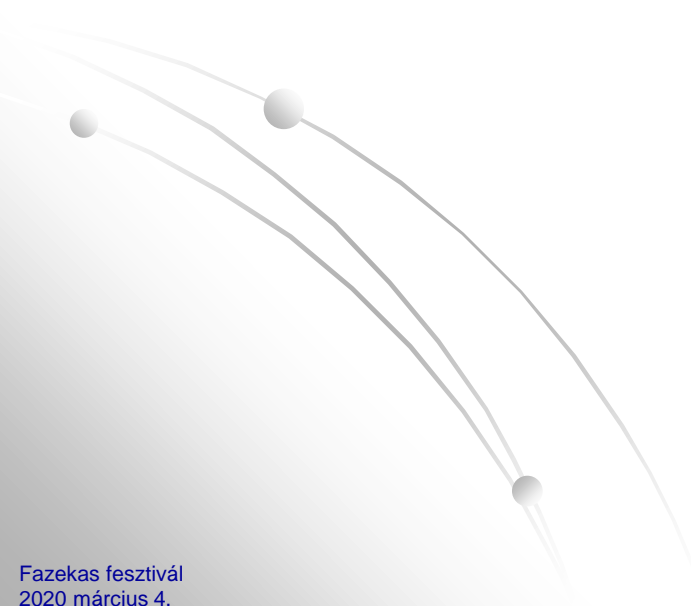


Szférikus aberráció



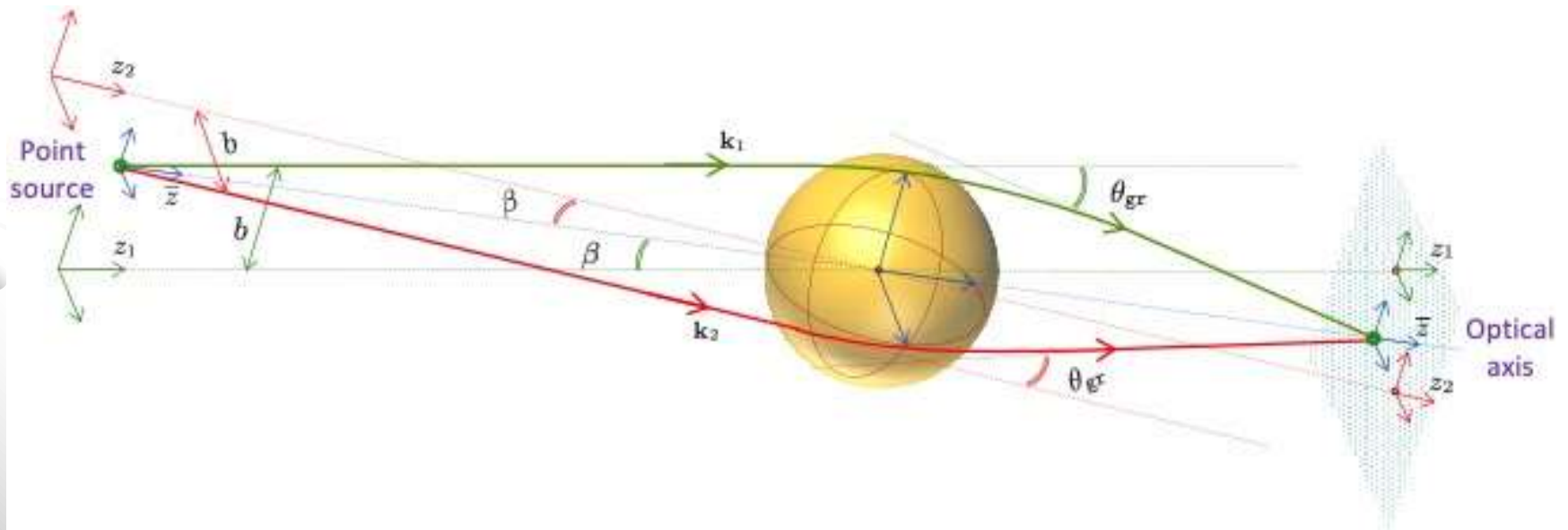
A gravitációs lencse jellemzése

- Szférikus aberráció
- A fényességeloszlási függvény (point-spread function, PSF) ismert
- A művelet elvben invertálható

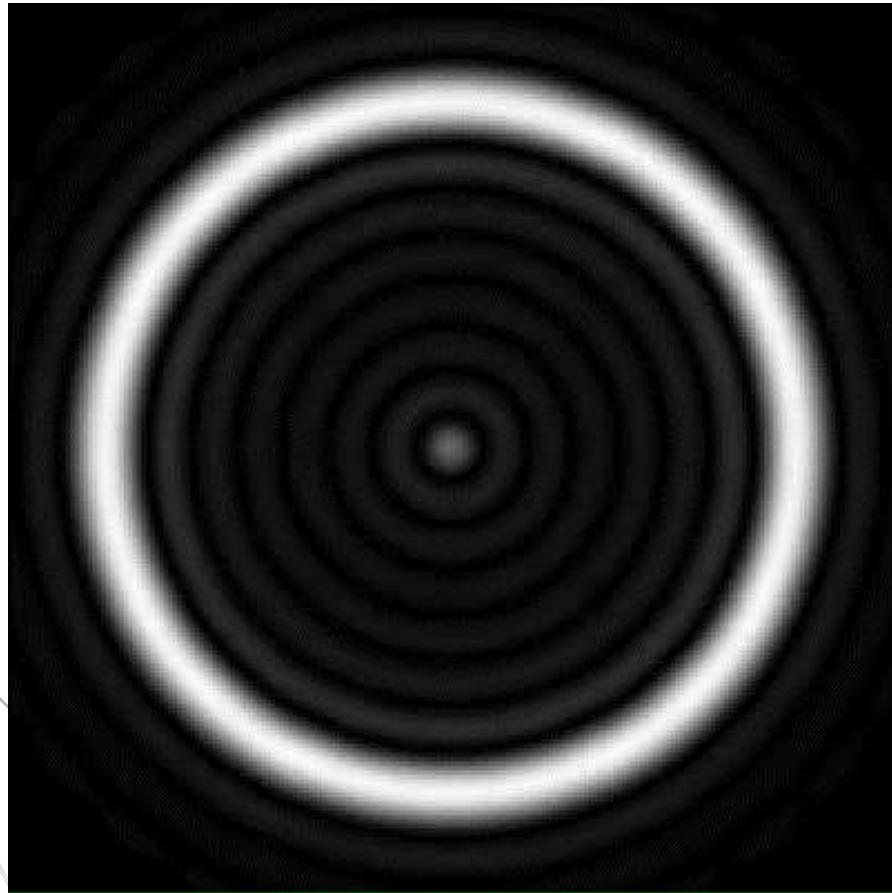


De mit is látunk onnan?

- A Nap körül a fény minden irányban meghajlik (nem méretarányos kép!):

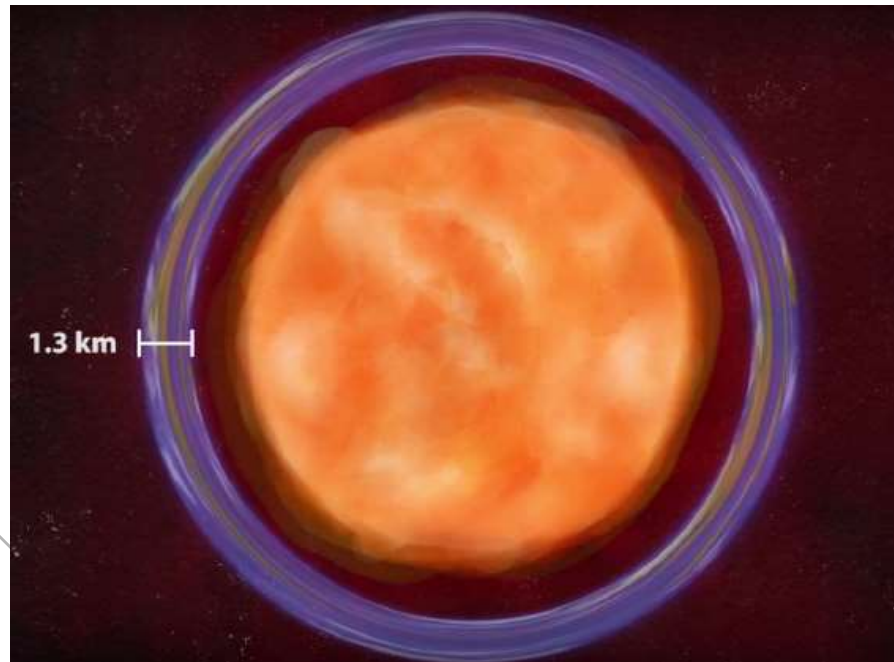


Pontszerű fényforrás (fókuszvonalától távolodó megfigyelő)



Exobolygó Einstein-gyűrűje

- Tehát egy körgyűrűt látunk a Nap körül!



Látott vs. leképezett kép

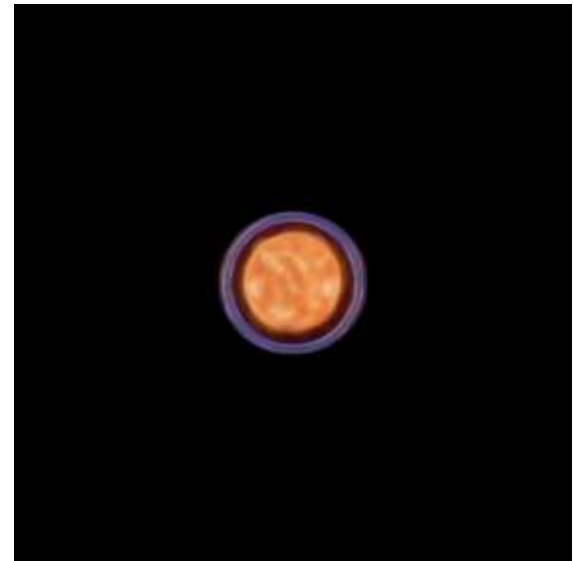
- A kép amit egy Nap felé néző teleszkóp „lát” nem ugyanaz, mint amit a Nap vetít
- Moziteremben a vetítővászon képet ad, de a pódiumon állva, a vetítőgép felé nézve nem a képet látjuk, csak éles fényt a lencséből
- A Nap esetén az Einstein-gyűrűt látjuk; a vetített kép az elmosódott exobolygó

Mit látunk?

- Vetített kép (km² nagyságrendű):



- Amit egy képpontból látunk:



Mit csinál a PSF?

- A PSF megmondja hogy az eredeti kép egy adott képpontjából a leképezett kép egy adott képpontjába mennyi fény jut:

$$I'(\mathbf{y}_j) = \sum_{i=1}^N \text{PSF}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) I(\mathbf{x}_i)$$

A PSF mátrixformája

- A PSF mátrixformába is írható:

$$C_{ij} = \text{PSF}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_j) = \begin{pmatrix} \text{PSF}(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1) & \cdots & \text{PSF}(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{PSF}(\mathbf{x}_N, \mathbf{y}_1) & \cdots & \text{PSF}(\mathbf{x}_N, \mathbf{y}_N) \end{pmatrix}$$

$$I'_j = \sum_{i=1}^N C_{ij} I_i$$

Dekonvolúció operátora

- A konvolúciós mátrix elvben invertálható

$$I'_j = \sum_{i=1}^N C_{ij} I_i$$

$$I_i = \sum_{j=1}^N C_{ij}^{-1} I'_j$$

Konvolúciós tétel

- A gyakorlatban a mátrix iszonyatosan nagy (megapixeles kép = 10^{12} mátrixelem!)
- Viszont segítségünkre jön a konvolúciós tétel: Fourier-transzformáció után egyszerű osztásra redukáljuk a feladatot

Dekonvolúció és zaj

- A dekonvolúció helyreállítja a képet amennyiben a PSF ismert
- Viszont lényegesen megnöveli a zajt, csökkenti a jel-zaj viszonyt (signal-to-noise ratio, SNR)

A Nap és a korona

- A Nap fényes, ki kell takarni (koronagráf)
- 550 Cs. E. távolságból ehhez távcső kell!
- A gyűrű háttere az ugyancsak fényes napkorona (erős zajforrás)

Lehetséges eredmény

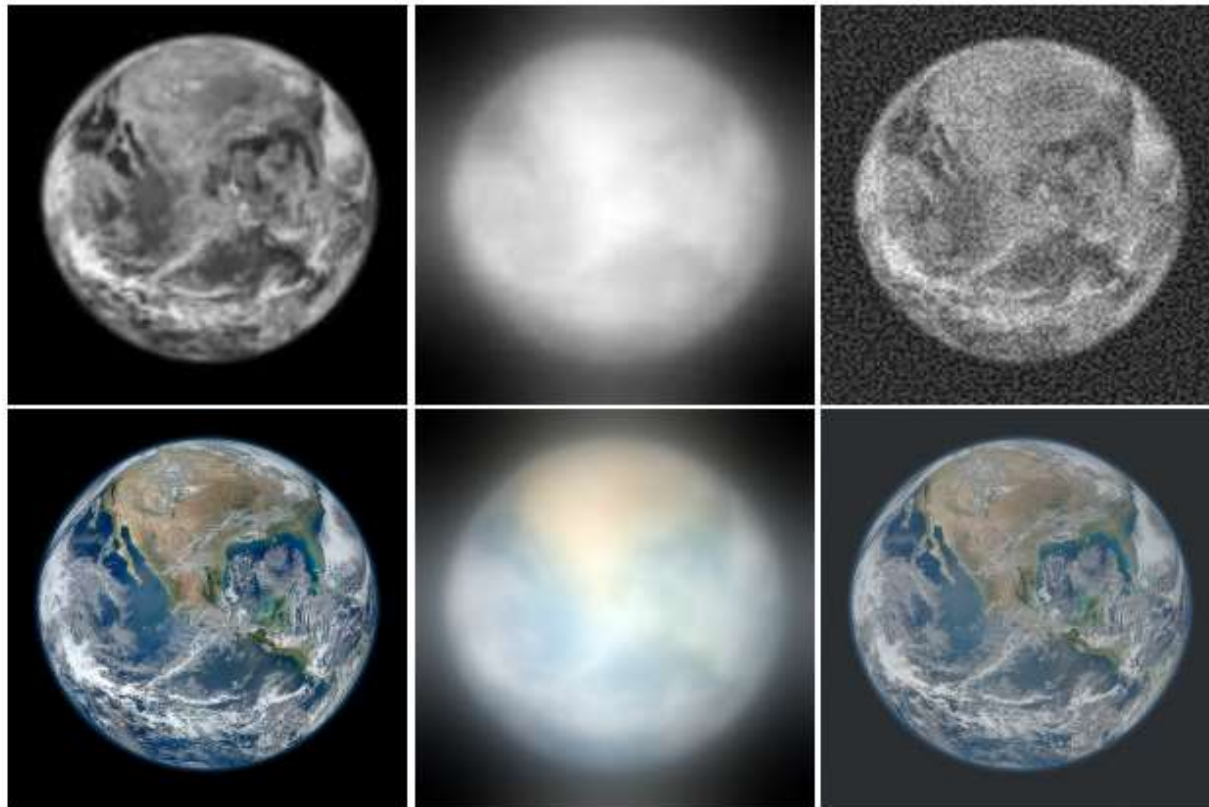


FIG. 11: A simulation of the effects of the monopole solar gravitational lens on an Earth-like exoplanet image. Top row, left: a monochrome image, sampled at 128×128 pixels; center: blurred image; right: deconvolution at $\text{SNR} \sim 4.5$. From [27]. Bottom row, left: original RGB color image with a 1024×1024 pixel resolution; center: image blurred by the SGL; right: the result of image deconvolution at an SNR of ~ 5.2 per color channel, or combined SNR of ~ 9 .

SGL-expedíció

- Eljuttatni egy (vagy több) méteres távcsövet négyszer akkora távolságra, mint a Voyager-1
- Méteres pontossággal megtalálni a fókuszvonalát egy távoli bolygónak
- Éveken át folyamatos mérést végezni, elegendő adatot gyűjtve a dekonvolúcióhoz

Lehetséges technológiák

- Napvitorla (solar sail)
- Több kis űrszondából álló konstelláció
- Több hullámból álló konstelláció
- Nukleáris áramforrás, tartós akkumulátor
- Évtizedekig üzemképes elektronika
- Magasfokú autonómia
- Ultraprecíz autonóm navigáció
- Extrém határfokú kommunikáció

Köszönöm a figyelmet!

● **Kérdések?**

Pioneer hivatkozások

- ***Support for the thermal origin of the Pioneer anomaly, Slava G. Turyshev, Viktor T. Toth, Gary Kinsella, Siu-Chun Lee, Shing M. Lok and Jordan Ellis, Phys. Rev. Lett. 108, 241101 (2012)***
- ***Support for temporally varying behavior of the Pioneer anomaly from the extended Pioneer 10 and 11 Doppler data sets, Slava G. Turyshev, Viktor T. Toth, Jordan Ellis and Craig B. Markwardt, Phys. Rev. Lett. 107, 081103 (2011)***
- ***The Pioneer Anomaly, Slava G. Turyshev and Viktor T. Toth, Living Revs. Relativity 13, (2010), 4***
- ***Thermal recoil force, telemetry, and the Pioneer anomaly, Viktor T. Toth and Slava G. Turyshev, Phys. Rev. D. 79, 043011 (2009)***
- ***Independent analysis of the orbits of Pioneer 10 and 11, Viktor T. Toth, Int. J. Mod. Phys. D18 (2009) 5, 717-741***
- ***The Study of the Pioneer Anomaly: New Data and Objectives for New Investigation, Slava G. Turyshev, Viktor T. Toth, Larry R. Kellogg, Eunice. L. Lau, Kyong J. Lee, Int. J. Mod. Phys. D15 (2006) 1, 1-56***

Pioneer hivatkozások

- *The constancy of the Pioneer anomalous acceleration*, Øystein Olsen, *Astron. Astrophys.* 463, 393 (2007)
- *Conventional Forces can Explain the Anomalous Acceleration of Pioneer 10*, Louis K. Scheffer, *Phys. Rev. D.* 67, 084021 (2003)
- *Independent Confirmation of the Pioneer 10 Anomalous Acceleration*, Craig B. Markwardt, arXiv:gr-qc/0208046 (2002)
- *Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11*, John D. Anderson, Philip A. Laing, Eunice L. Lau, Anthony S. Liu, Michael Martin Nieto and Slava G. Turyshev, *Phys. Rev. D.* 65, 082004 (2002)
- *Comment on “Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration”*, J. I. Katz, *Phys. Rev. Lett.* 83, 1892 (1999)
- *Prosaic Explanation for the Anomalous Accelerations Seen in Distant Spacecraft*, E. M. Murphy, *Phys. Rev. Lett.* 83, 1890 (1999)
- *Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration*, John D. Anderson, Philip A. Laing, Eunice L. Lau, Anthony S. Lium Michael Martin Nieto and Slava G. Turyshev, *Phys. Rev. Lett.* 81, 2858 (1998)

Könyvek

- *Formulation for Observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation*, Theodore D. Moyer, John Wiley & Sons (2005)
- *Theory and experiment in gravitational physics*, Clifford M. Will, Cambridge University Press (2000)
- *Foundations of Radiation Hydrodynamics*, Dimitri Mihalas and Barbara Weibel-Mihalas, Dover Publications (1999)

SGL hivatkozások

- ***Image formation for extended sources with the solar gravitational lens, Slava G. Turyshev and Viktor T. Toth, arXiv:2002.06492 [astro-ph.IM]***
- ***Image formation process with the solar gravitational lens, Slava G. Turyshev and Viktor T. Toth, Phys. Rev. D 101, 044048 (2020)***
- ***Photometric imaging with the solar gravitational lens, Slava G. Turyshev and Viktor T. Toth, Phys. Rev. D 101, 044025 (2020)***
- ***Recognizing the Value of the Solar Gravitational Lens for Direct Multipixel Imaging and Spectroscopy of an Exoplanet, Slava G. Turyshev et al., (A White Paper to the National Academy of Sciences Committee on an Exoplanet Science Strategy Call for Papers) arXiv:1803.04319 [astro-ph.IM]***
- ***Direct Multipixel Imaging and Spectroscopy of an Exoplanet with a Solar Gravity Lens Mission, Slava G. Turyshev et al., (Final Report for the NASA's Innovative Advanced Concepts (NIAC) Phase I proposal) arXiv:1802.08421 [astro-ph.IM]***
- ***Diffraction of electromagnetic waves in the gravitational field of the Sun, Slava G. Turyshev and Viktor T. Toth, Phys. Rev. D 96, 024008 (2017)***
- ***Introduction to Fourier optics, J. W. Goodman (W.H. Freeman and Company, New York, 2017), 2nd ed.***