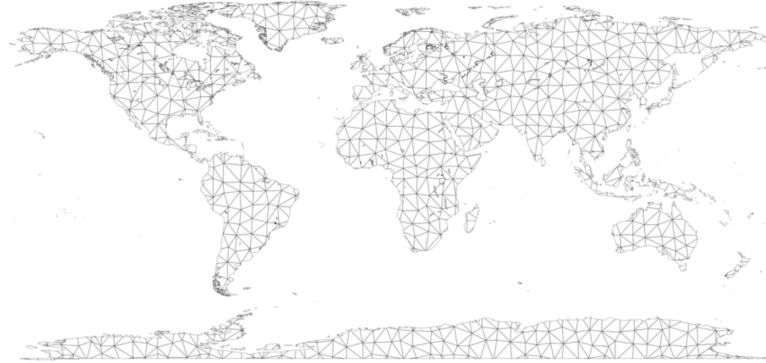


Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu 2021 Yılı Bilimsel Toplantısı, 25-27 Kasım 2021
Turkish National Geodesy Commission 2021 Scientific Meeting, 25-27 November 2021

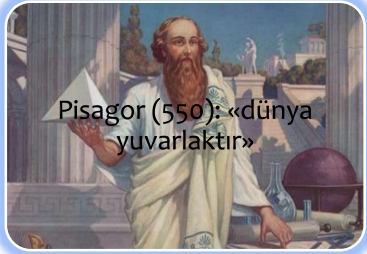


Kronometrik Nivelman Yöntemi ile
Eşpotansiyel Yüzeylerin Belirlenmesi



Yük. Müh. Hasan Onur IŞIK
Doç. Dr. M. Tefvik ÖZLÜDEMİR
Dr. Kerem HALICIOĞLU

Giriş



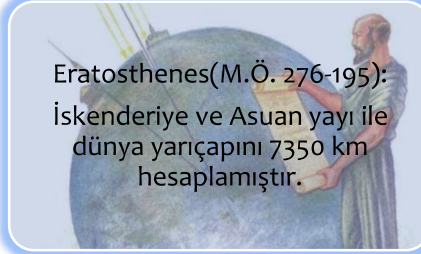
Pisagor (550): «dünya yuvarlaktır»

Görsel: math.tamu.edu/



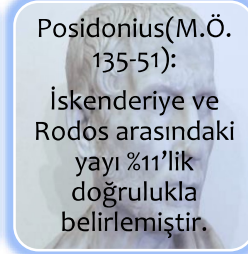
Aristo (350): «dünya küredir»

Görsel: Raphael, The School of Athens, 1509–1511



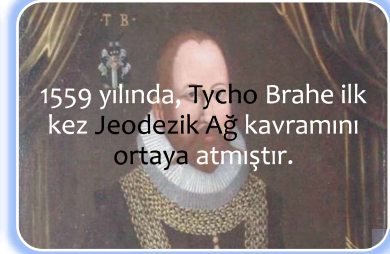
Eratosthenes(M.Ö. 276-195): İskenderiye ve Asuan yayı ile dünya yarıçapını 7350 km hesaplamıştır.

Görsel: theprocrastinatingscientist.home.blog



Posidonius(M.Ö. 135-51): İskenderiye ve Rodos arasındaki yayı %11'lik doğrulukla belirlemiştir.

Görsel: Museo Archeologico'daki Antik Roma büstü



1559 yılında, Tycho Brahe ilk kez Jeodezik Ağ kavramını ortaya atmıştır.

Görsel: wikimedia.org



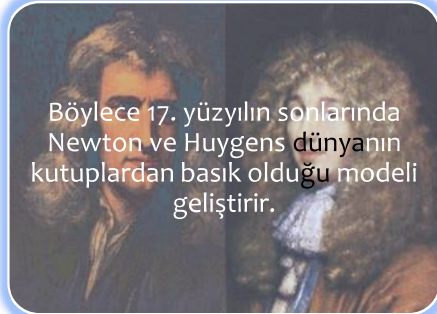
1880 yılında Helmert Jeodezi bilimini “dünya yüzeyinin ölçülmesi ve haritalanması” olarak tanımlar.

Görsel: Friedrich Robert Helmert (Humboldt University Berlin, ©Humboldt-Universität zu Berlin, Universitätsbibliothek).



Richer Cayenne Paris'te yaptığı sarkaçlı saat gözlemleri sonucu ağırlık ivmesinin değişiklik gösterdiğini buldu.

Görsel: thonyc.wordpress.com



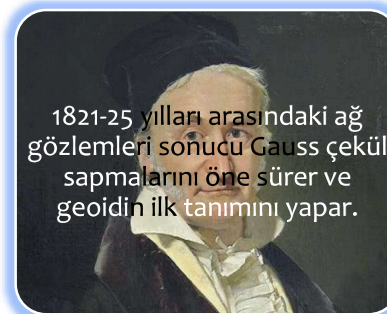
Böylece 17. yüzyılın sonlarında Newton ve Huygens dünyanın kutuplardan basık olduğu modeli geliştirir.

Görsel: Newton'ın portresi (soldaki), Godfrey Kneller (1689); Christiaan Huygens (sağdaki), Caspar Netscher (1671)



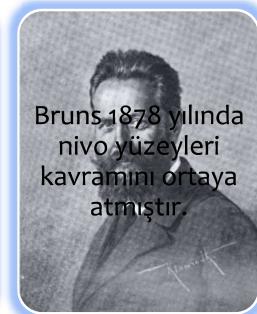
Listing Gauss'un tanımladığı yüzeyi 1872'de geoid olarak adlandırmıştır.

Görsel: wikimedia.org



1821-25 yılları arasındaki ağ gözlemleri sonucu Gauss çekül sapmalarını öne sürer ve geoidin ilk tanımını yapar.

Görsel: Jensen C. A. (1840)



Brunns 1878 yılında nivo yüzeyleri kavramını ortaya atmıştır.

Görsel: wikimedia.org/

Yükseklik Belirlemede Newtonyan Kavramlar

Aralarında r kadar mesafe bulunan M kütleli cisim tarafından m kütleli cisme etkiyen kütleçekim kuvveti

$$F = mg = -\frac{MmG}{r^2}$$

olarak ifade edilir. Burada F kütleçekim kuvveti, $G \approx 6.67 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$ evrensel Newton çekim sabitidir (Anderson ve diğ., 2015; Rosi ve diğ., 2014).

$$g = -\frac{MG}{r^2} = -\frac{MG}{r^2}$$

$$V(r) = \int_{\infty}^r gM dr = \int_{\infty}^r -\frac{MG}{r^2} dr = \frac{MG}{r}$$



Yükseklik Belirlemede Newtonyan Kavramlar

Dünyanın kendi eksenini etrafında dönmesinden kaynaklanan merkezkaç kuvveti ω kürenin kendi eksenini etrafında dönme hızı olmak üzere

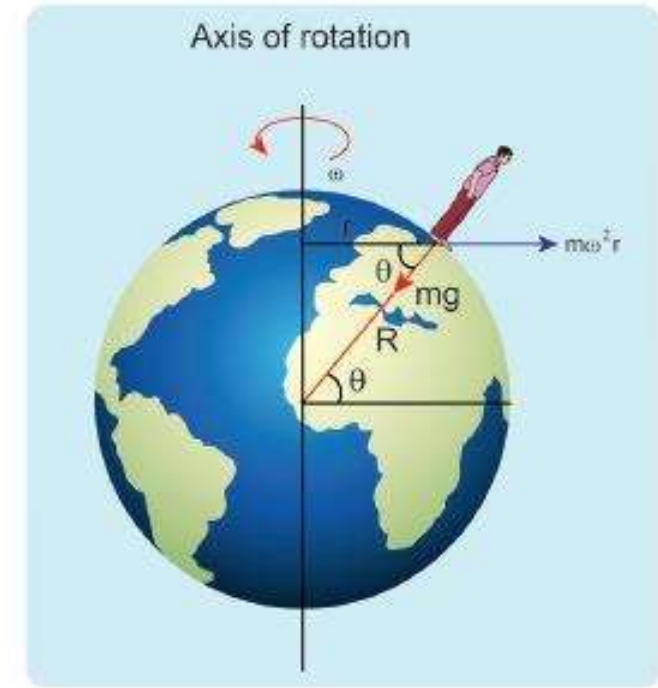
$$\vec{c} = \omega^2 r_\phi$$

M kütleli cismin z eksenini etrafındaki hareketi nedeniyle yapılması gereken iş miktarı

$$V_c = \int_0^{r_\phi} \vec{c} M dr = \int_0^{r_\phi} r \omega^2 dr = \frac{1}{2} \omega^2 \sqrt{(x^2 + y^2)}$$

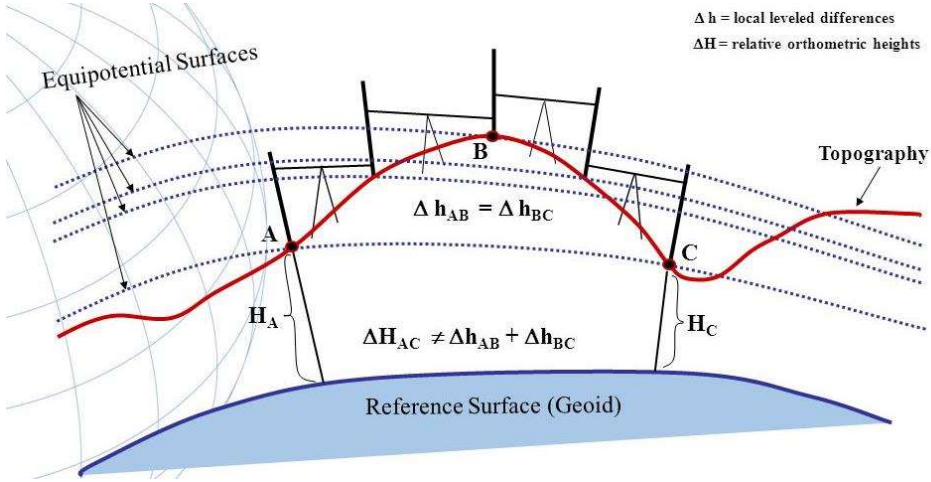
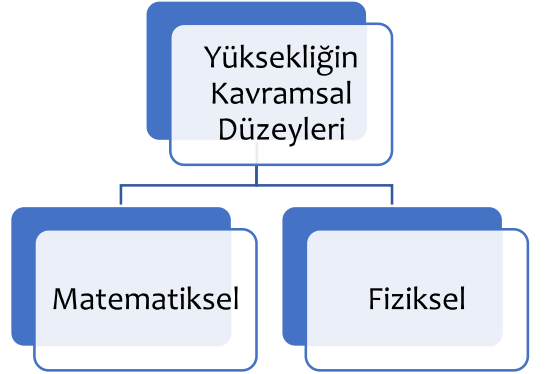
Sonuç olarak;

$$W = V + V_c = G \iiint \frac{\rho}{r} dv + \frac{1}{2} \omega^2 \sqrt{(x^2 + y^2)}$$

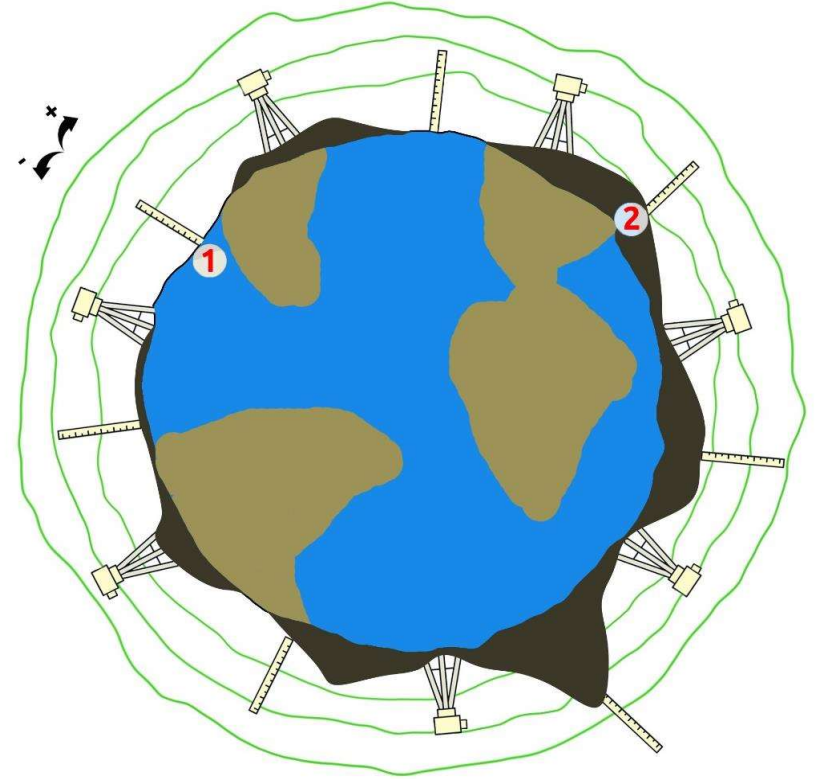


Görsel: brainkart.com

Yükseklik Sistemleri



(Daniel J. Martin, 2008)



Görselleştirme: Z. Ertuğrul Işık

Yükseklik Sistemleri

- Jeopotansiyel Sayı

$$C_i = W_0 - W_i = \int_{P1}^{P2} g dh$$

- Dinamik Yükseklikler:

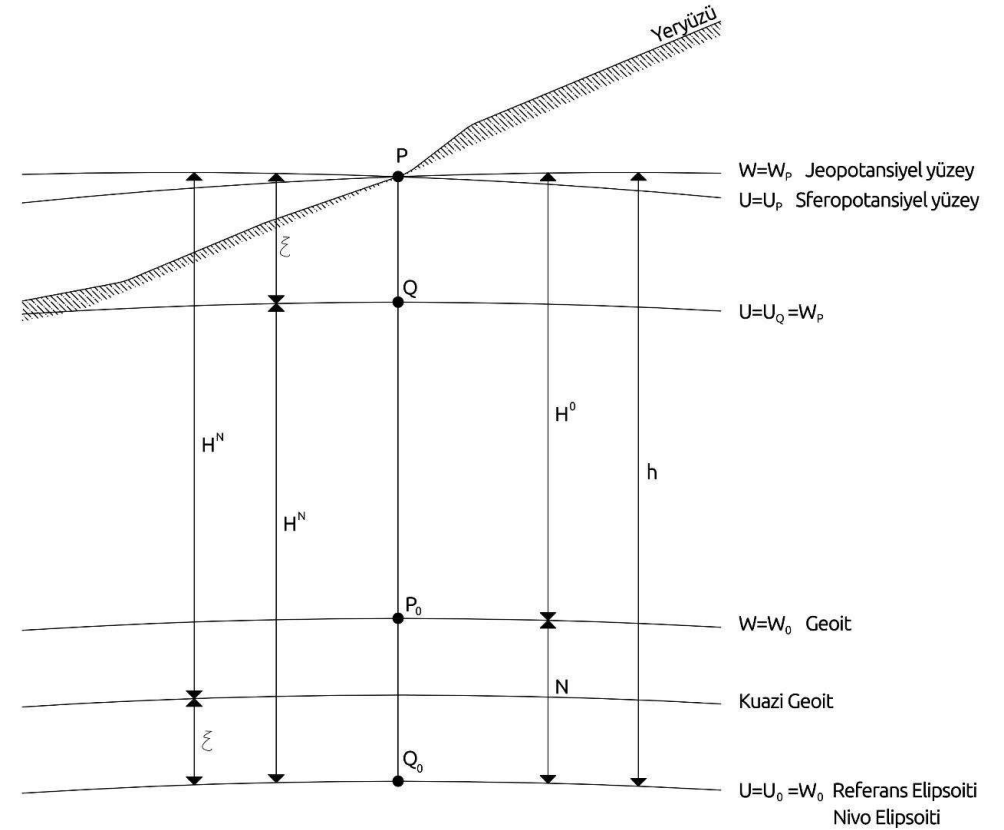
$$H_i^D = \frac{C_i}{g_R}$$

- Ortometrik Yükseklikler:

$$H_i^D = \frac{C_i}{\bar{g}_i}$$

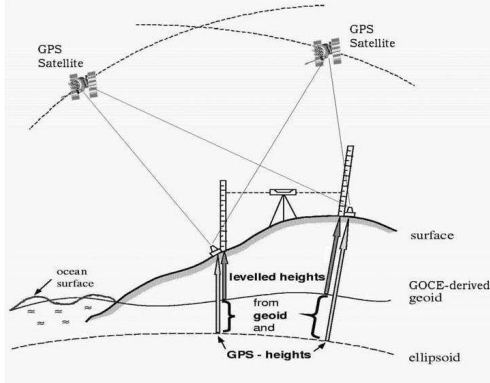
- Normal Yükseklikler:

$$H_i^N = \frac{C_i}{\bar{\gamma}_i}$$

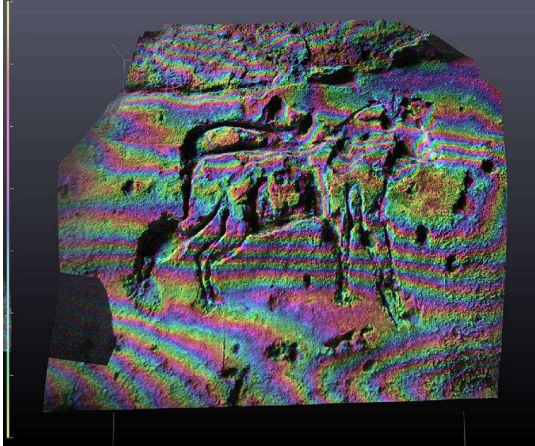


Görselleştirme: Z. Ertuğrul Işık

Yükseklik Ölçmeleri



Görsel: Johannessen, J. A., Balmino, G., Le Provost, C., Rummel, R., Sabadini, R., Sünkel, H., ... & Drinkwater, M. (2003).



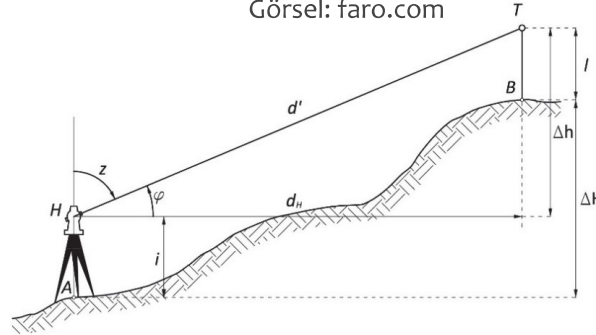
Görsel: McCarthy, J. (2014)



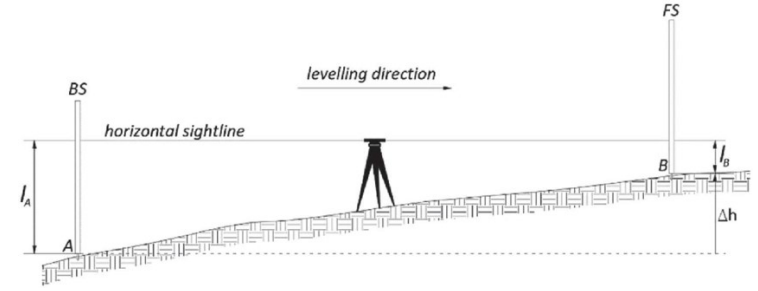
Worden Gravimetresi
(Museum of American History)



Görsel: faro.com



Görsel: Zrinjski, M., Barković, Đ., Baričević, S., & Alaupović, L. (2018).



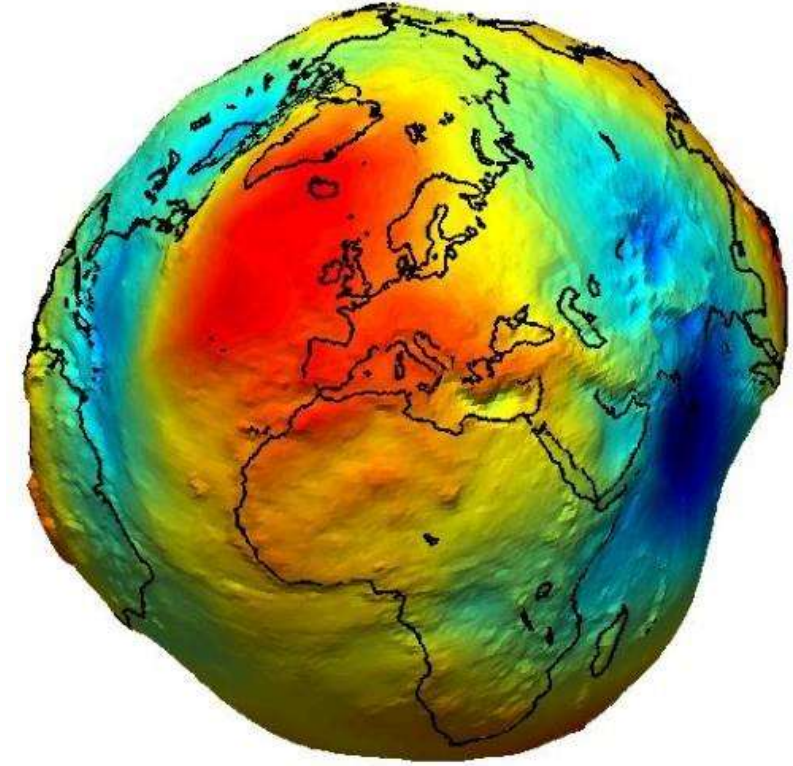
Görsel: Zrinjski, M., Barković, Đ., Baričević, S., & Alaupović, L. (2018).



Görsel: scssurvey.co.uk

Geoit Belirleme Yöntemleri

1. Küresel Eşpotansiyel açılım kullanılarak
2. Astrojeodezik çekül sapmaları ile
3. Nokta gravite ölçmeleri ile
4. GNSS yöntemi ile
5. Küresel Jeopotansiyel açılım ve gravite ölçmelerinin bileşimi ile
6. Sayısal yoğunluk modelleri ile



Görsel: esa.int

Türkiye’de Jeodezik Ağlar

- 1935-1970: Antalya’da mareograf istasyonu ve geometrik nivelman ölçmeleri
- 1956-58: Türkiye Temel Gravite Ağı (TTGA)
- 1973-93: geometrik nivelman ölçmeleri ile TUDKA-92
- 1993-99: TTGA-99
- 1997-99 : TUTGA
- 1999 -2001: TUTGA-99A
- TUDES
- 2008: TUSAGA-Aktif
- TRGRAV-Net

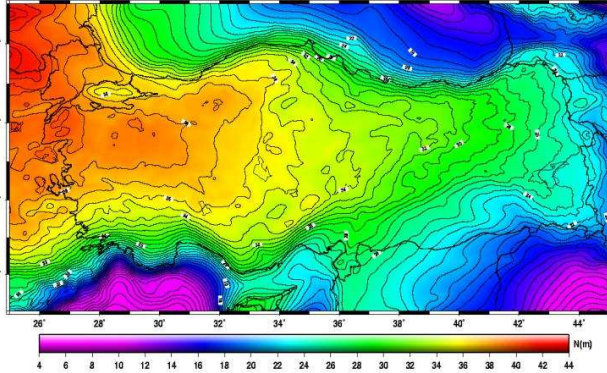
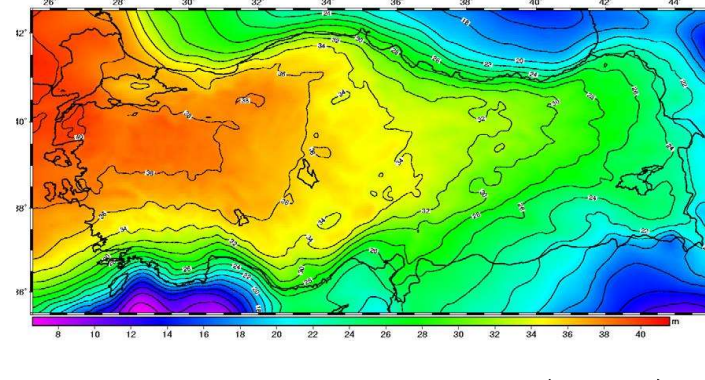
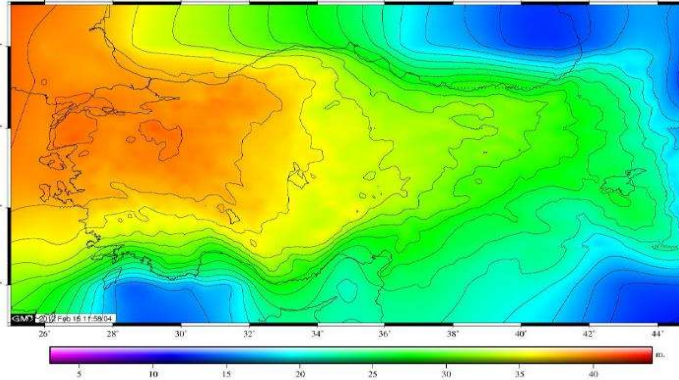
Türkiye’de Ulusal Yükseklik Referans Sistemleri



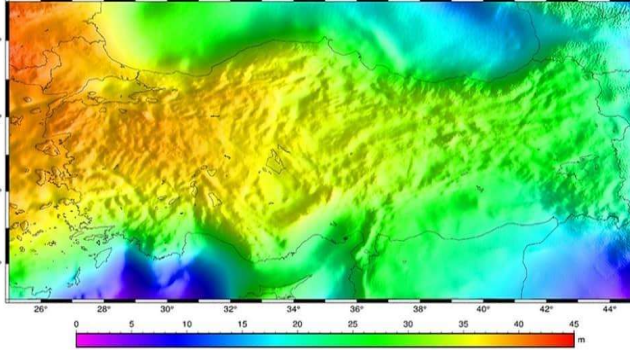
1976 Türkiye Geoidi (Ayan, 1976).

Türkiye Geoidi 1991 (TG-91) (Direnc ve diğ., 2012).

Türkiye Geoidi-2003 (TG-03)
(Direnc ve diğ., 2012).



Türkiye Hibrid Geoidi 2009 (THG-09)
(Direnc ve diğ., 2012).



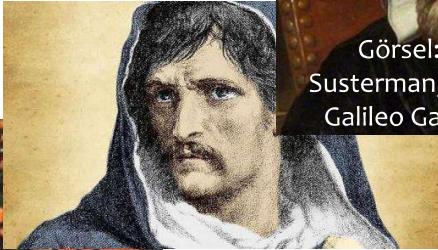
Türkiye Jeoit Modeli 2020
(TG-20) (Görsel: harita.gov.tr)

Fizikte Görelilik Kavramları

1377
Nicole
Oresme



1584
Bruno



Görsel: Martinez, Elena P. Giordano
Bruno. National Geographic Espana. Haziran 2013.

Görsel: gallica.bnf.fr

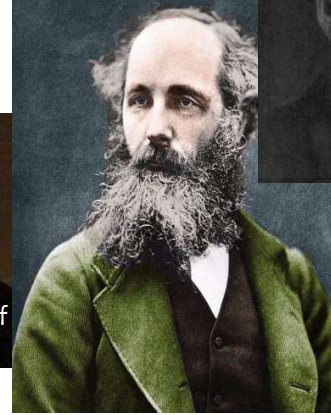
1632 “Dialogue
Concerning the
Two Chief
World Systems”

1865
Maxwell
Denklemleri

1624
Galileo

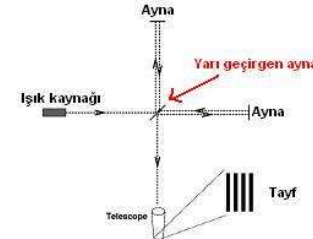
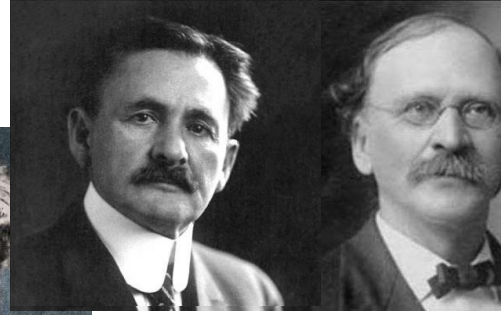


Görsel: Justus
Susterman, Portrait of
Galileo Galilei, 1636.



Görsel: greelane.com

1887
Michelson-Morley
Deneyi



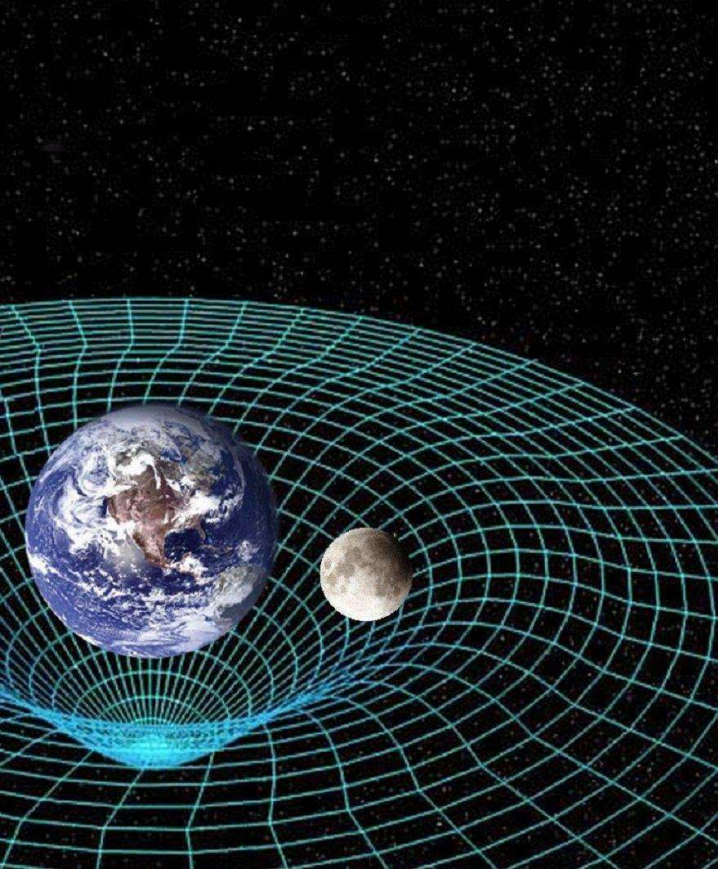
Görsel: wikimedia.org (Michelson, üst sol)
e2.physik.tu-dortmund.de (Morley, üst sağ)
baskent.edu.tr/ (deney düzeğini, alt)

1905 Özel Görelilik
1915 Genel Görelilik



Görsel: Center for Jewish History

Einstein Alan Denklemleri



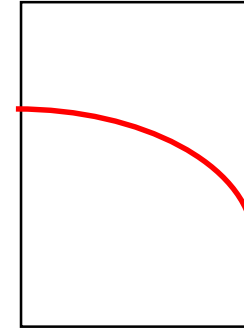
$R_{\mu\nu}$: Ricci eğrilik Tensörü

R : eğrilik sabiti

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$g_{\mu\nu}$: metrik tensör

$T_{\mu\nu}$: stres-enerji tensörü



Görsel: thestargarden.co.uk

Newton Sonrası Formalizm

Parametre	Genel Görelilik'te karşılığı	Genel Görelilikte Değeri	Değişmez bir eylem prensibine dayanan teorilerdeki değer	Korunum yasalarının hepsini içeren teorilerdeki değer
γ	Birim durgun kütle tarafından üretilen uzay eğriliği	1	γ	γ
B	Yerçekimi için süperpozisyon yasasında ne kadar “doğrusal dışılık” var?	1	B	B
ξ	Tercih edilen konum etkileri	0	ξ	ξ
α_1 α_2 α_3	Tercih edilen çerçeve etkileri	0 0 0	α_1 α_2 0	0 0 0
α_3 ζ_1 ζ_2 ζ_3 ζ_4	Toplam momentumun korunmasının ihlali?	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0	0 0 0 0 0

$$g_{00} = -1 + 2U - 2\beta U^2 - 2\xi\Phi_W + (2\gamma + 2 + \alpha_3 + \zeta_1 - 2\xi)\Phi_1 + 2(3\gamma - 2\beta + 1 + \zeta_2 + \xi)\Phi_2 \\ + 2(1 + \zeta_3)\Phi_3 + 2(3\gamma + 3\zeta_4 - 2\xi)\Phi_4 - (\zeta_1 - 2\xi)\mathcal{A} - (\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)w^2U - \alpha_2 w^i w^j U_{ij} \\ + (2\alpha_3 - \alpha_1)w^i V_i + \mathcal{O}(\epsilon^3),$$

(Will, 2006)

$$g_{0i} = -\frac{1}{2}(4\gamma + 3 + \alpha_1 - \alpha_2 + \zeta_1 - 2\xi)V_i - \frac{1}{2}(1 + \alpha_2 - \zeta_1 + 2\xi)W_i - \frac{1}{2}(\alpha_1 - 2\alpha_2)w^i U \\ - \alpha_2 w^j U_{ij} + \mathcal{O}(\epsilon^{5/2}),$$

$$g_{ij} = (1 + 2\gamma U)\delta_{ij} + \mathcal{O}(\epsilon^2).$$

Schwarzschild Çözümü

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2m}{r}\right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$



Görsel: wikipedia.org/

$$g_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{2m}{r}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\left(1 - \frac{2m}{r}\right)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r^2 \sin^2(\theta) \end{pmatrix}$$

IAU Resolution B1 (2000)

$$g_{00} = -1 + \frac{2W}{c^2} - \frac{2W^2}{c^4}$$

$$g_{0\alpha} = -\frac{4}{c^3} W^\alpha$$

$$g_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} \left(1 + \frac{2}{c^2} W \right)$$

İki Olay Arası Mesafe

$$(1) \quad ds^2 = g_{\alpha\beta}(x)dx^\alpha dx^\beta = -c^2 d\tau^2$$

$$(2) \quad \left(\frac{d\tau}{dt}\right)^2 = -g_{00} - 2g_{0\alpha}\frac{1}{c}\frac{dx^\alpha}{dt} - g_{\alpha\beta}\frac{1}{c^2}\frac{dx^\alpha}{dt}\frac{dx^\beta}{dt} = -g_{00} - 2g_{0\alpha}\frac{v^\alpha}{c} - g_{\alpha\beta}\frac{v^\alpha v^\beta}{c^2}$$

$$(3) \quad \frac{d\tau}{dt} = 1 - \frac{1}{c^2}\left(V + \frac{v^2}{2}\right) + o(c^{-4})$$

GCRS $\rightarrow$ ECEF

$$(4) \quad v = wx' + v'$$

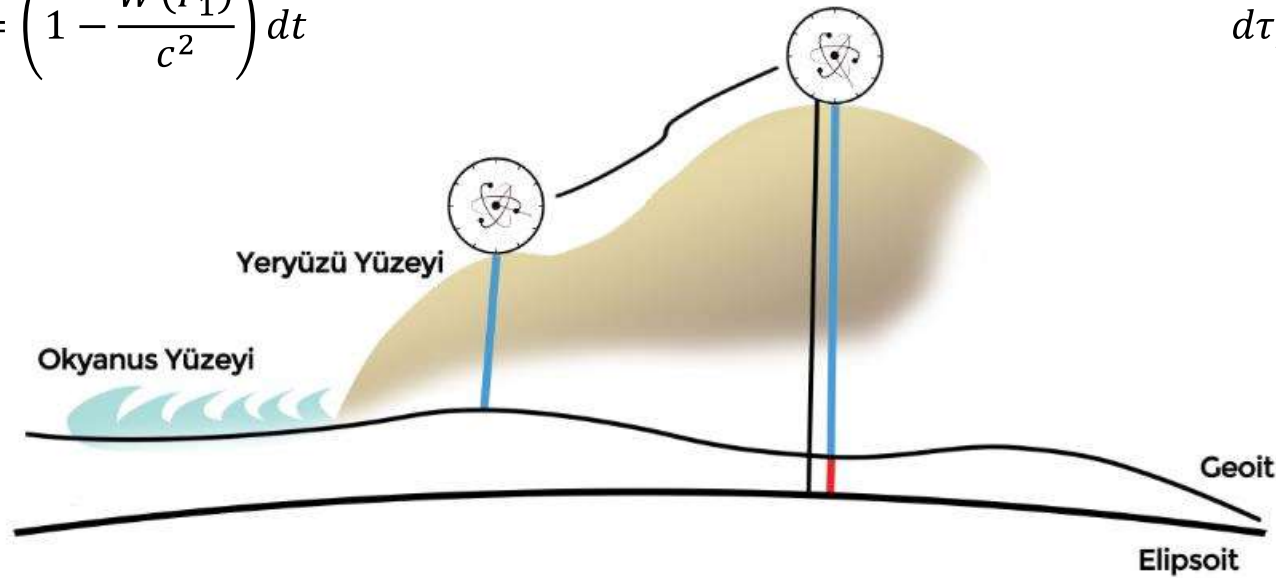
$$(5) \quad \frac{d\tau}{dt} = 1 - \frac{1}{c^2}\left(V + \frac{(wx' + v')^2}{2}\right) + o(c^{-4})$$

$$(6) \quad \frac{d\tau}{dt} \approx 1 - \frac{W}{c^2}$$

Kronometrik Nivelman Yöntemi

$$d\tau_{P_1} = \frac{1}{v_{P_1}} = \left(1 - \frac{W(P_1)}{c^2}\right) dt$$

$$d\tau_{P_2} = \frac{1}{v_{P_2}} = \left(1 - \frac{W(P_2)}{c^2}\right) dt$$

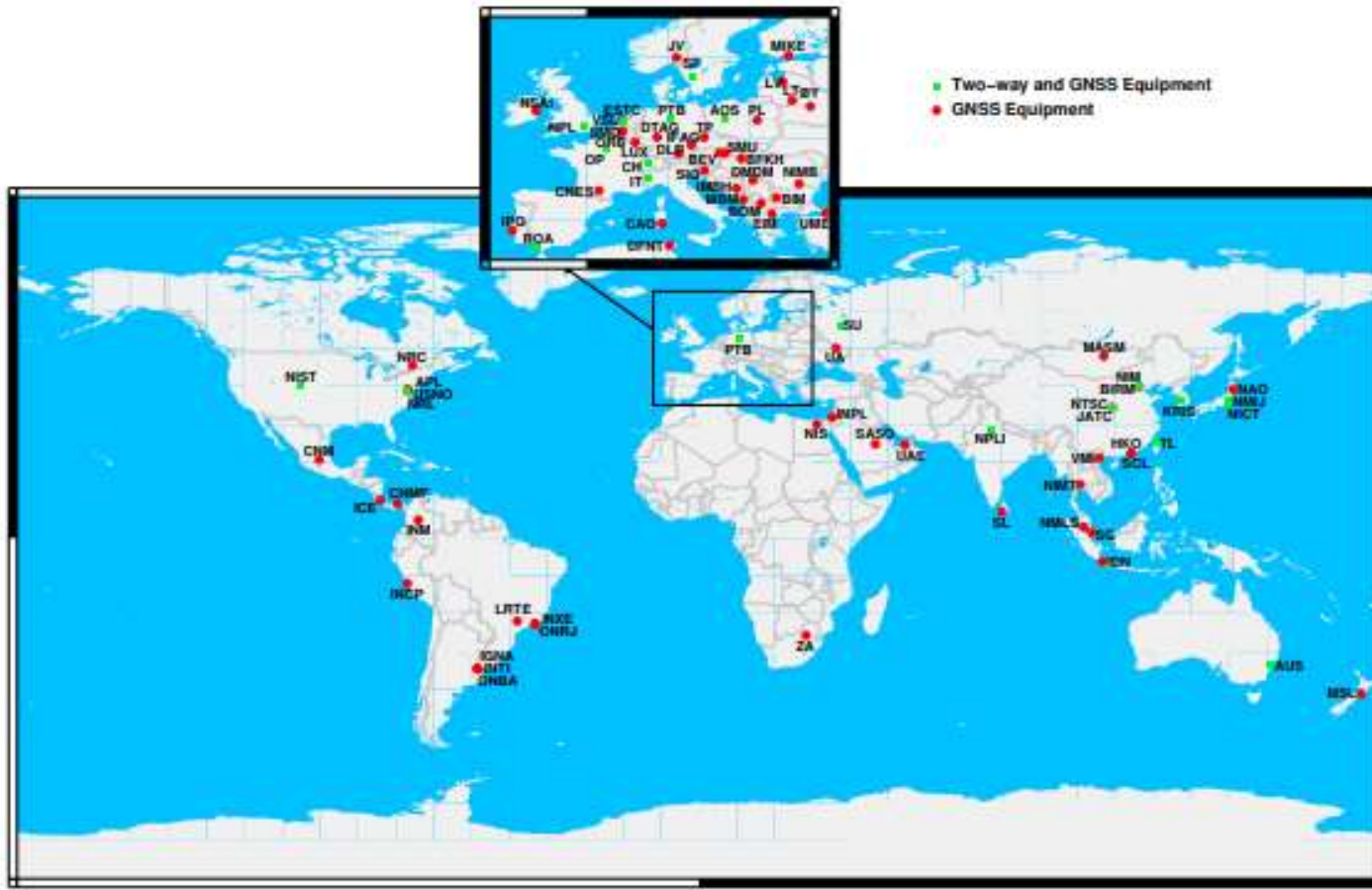


Görselleştirme: Z. Ertuğrul Işık

$$\frac{\Delta v}{v_{P_2}} = \frac{v_{P_2} - v_{P_1}}{v_{P_2}} = 1 - \frac{d\tau_{P_2}}{d\tau_{P_1}} = \frac{W(P_2) - W(P_1)}{c^2}$$

Yerçekimi ivmesi $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ ve $c \approx 300\,000\,000 \text{ m/s}$ olmak üzere; 1 santimetrelilik yükseklik değişimlerinde $\frac{\Delta v}{v} \approx 10^{-18}$ frekans kayması oranı elde edilmektedir.

Zaman Sistemleri



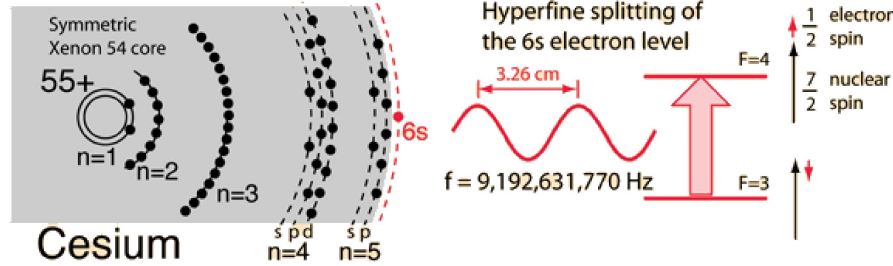
Bureau
International des
Poids et
Mesures

2020 itibariyle TAI ve zaman aktarım ekipmanlarına katkıda bulunan laboratuvarların coğrafi dağılımı (BIPM)

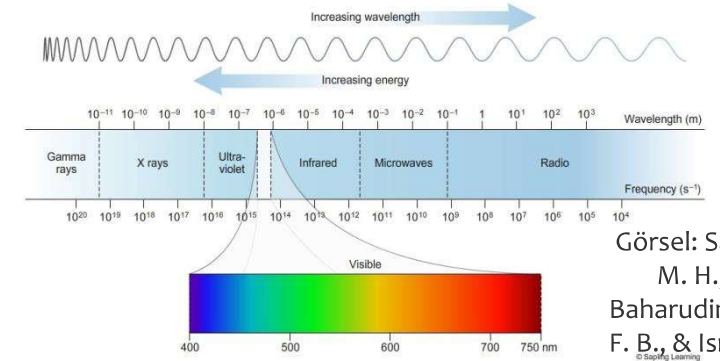
Görsel: BIPM

Atomik Saatler

$$\nu = \frac{\Delta E}{h}$$



Görsel: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/



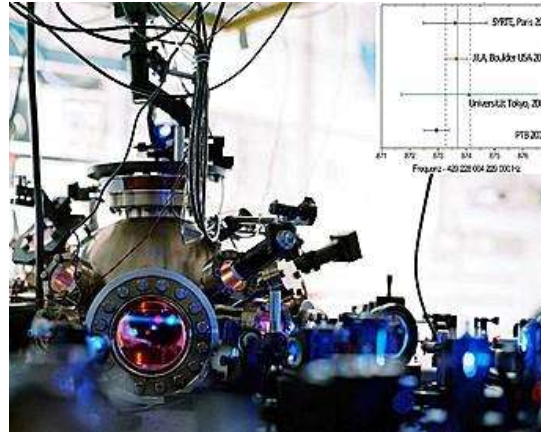
Görsel: Salih, M. H., Baharudin, M. F. B., & Ismail, S. N. (2006).

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{\Delta\nu}{\nu_0 \sqrt{N}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}$$

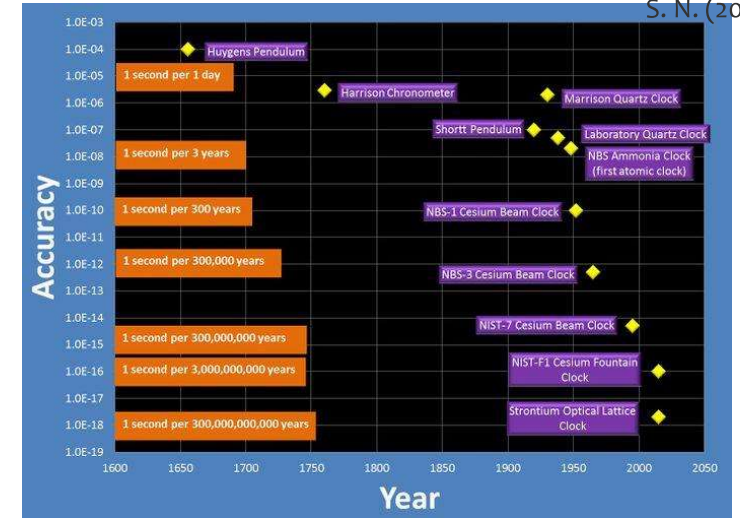
$\Delta\nu$: Saat sisteminin spektroskopik çizgileri
 N : atom sayısı
 T_c : bir ölçümde geçen süre
 τ : ortalama periyot



1949'da NIST tarafından üretilen ilk atom saati
 (Kaynak: NIST)



PTB'deki Stronsiyum Atomik Saati
 Kaynak: ptb.de/



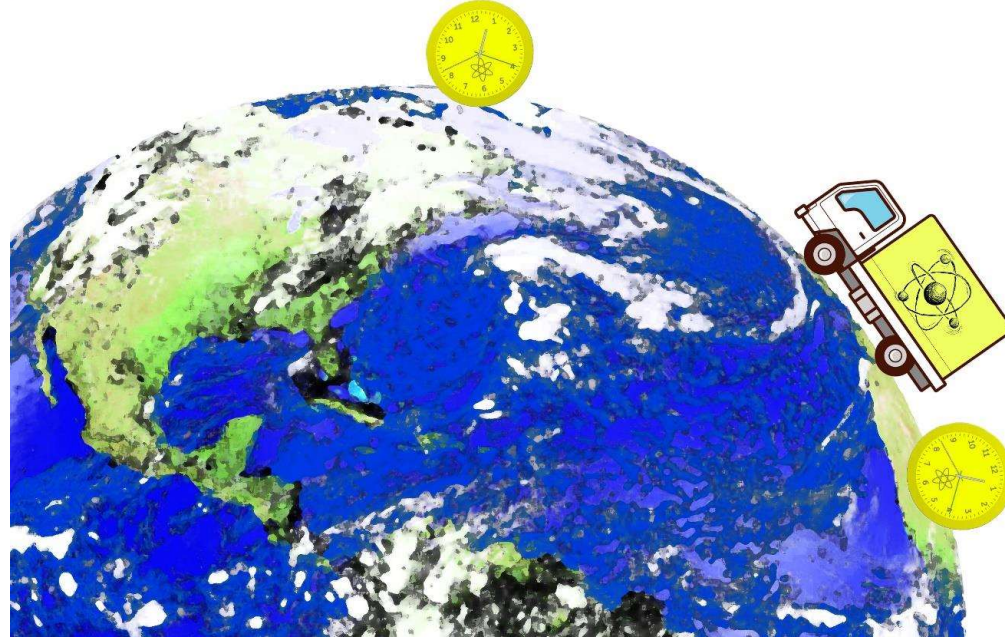
Zaman standartının yıllara göre gelişimi (Kaynak ethw.org)

Taşınabilir saatler aracılığıyla zaman transferi

$$\Delta T_1(t_1) = T_1(t_1) - T_T(t_1)$$

$$\Delta T_2(t_2) = T_2(t_2) - T_T(t_2)$$

$$T_1(t_1) - T_2(t_2) = \Delta T_1(t_1) - \Delta T_2(t_2) - \{T_T(t_1) - T_T(t_2)\}$$

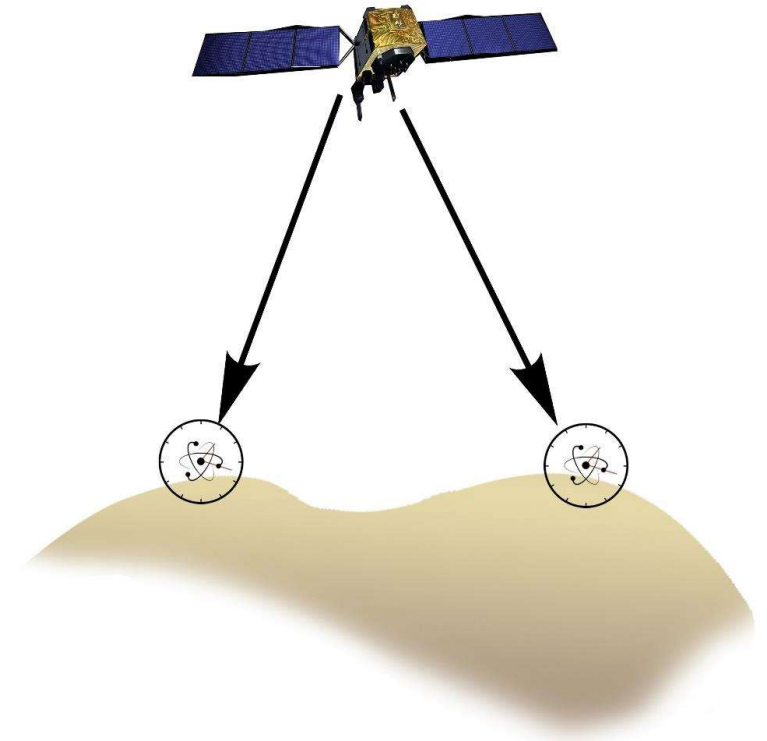


GNSS Ortak Görüş yöntemi ile zaman transferi

$$\Delta T_1(t) = T_1(t) - T_{GNSS}(t)$$

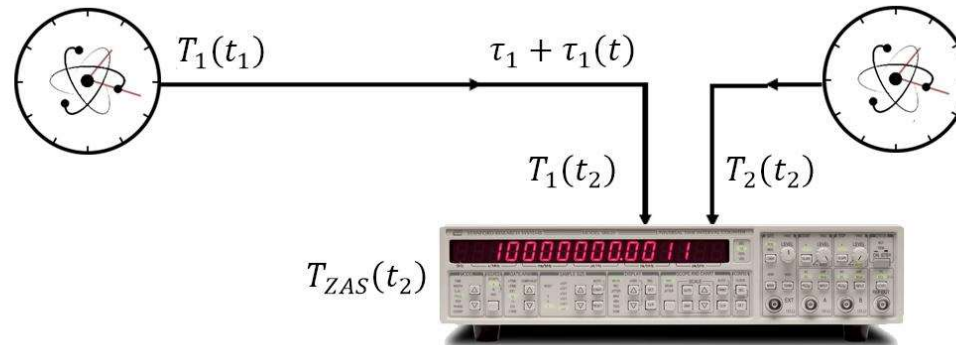
$$\Delta T_2(t) = T_2(t) - T_{GNSS}(t)$$

$$T_1(t) - T_2(t) = \Delta T_1(t) - \Delta T_2(t)$$



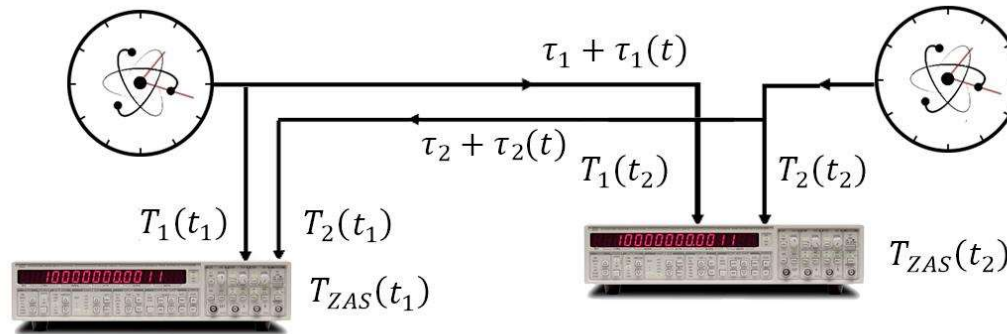
Tek yönlü zaman transferi

$$T_{ZAS}(t_2) = T_2(t_2) - T_1(t_2) = T_2(t_2) - (T_1(t_1) + \tau_1 + \tau_1(t))$$



Çift yönlü zaman transferi

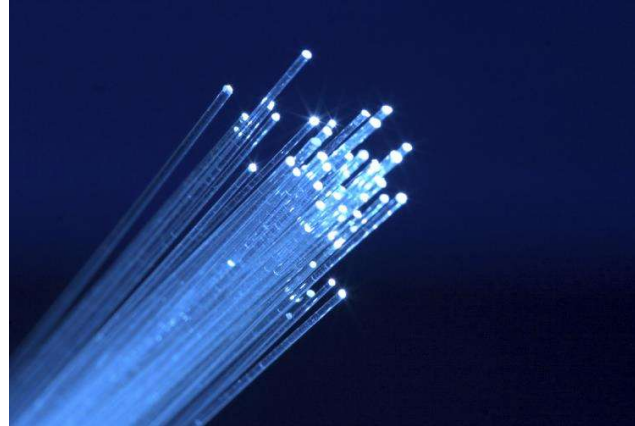
$$T_1(t_1) - T_2(t_2) = \frac{T_{ZAS}(t_1) - T_{ZAS}(t_2) - (\tau_1 - \tau_2) - (\tau_1(t) - \tau_2(t))}{2}$$



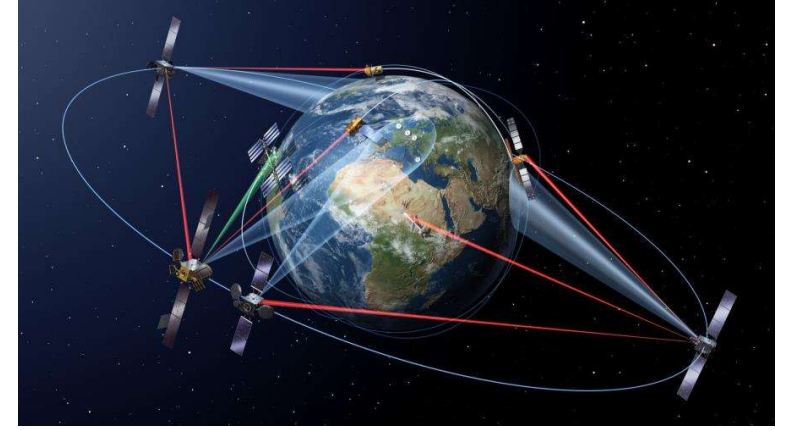
Zaman Transfer Altyapıları



PTB'deki taşınabilir saat sistemi
Fotoğraf: Lisdat/PTB



Görsel: huwmerriman.org.uk



Görsel: esa.int

Yerçekimsel Kızılakayma Testleri

1976 – Gravity Probe A

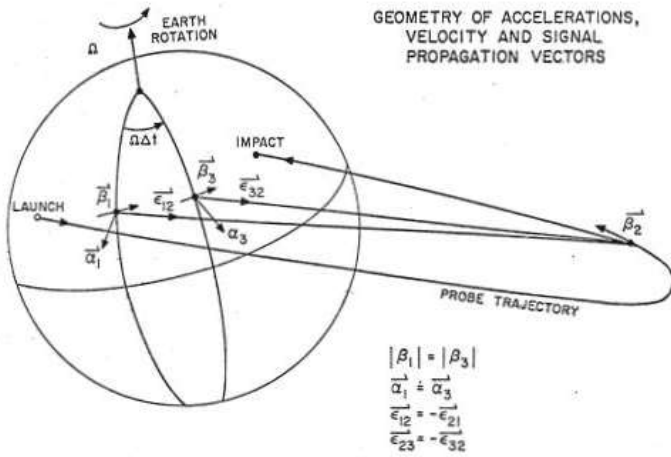


Figure 6

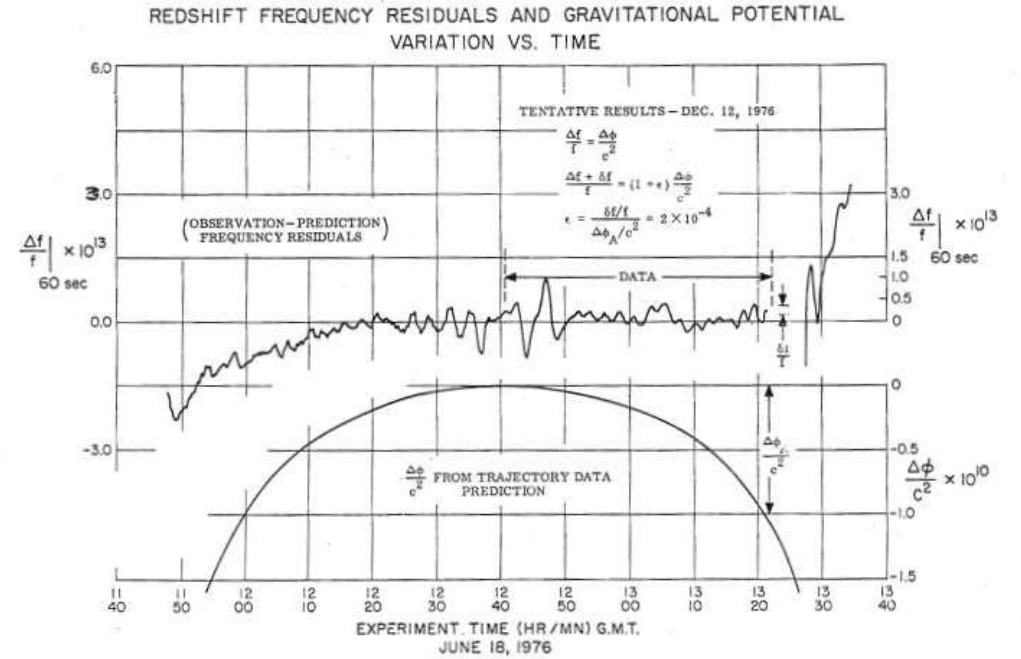
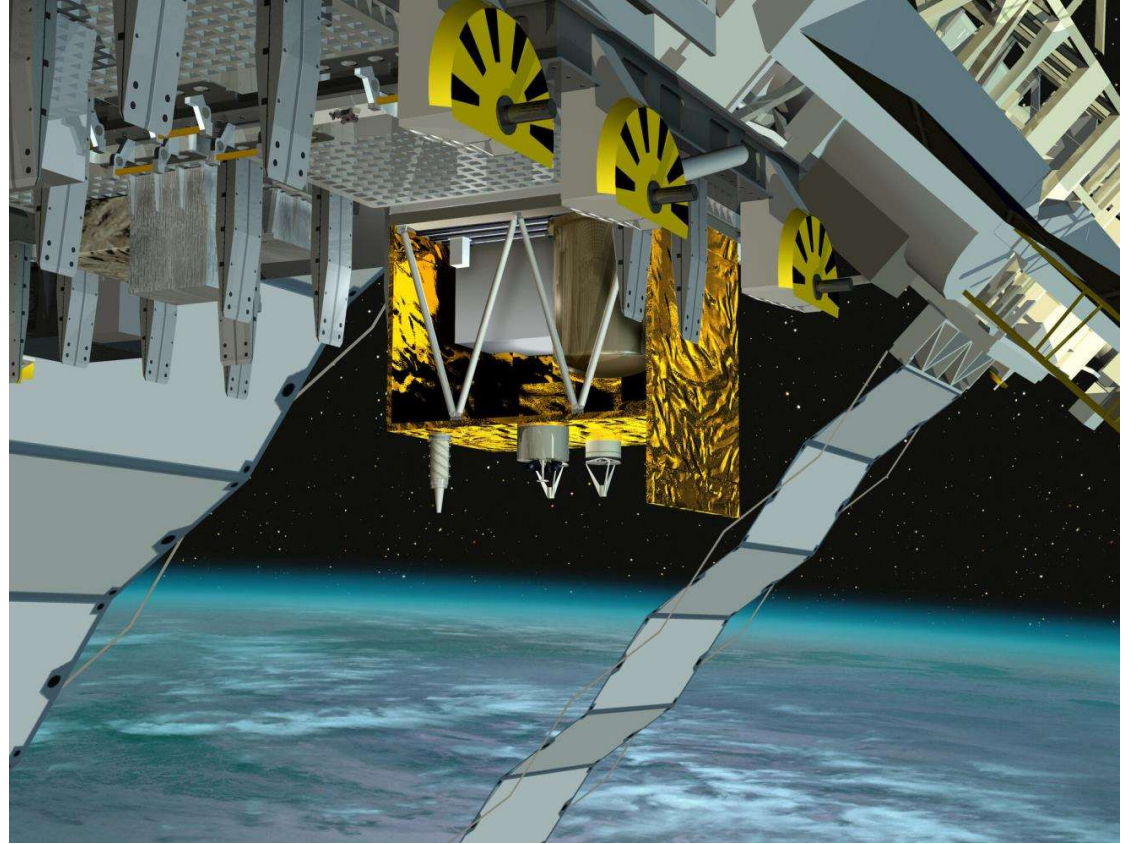


Figure 20

Vessot, R. F. C., & Levine, M. W. (1979).

Yerçekimsel Kızılakayma Testleri

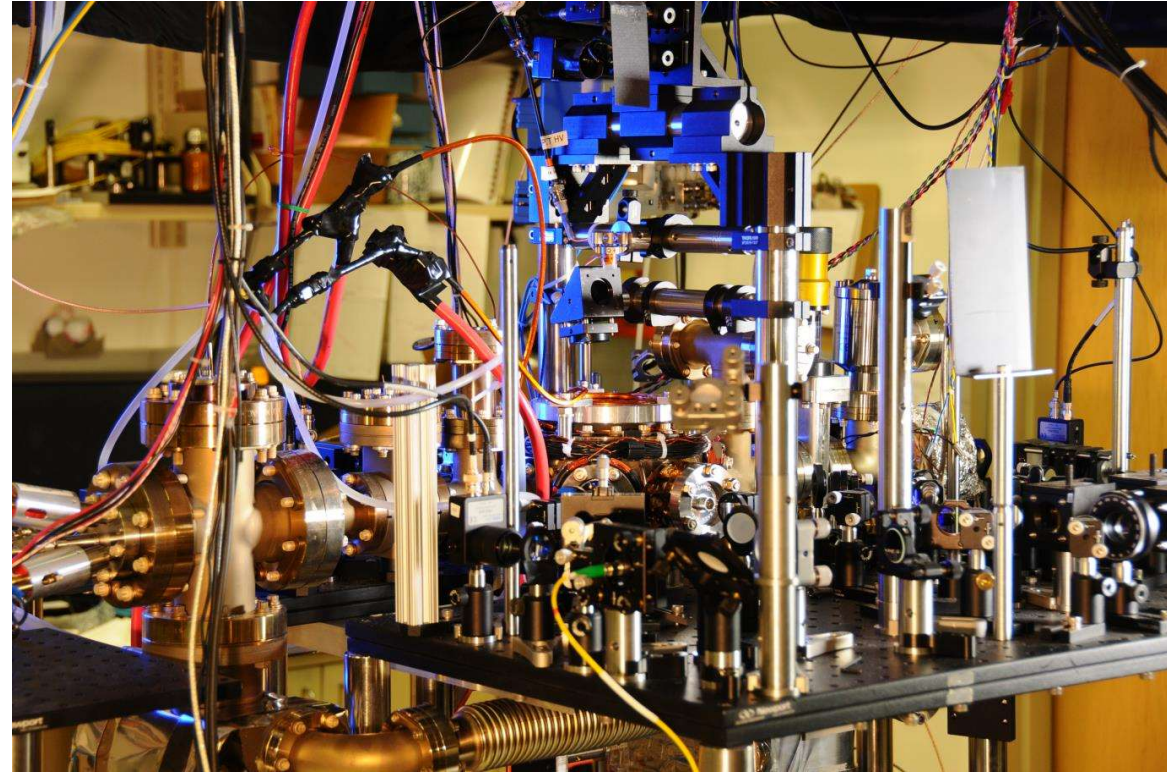
- 1990lar ACES (Atomic Clock Ensemble in Space)
- 2008
- 2021'de fırlatılacak



Görsel: esa.int/

10^{-18} kararlılığına ulaşan atom saatleri

- 2013
- ultra soğuk atomik iterbiyum kullanan iki optik kafes saati
- 7 saatlik ortalama sonra $1,6 \times 10^{-18}$ kararlılık



Görsel: nist.gov/

Zaman referans sistemleri ve atom saati ağı



-2012

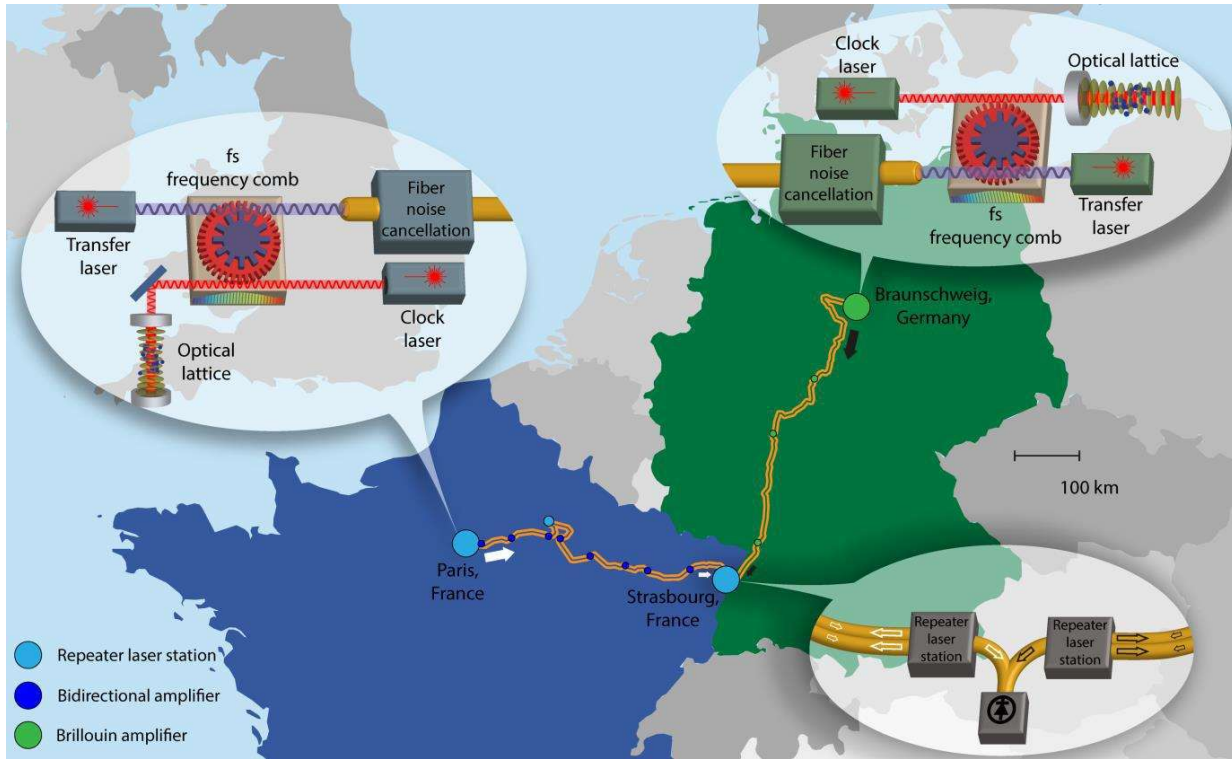
-920 km optik-fiber haatı

-1 saniyede 10^{-14} kesirli frekans farkı belirsizliği

-1000 saniyede 10^{-18} kesirli frekans farkı belirsizliği

Predehl, K. Ve diğ. (2012).

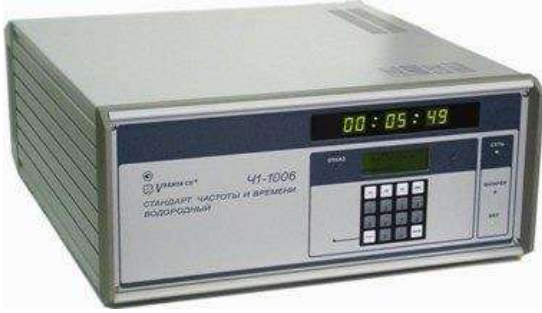
Zaman referans sistemleri ve atom saati ağı



- 2015
- 1415 km optik-fiber hattı
- 1000 sn 'de 10^{-17} 'lik frekans fark karşılaştırması

Lisdat, C ve diğ. (2016).

Zaman referans sistemleri ve atom saati ağıları



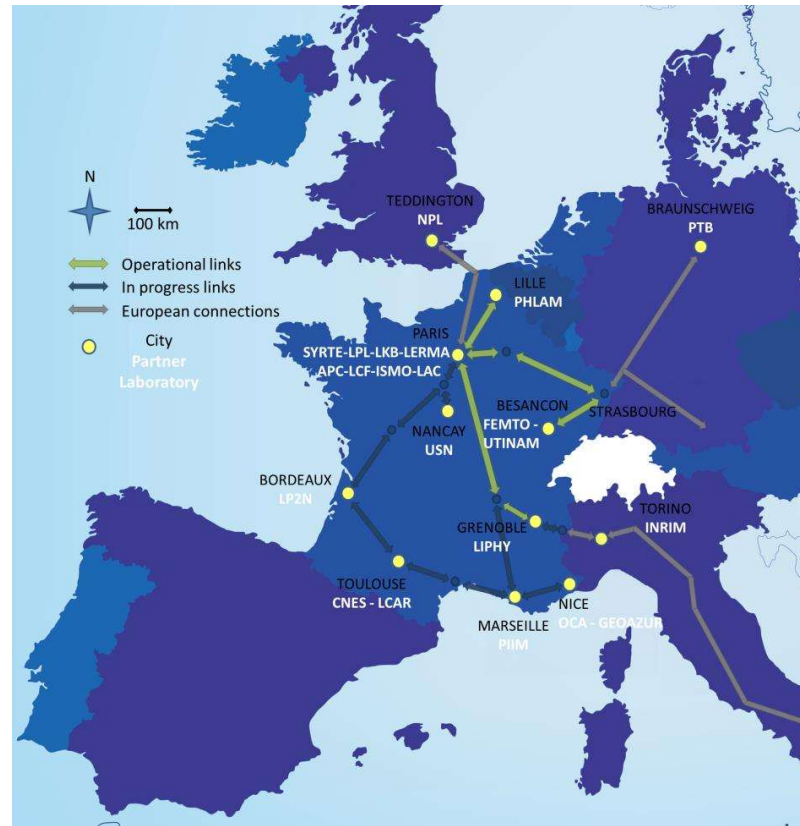
Görsel: metrol.expoprom.ru

-Altay Dağları: iki jeodezik istasyon Shebalino ve Sieminski Geçidi arasında gerçekleştirildi.

$$(\delta f/f_0)_{\text{grav}} = 7.980 \times 10^{-14}$$

Kopeikin, S. M., Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Tolstikov, A. S., Gienko, E. G., Goldobin, D. N., ... & Hanikova, E. A. (2016).

REFIMEVE+



Görsel: refimeve.fr

Küresel Bir Yükseklik Sistemine Doğru

- Yükseklik Referans Sistemi: dünya ile birlikte dönen bir eşpotansiyel yüzey kümesi
- Yükseklik Referans Çerçevesi: jeopotansiyel sayıları belirlenen istasyonlar ile birlikte yer merkezli Kartezyen koordinatlar (İhde ve diğ., 2017).

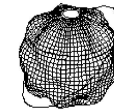
İAG'ın önemli bir amacı: yeryüzü şekline ilişkin parametrelerin belirlenerek jeodezik referans çerçevesinin uygulanması

Küresel yükseklik sistemlerinin birleştirilmesi

Uluslararası Gravite Servisi (International Gravimetric Bureau – BGI)



International Service for the Geoid (ISG)-Uluslararası Geoid Servisi

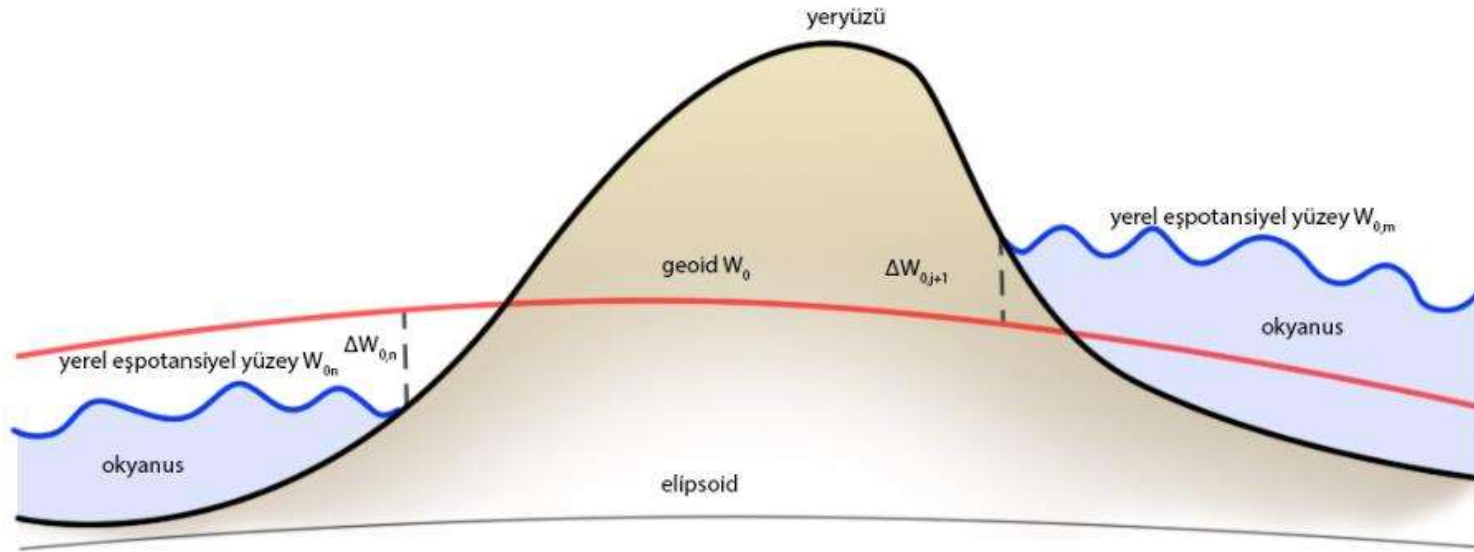


International Gravity Field Service



Küresel Bir Yükseklik Sistemine Doğru

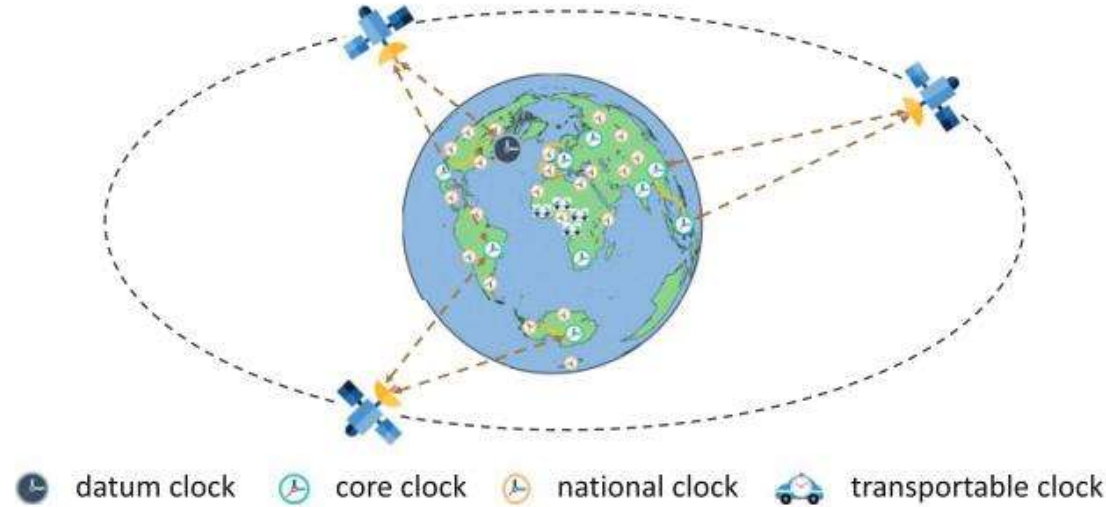
- küresel global jeopotansiyel modeller, günümüzde uygulamanın ihtiyaç duyduğu santimetre ve daha yüksek doğruluklardaki veriyi tek başına sağlayamamaktadır.
- Günümüzde Dünya'nın herhangi bir noktasında ± 15 cm doğruluğa sahip geoit yüksekliklerinin elde edilebildiği EGM08 modeli geliştirilmiştir (Pavlis ve diğ., 2012).



Görselleştirme: Z. Ertuğrul Işık

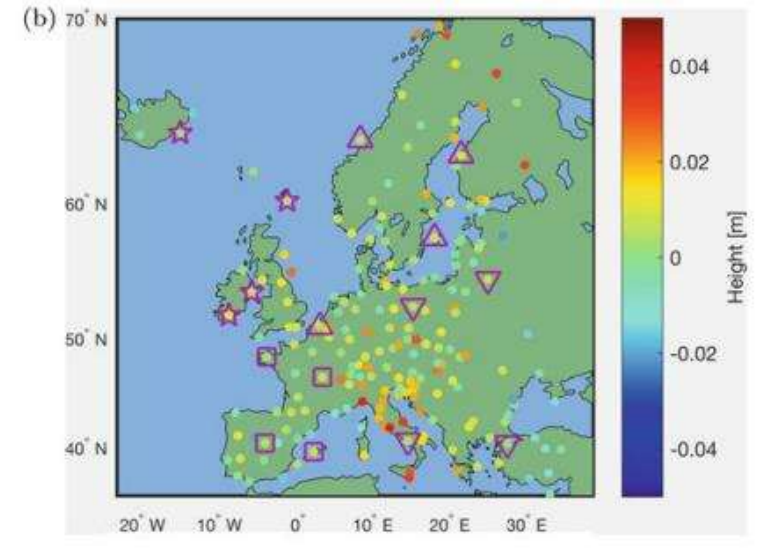
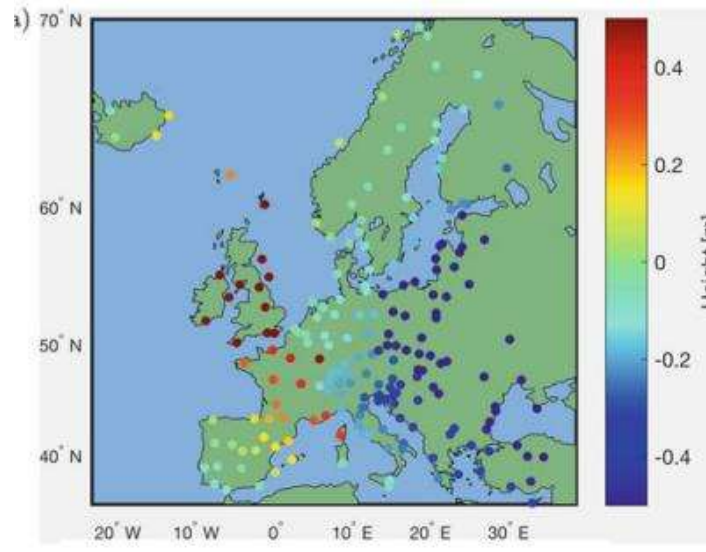
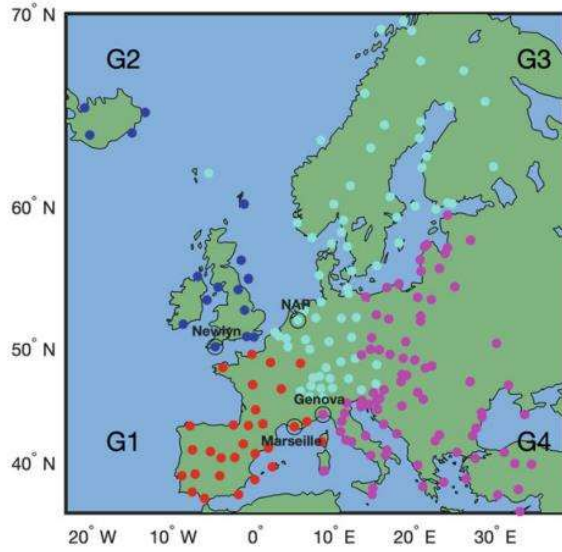
Küresel Bir Yükseklik Sistemine Doğru

- Datum saati
- Çekirdek saatler
- Bölgesel Ulusal Saatler
- Taşınabilir Saatler
- İkame uydular



Görsel: Wu, H., & Müller, J. (2020).

Küresel Bir Yükseklik Sistemine Doğru



Görsel: Wu, H., & Müller, J. (2020).

Sonuç ve Öneriler

Yöntemin güncel sorunları

- gelişmekte olan ve çok disiplinli bir konu olduğu için yetişmiş personelin bulunmaması
- yüksek maliyetli ölçme aletleri kullanılması
- yüksek hassasiyette ölçme süreçleri gerektirmesi
- taşınması kolay ölçme aletleri olmaması

Sonuç ve Öneriler



Görsel: ume.tubitak.gov.tr

TEŞEKKÜRLER

26.11.2021

Kaynaklar

- Abreu, R. ve Guerra, V.** (2008). The principle of relativity and the indeterminacy of special relativity, *European Journal of Physics*, Vol. 29, 33-52.
- Allan, D.W. ve Weiss, M.A.** (1980). Accurate Time and Accuracy Transfer During Common-View of a GPS Satellite, *Proc. 34th Ann. Freq. Control Symposium*, USAERADCOM, Ft. Monmouth, NJ.
- Anderson, J. D., Schubert, G., Trimble, V. ve Feldman, M.R.** (2015). Measurements of Newton's gravitational constant and the length of day, *Europhysics Letters* 110, 10002.
- Ashby, N. ve Allan, D.W.** (1979). Practical implications of relativity for a global coordinate time scale, *Radio Science*, Vol. 14, No. 4, 649-669.
- Ashtekar, A.** (2006). Space and time: From antiquity to Einstein and beyond. *Resonance* 11 (9): 4-19.
- Ayan, T.** (1976). 1976 Türkiye Geoidi. *Harita Dergisi*.
- Ayan, T.** (2006). İstanbul GPS Nirengi Ağı 2005-2006 Yenileme Ölçü ve Değerlendirmesi (İGNA 2005), *Teknik Rapor*, Cilt 1. İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Jeodezi Anabilim Dalı.
- Ayan, T. ve Deniz, R.** (2000). Fiziksel Jeodezi Ders Notu. İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi Anabilim Dalı.
- Ayhan M.E., Demir C., Lenk O., Kılıçoğlu A., Aktuğ B., Açıkgöz M., Fırat O., Şengün Y. S., Cingöz A., Gürdal M. A., Kurt A. İ., Ocak M., Türkezer M., Türkezer A., Yıldız H., Bayazıt N., Ata M., Çağlar Y. ve Özerkan A.** (2002). Türkiye Ulusal Temel GPS Ağı-1999A (TUTGA-99A), *Harita Dergisi*, Özel Sayı:16, Mayıs 2002, Ankara.
- Balazs, E.I. ve Young, G.M.** (1982), Corrections applied by the National Geodetic Survey to precise leveling observations: NOAA Technical Memorandum NOS NGS 34. Rockville: United States Department of Commerce.
- Baeschlin, C.F.** (1960). Das Geopotential, metrische Höhen und Gebrauchshöhen, *Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Kulturtechnik und Photogrammetrie* 58 (6).
- Bauch, A.** (2012). Time – the SI Base Unit “Second”, *Special Issue / PTB-Mitteilungen* 122, No. 1.
- Bičák, J.** (2000), Selected solutions of Einstein's field equations: Their role in general relativity and astrophysics. In: Schmidt, B. (ed.) *Einstein's Field Equations and Their Physical Implications: Selected Essays in Honour of Jürgen Ehlers*. Lecture Notes in Physics, vol. 540, pp. 1-125. Springer, Berlin; New York.
- Bjerhammar, A.** (1986), Relativistic geodesy. NOAA Technical Report.
- Carroll, S.** (2014). *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Chou, C.W., Hume, D.B., Koelemeij, J.C.J., Wineland, D.J. ve Rosenband, T.** (2010). Frequency comparison of two high-accuracy Al⁺ optical clocks, *Phys. Rev. Lett.* 104, 070802.
- de Abreu, R. ve Guerra, V.** (2007). The principle of relativity and the indeterminacy of special relativity. *Eur. J. Phys.* 29, 37.
- Daniel J. Martin**, *Vertical Datums and Heights*, October 06, 2008, National Geodetic Survey VT Geodetic Advisor VTrans Monthly Survey Meeting. PowerPoint Presentation.
- Delva, P. ve Lodewyck, J.** (2013). Atomic clocks: new prospects in metrology and geodesy. *Acta Futura*, Issue 7, p 67-78 7:67-78, 1308.6766.
- Delva, P. ve Geršl, J.** (2017). Theoretical Tools for Relativistic Gravimetry, Gradiometry and Chronometric Geodesy and Application to a Parameterized Post-Newtonian Metric. *Universe*, 3, 24, doi:10.3390/universe3010024.
- Demir C. ve Cingöz A.** (2002). Türkiye Ulusal Düşey Kontrol (Nivelman) Ağı-1999 (TUDKA-99), TUJK 2002 yılı Bilimsel Toplantısı, Tektonik ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı, 10-12 Ekim 2002, İzmir.
- Denker, H., Timmen, L., Voigt, C., Weyers, S., Peik, E., Margolis, H.S., Delva, P., Wolf, P. ve Petit, G.** (2017). Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10⁻¹⁸ in the context of international timescales – a review and practical results. Paper submitted to *Journal of Geodesy*.
- Direnc, A., Simav, M., Türkezer, A., Kurt, A. İ., ve Kurt, M.** (2012). Türkiye'de Jeoit Belirleme Çalışmaları. Türkiye Ulusal Yükseklik Sisteminin Modernizasyonu Çalıştayı, Zonguldak.
- Drinkwater, M.R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D. ve Popescu, A.** (2003). GOCE: ESA's first Earth Explorer Core Mission, *Space Science Reviews*, 00, 1-14.
- Ebenhag, S.C.** (2013). Frequency transfer techniques and applications in fiber optic communication systems. Ph. D. dissertation., Dept. Microtech. Nanosci., Chalmers Univ. Tech., Gothenburg, İsveç.
- Einstein, A.** (1922). *The Meaning of Relativity*. Princeton University Press.
- Engelis, T., Rapp, R.H. ve Tscherning, C.C.** (1984) The precise computation of geoid undulation differences with comparison to results obtained from the global positioning system. *Geophysical Research Letters*, 1(9): 821-824.

Kaynaklar

- Fasano, R.J., Nicolodi, D., Beloy, K., Yao, J., Sherman, J.A., Schäffer, S.A., Savory, J., Brown R.C., Römisch, S., Oates, C.W., Parker, T.E., Fortier, T.M. ve Ludlow, A.D. (2019). Towards the optical second: verifying optical clocks at the SI limit, *Optica*, vol. 6, pp. 448–454.
- Flury, J. ve Rummel, R. (2006). Future satellite gravimetry and Earth dynamics. In: Flury J, Rummel R (eds) *Earth, Moon, and Planets*, vol 94. Nr. 1, Springer, ISBN (Print) 978-0387-29796-5. doi: 10.1007/0-387-33185-9.
- Forsberg, R. (1990). *A New High-Resolution Geoid of The Nordic Area*. Springer-Verlag, (s. 241-250). Milan.
- Fraassen, B.V. (2013). An introduction to the philosophy of time and space. PDF edition. <https://www.princeton.edu/~fraassen/BvF%20-%201PTS.pdf>.
- Gozzard, D.R., Schediwy, S.W., Stone, B., Messineo M. ve Tobar M. (2018). Stabilized free-space optical frequency transfer, *Phys. Rev. Applied*, Vol. 10, No.2, 024046 arXiv:1806.00945.
- Gwaleba, M.J. (2018). Comparison of Global Geoid Models Against the GPS/Levelling-Derived Geoid Heights in Tanzania, *Journal of Geomatics*, Vol. 12, No.2.
- Hachisu, H., Fujieda M., Nagano S., Gotoh T., Nogami A., Ido T., Falke St., Huntemann N., Grebing C., Lipphardt B., Lisdat Ch. ve Piester D. (2014). Direct comparison of optical lattice clocks with an intercontinental baseline of 9000km, *Opt. Lett.* 39(14) 4072–4075, <https://doi.org/10.1364/OL.39.004072>.
- Halicioğlu, K. (2015). Sayısal Zenit Kamera Sistemi ile Astro-Jeodezik Çekül Sapmalarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hedekvist, P. ve Ebenhag, S.C. (2012). Time and frequency transfer in optical fibers, Chapter 17 in *Recent Progress in Optical Fiber Research*, InTech.
- Hinkley, N., Sherman, J.A., Phillips, N.B., Schioppo, M., Lemke, N.D., Beloy, K., Pizzocaro, M., Oates, C.W. ve Ludlow, A.D. (2013). An Atomic Clock with 10^{-18} Instability. *Science*. doi:10.1126/science.1240420
- Hofmann-Wellenhof, B. ve Moritz, H. (2006). Gravity reduction. In: *Physical Geodesy*. Springer, Vienna.
- Ihde, J., Sánchez, L., Barzaghi, R., Drewes, H., Foerste, C., Gruber, T. ve Sideris, M. (2017). Definition and proposed realization of the international height reference system (IHRs).
- IAG (2016). Description of the global geodetic reference frame; position paper adopted by the IAG Executive Committee, April, 2016. http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/GGRF_description_by_the_IAG_V2.pdf
- Johannessen, J. A., Balmino, G., Le Provost, C., Rummel, R., Sabadini, R., Sunkel, H., ... & Drinkwater, M. (2003). The European gravity field and steady-state ocean circulation explorer satellite mission its impact on geophysics. *Surveys in Geophysics*, 24(4), 339-386.
- Karlık S.E., Yılmaz G. ve Geren K., (2002). “Optik fiberlerdeki polarizasyon mod dispersiyonunun sabit çözümleyici ve Jones matrisi yöntemleriyle ölçülmesi”, ELECO’2002 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, c. 2, s. 275-279
- Kopeikin, S. M., Kanushin, V. F., Karpik, A. P., Tolstikov, A. S., Gienko, E. G., Goldobin, D. N., ... & Hanikova, E. A. (2016). Chronometric measurement of orthometric height differences by means of atomic clocks. *Gravitation and Cosmology*, 22(3), 234-244.
- Leopardi, H., Davila-Rodriguez, J., Quinlan, F., Olson, J., Sherman, J.A., Diddams, S.A. ve Fortier, T.M. (2017). Single-branch Er:fiber frequency comb for precision optical metrology with 10^{-18} fractional instability, *Optica* 4(8), 879–885.
- Lisdat, C., Grosche, G., Quintin, N., Shi, C., Raupach, S.M., Grebing, C., Nicolodi, D., Stefani, F., Al-Masoudi, A., Dörscher, S., Häfner, S., Robyr, J.L., Chiodo, N., Bilicki, S., Bookjans, E., Koczwara, A., Koke, S., Kuhl, A., Wiotte, F., Meynadier, F., Camisard, E., Abgrall, M., Lours, M., Legero, T., Schnatz, H., Sterr, U., Denker, H., Chardonnet, C., Le Coq, Y., Santarelli, G., Amy-Klein, A., Le Targat, R., Lodewyck, J., Lopez, O. ve Pottie, P.E. (2016). A clock network for geodesy and fundamental science, *Nature Commun.*, Vol. 7, p. 12443.
- Mai, E., (2013). *Time, Atomic Clocks, and Relativistic Geodesy*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe A, Theoretische Geodäsie, Heft Nr. 124, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München
- McCarthy, D.D. ve Seidelmann, P.K. (2009). “TIME from Earth Rotation to Atomic Physics”, Wiley-VCH, Weinheim, doi:10.1002/9783527627943.
- McCarthy, J. (2014). Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. *Journal of Archaeological Science*, 43, 175-185. McGrew, W.F., Zhang, X., Leopardi, H., Mehlstäubler, T., Grosche, G., Lisdat, C., Schmidt, P. ve Denker, H. (2018). Atomic Clocks for Geodesy. *Reports on Progress in Physics*. 81. 10.1088/1361-6633/aab409.
- Michelson, A.A., and Morley, E.W. (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether, *Am. J. Sci.*, 34, 333–345.

Kaynaklar

- Michito, I.** (2003). Basic Measurement Techniques on Time and Frequency Transfer. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. Vol.50 Nos.1/2. pp 105-112.
- Moon, P. ve Spencer, D.E.** (1986). Theory of Holors. A Generalization of Tensors. Cambridge etc., Cambridge University Press.
- Müller, J., Dirkx, D., Kopeikin, S.M., Lion, G., Panet, I., Petit, G. ve Visser, P.N.** (2018). High Performance Clocks and Gravity Field Determination. Space Sci. Rev., 214, 1–31.
- NASA-JPL** (2019). GRACE D-103133 Gravity Recovery and Climate Experiment Level-3 Data Product User Handbook; NASA-JPL: Pasadena, CA, USA.
- Papadopoulos, N., Paraskevas, M., Ioannis, K. ve Georgios, N.** (2019). Calculating a geoid model for Greece using gravity and GPS observations, 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring, 15-17 May 2019, Athens, Greece.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C. ve Factor, J.K.** (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012) Volume 117, Issue B4, April.
- Peprah, M.S., Yevenyo Ziggah, Y., ve Yakubu, I.** (2017). Performance Evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) – A Case Study, South African Journal of Geomatics, Vol. 6, No 1.
- Pe'er, A.** (2014), Schwarzschild Solution and Black holes. <http://www.physics.ucc.ie/apeer/PY4112/Sch.pdf>
- Peidou, A. ve Pagiatakis, S.** (2019). Gravity Gradiometry With GRACE Space Missions: New Opportunities for the Geosciences. Journal of Geophysical Research Solid Earth. 124(8):9130-9147. doi:10.1029/2018JB016382.
- Petit, G. ve Wolf, P.** (2005). Relativistic theory for time comparisons: a review, Metrologia 42, S138-S144.
- Predehl, K., Grosche, G., Raupach, S.M.F., Droste, S., Terra, O., Alnis, J., Legero, T., Hansch, T.W., Udem, T., Holzwarth, R. ve Schnatz, H.** (2012). A 920-kilometer optical fiber link for frequency metrology at the 19th decimal place, Science, Vol. 336, No. 6080, pp. 441–444.
- Rindler, W.** (2006). Relativity: Special, General, and Cosmological. <http://dx.doi.org/10.1119/1.1622355>
- Rosi, G., Sorrentino, F., Cacciapuoti, L., Prevedelli, M. ve Tino, G.M.** (2014) Precision measurement of the Newtonian gravitational constant using cold atoms. Nature 510, 518.
- Ryder, L.** (2009). Introduction to General Relativity. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511809033.
- Salih, M. H., Baharudin, M. F. B., & Ismail, S. N.** (2006). DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FPGA-BASED VISIBLE LIGHT COMMUNICATION.
- Sasso D.** (2007). Relativistic Effects of the Theory of Reference Frames, Physics Essays, Vol.20, No.1
- Soffel, M., Klioner, S.A., Petit, G., Wolf, P., Kopeikin, S.M., Bretagnon, P., Brumberg, V.A., Capitaine, N., Damour, T., Fukushima, T., Guinot, B., Huang, T.Y., Lindegren, L., Ma, C., Nordtvedt, K., Ries, J.C., Seidelmann, P.K., Vokrouhlický, D.C., Will, M. ve Xu, C.** (2003). The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the Relativistic Framework: Explanatory Supplement. The Astronomical Journal, 126: 2687–2706.
- Swain, J.** (2014). Measuring Newton's Gravitational Constant With a Gravitational Oscillator. doi:10.1017/CBO9780511809033
- Tadahi, G., Akihiro, K., Yasuhisa, S. ve Michito, I.** (2003). GPS Common View. Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. Vol.50 Nos.1/2. pp 105-112
- Takano, T., Takamoto, M., Ushijima, I., Ohmae, N., Akatsuka, T., Yamaguchi, A., Kuroishi, Y., Munekane, H., Miyahara, B. ve Katori, H.** (2016). Real-time geopotentiometry with synchronously linked optical lattice clocks. Nat. Photonics 10(10), 662–666
- Torge, W. ve Müller, J.** (2012). Geodesy. De Gruyter Textbook
- Tscherning, C.C. ve Rapp, R.H.** (1974). Closed Covariance Expressions for Gravity Anomalies, Geoid Undulations and Deflections of Vertical Implied by Anomaly Degree Variance Models, OSU Rep. 208, Columbus, Ohio.
- Vaníček, P. ve Krakiwsky, E.J.** (1986). Geodesy: The Concepts, 2nd edition. North-Holland, Amsterdam.
- Vaníček, P., Castle, R. O. ve Balazs, E.I.** (1980). Geodetic leveling and its applications. Rev. Geophys. 18, 505-524.

Kaynaklar

Vessot, R. F. C., & Levine, M. W. (1979). A test of the equivalence principle using a space-borne clock. *General relativity and gravitation*, 10(3), 181-204.

Vu, D.T., Bruinsma, S. ve Bonvalot, S. (2019). A high-resolution gravimetric quasigeoid model for Vietnam. *Earth Planets and Space*, Vol. 71, No. 65.

Will, C. M. (2006). The confrontation between general relativity and experiment: a centenary perspective. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 163, 146-162.

Wu, H., & Müller, J. (2020). Towards an international height reference frame using clock networks.

Yilmaz, M., Turgut, B., Gullu, M. ve Yilmaz, I. (2016). Evaluation of Recent Global Geopotential Models by GNSS/Levelling Data: Internal Aegean Region. *International Journal of Engineering and Geosciences*.

Zrinjski, M., Barković, Đ., Baričević, S., & Alaupović, L. (2018). Accuracy analysis of geometric, trigonometric and GNSS height difference levelling. VI hrvatski kongres o katastru, 235-244.

Url-1< <https://www.iag-aig.org/doc/5c9613581cbao.pdf>>, erişim tarihi 14.11.2019.

Url-2< <https://www.iag-aig.org/doc/5d12072ade8fd.pdf>>, erişim tarihi 14.11.2019.

Url-3< <https://www.iag-aig.org/doc/5cb33a06e5f9a.pdf>>, erişim tarihi 14.11.2019.

Url-4< <https://www.bipm.org/metrology/time-frequency/units.html>>, erişim tarihi 14.11.2019.

Url-5< <http://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/laboratuvarlarimiz/zaman-frekans-ve-dalgaboyu-laboratuvarlari>>, erişim tarihi 14.11.2019.

Url-6< <http://www.ume.tubitak.gov.tr/tr/haber/tubitak-ume-turkiyenin-ilk-optik>-atomik-saatini-gelistirecek>, erişim tarihi 14.11.2019.