

A dramatic scene of an asteroid impact on Earth. A large, jagged, grey rock is shown in the process of hitting the planet's surface, creating a massive, bright yellow and orange fireball. The impact is surrounded by a thick plume of white smoke and debris. The Earth's blue atmosphere and white clouds are visible in the background, along with several smaller asteroids floating in space.

FIZYKA I

Wykład IX

## Doświadczenie Cavendisha – stała $G$

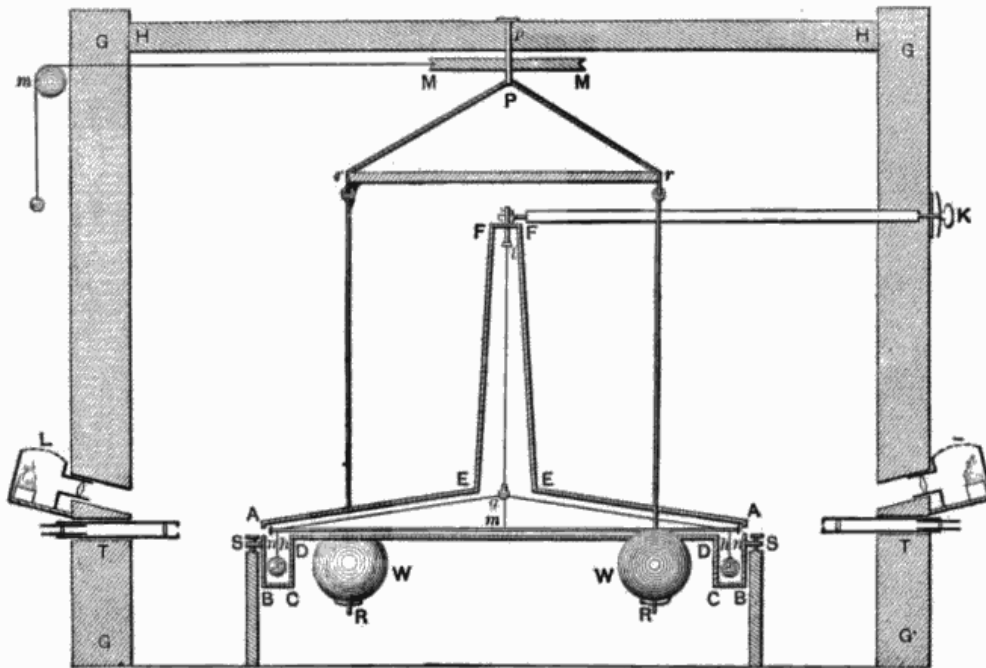
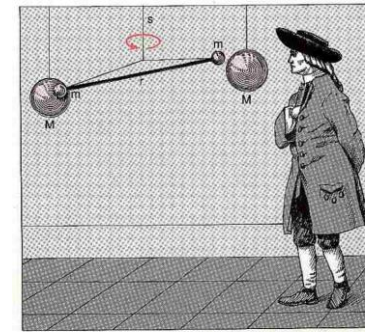


Fig. 1



Henry Cavendish with the famous torsion balance experiment that determined the gravitational constant  $G$  and demonstrated Newton's inverse-square law of gravitation. Large lead spheres placed close to small ones caused angular deflections



Henry Cavendish  
(1731-1810)

Brytyjski chemik i fizyk, członek Royal Society.

Studiował w kolegium Peterhouse na Uniwersytecie Cambridge, lecz opuścił uczelnię przed uzyskaniem dyplomu. Pochodził z arystokratycznej rodziny i odziedziczył znaczną fortunę, która umożliwiła mu prowadzenie badań. Założył własne laboratorium w Londynie. Większość jego prac nie została opublikowana za jego życia.

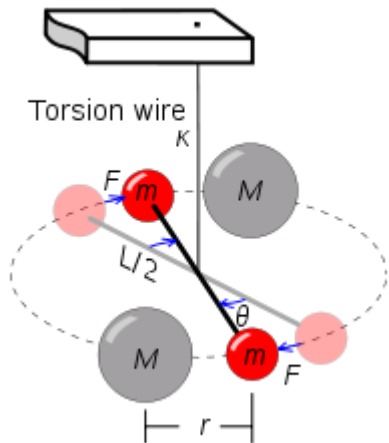
Osiągnięcia:

- wydzielenie wodoru
- wydzielenie dwutlenku węgla
- oznaczenie składu powietrza
- oznaczenie składu wody
- oznaczenie składu kwasu azotowego

Prowadził liczne prace z dziedziny elektryczności np. odkrył przed Coulombem i Ohmem prawo Coulomba i prawo Ohma, jednak swoich prac nie publikował i z tego względu pozostały przez wiele lat nieznanne. Pierwszy miarę dokładnie obliczył masę Ziemi. Użył do tego celu udoskonalonej przez siebie wagi skręceń, której twórcą był John Michell.



## Doświadczenie Cavendisha – stała G



$$\kappa\theta = 2 \cdot \frac{1}{2} \vec{L} \times \vec{F} = LF$$

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

$$\kappa\theta = LG \frac{mM}{r^2}$$

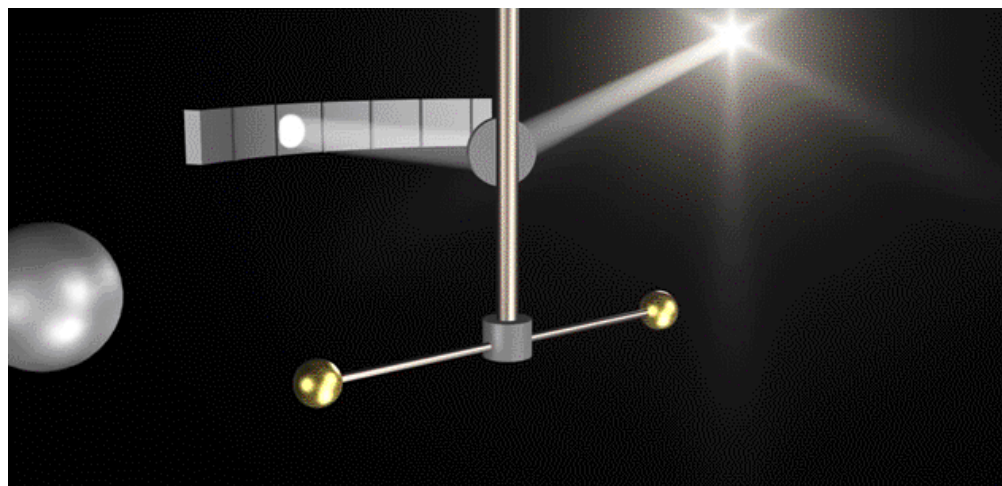
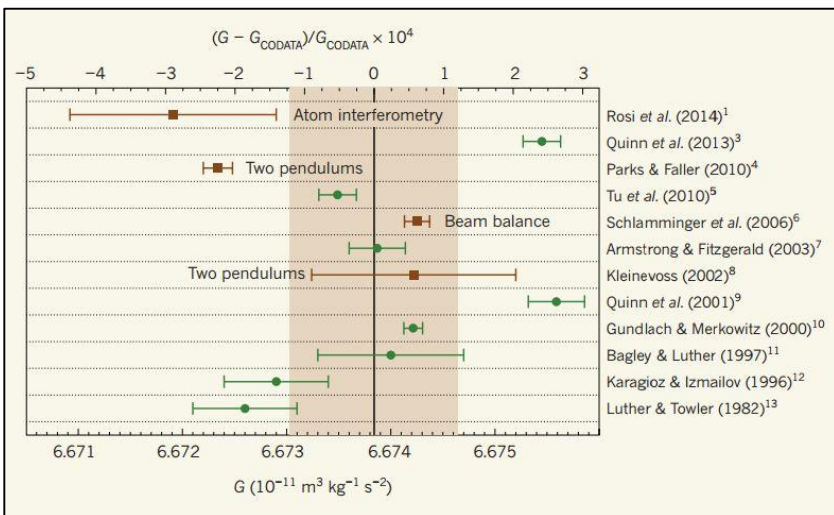
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\kappa}} = 2\pi \sqrt{\frac{mL^2}{2\kappa}}$$

$$G = \frac{2\pi^2 L r^2 \theta}{M T^2}$$

$$G = 6.74 \cdot 10^{-11} \left[ \frac{N \cdot m^2}{kg^2} \right]$$

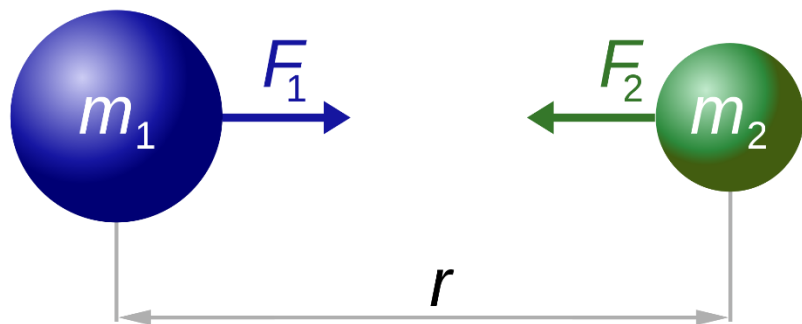
(5,45 g/cm<sup>3</sup>)

$$mg = G \frac{mM_{Ziemi}}{R_{Ziemi}^2} \Rightarrow M_{Ziemi} = \frac{g}{G} R_{Ziemi}^2 \Rightarrow \rho_{Ziemi} = \frac{g}{G} \frac{3}{4\pi R_{Ziemi}}$$



# Grawitacja

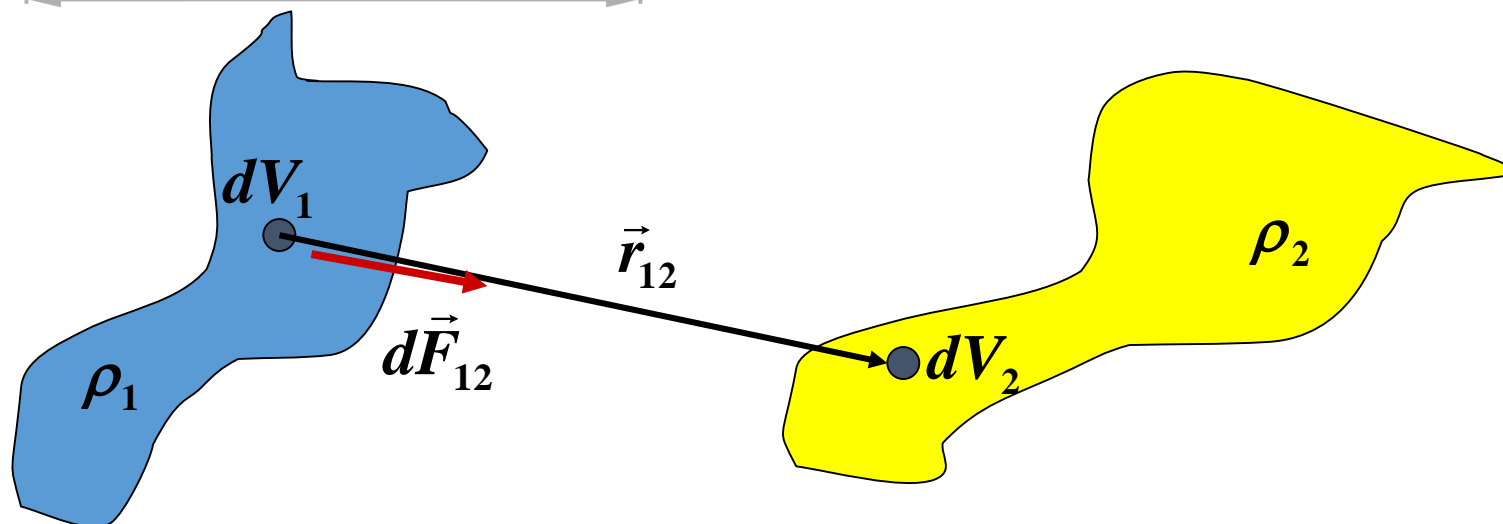
W XVII w. Izaak Newton odkrył prawo powszechnej grawitacji. Określa ono wielkość siły oddziaływania między dwoma, posiadającymi masy ( $m$  i  $M$ ) oddalonymi od siebie o  $r$ .



## Prawo powszechnego ciążenia:

Siła oddziaływania grawitacyjnego między dwoma ciałami jest wprost proporcjonalna do iloczynu tych mas i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości między nimi

$$\vec{F} = G \frac{m_2 m_1}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

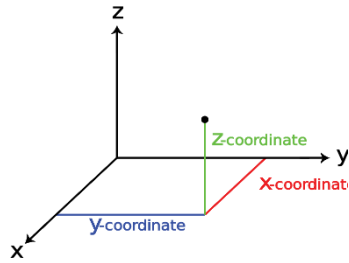


$$\overrightarrow{dF}_{12} = G \frac{\rho_1 \rho_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|} \cdot dV_1 \cdot dV_2$$

$$\vec{F}_{12} = G \int_{V_1} \rho_1 dV_1 \cdot \int_{V_2} \frac{\rho_2}{r_{12}^2} \cdot dV_2 \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{|\vec{r}_{12}|}$$

## Pojęcie gradientu

$$\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}} U = -\vec{\nabla} U$$



$$\vec{\nabla} = \left[ \hat{i} \frac{\partial}{\partial x}, \hat{j} \frac{\partial}{\partial y}, \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

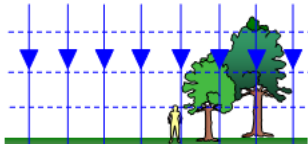
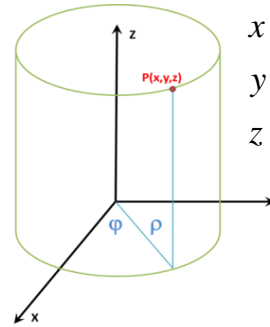
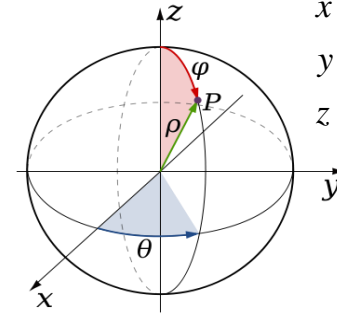


Figure 2(c)



$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi \\ y &= r \sin \varphi \\ z &= z \end{aligned}$$

$$\nabla = \left[ \hat{i} \frac{\partial}{\partial r}, \hat{j} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}, \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \right]$$



$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta \cos \varphi \\ y &= r \sin \theta \cos \varphi \\ z &= r \sin \theta \end{aligned}$$

$$\nabla = \left[ \hat{i} \frac{\partial}{\partial r}, \hat{j} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta}, \hat{k} \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \right]$$

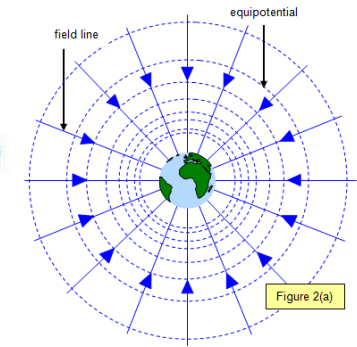
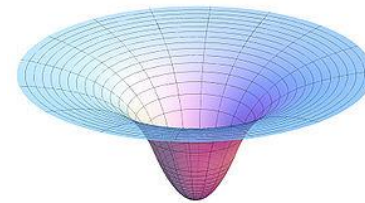


Figure 2(a)

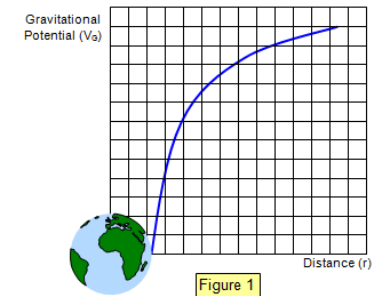
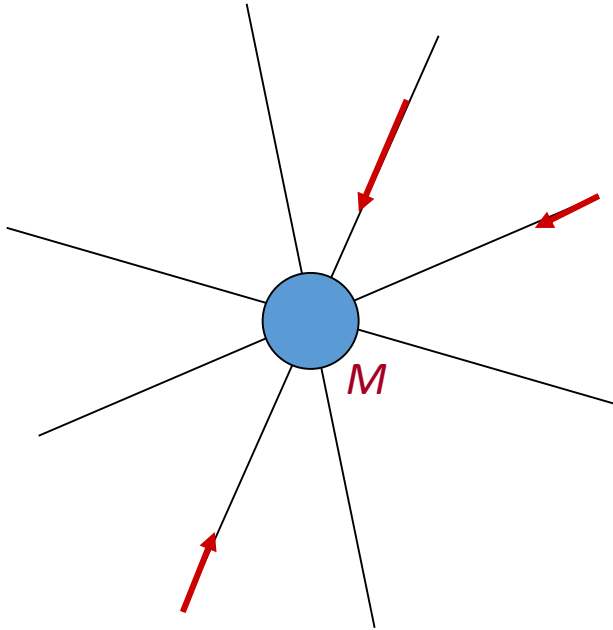


Figure 1

## Natężenie pola grawitacyjnego



$$\vec{\gamma} = \frac{\vec{F}}{m}$$

$$\vec{\gamma} = -G \frac{M}{r^2} \hat{r}$$

$$m\vec{\gamma} = \vec{F}$$

$$m\vec{g} = \vec{F}$$

$$\vec{g}(\vec{r}) = \vec{\gamma}(\vec{r})$$

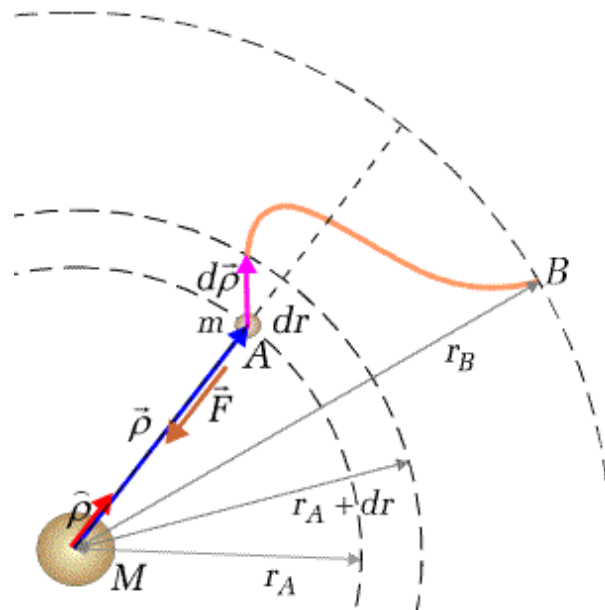
## Sily centralne

### Energia potencjalna

$$E_p(B) - E_p(A) = W(A \rightarrow B) = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

$$A \rightarrow \infty \quad W(\infty \rightarrow r)$$

$$E_p(\vec{r}) = \int_r^\infty \vec{F} \cdot d\vec{r}$$



### Prawo grawitacji (siła grawitacji) - Newton 1665

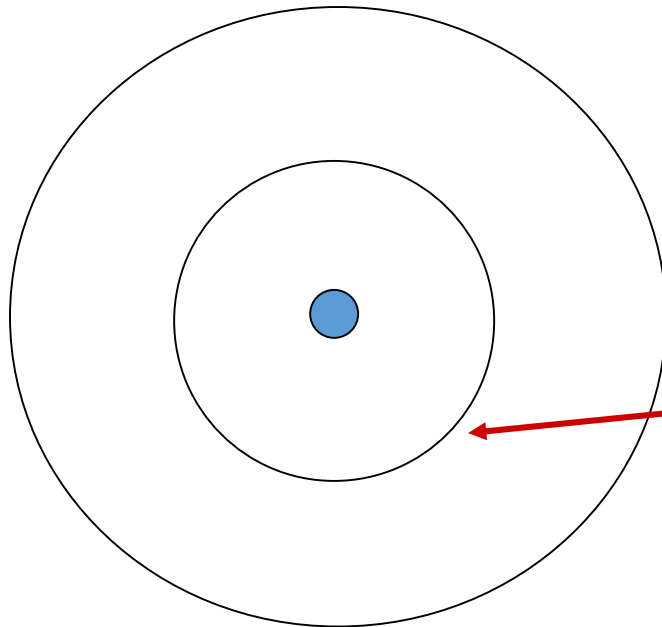
$$\vec{F} = -G \frac{M m}{r^2} \hat{r} \quad G = 6.670 \cdot 10^{-11} \left[ \frac{N \cdot m^2}{kg^2} \right] \quad \vec{F} = \frac{k}{r^2} \hat{r}, \vec{F} = \vec{\gamma} m$$

$$\Delta U = \int_r^\infty \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_r^\infty \left( -G \frac{M m}{r^2} \right) \hat{r} \cdot d\vec{r} = -G \frac{M m}{r} \rightarrow mgh \quad h \ll R_Z$$

## Potencjał pola grawitacyjnego

Potencjał - praca wykonana przez siły grawitacji przy przemieszczeniu punktu materialnego o jednostkowej masie z danego punktu pola do nieskończoności  $\equiv$  energia potencjalna masy jednostkowej.

$$V = \frac{1}{m} \cdot \int_r^{\infty} dW = \frac{1}{m} \cdot \int_r^{\infty} \vec{F} \cdot d\vec{\rho} = -G \cdot M \cdot \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = -G \cdot M \cdot \left( -\frac{1}{r} \right) \Big|_r^{\infty} = -G \cdot \frac{M}{r} = V(r)$$

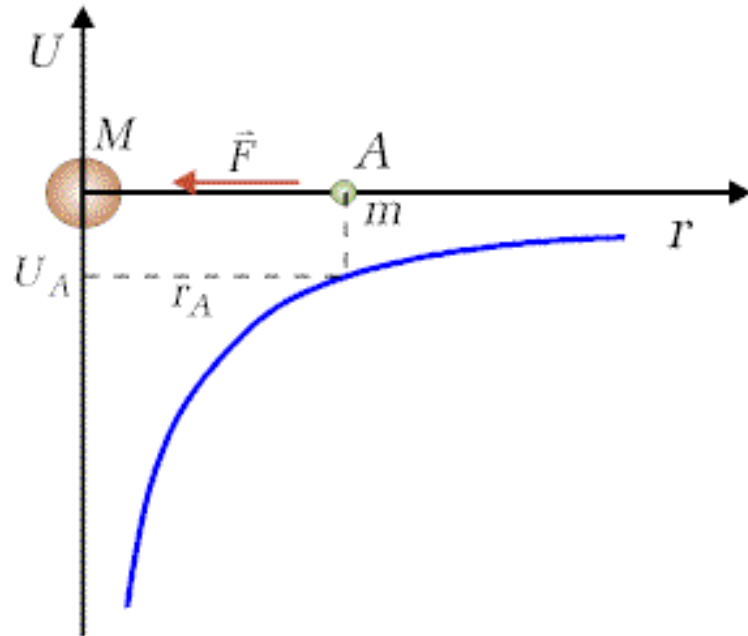


$$V(r) = -\frac{GM}{r}$$

Powierzchnie ekwipotencjalne



## Potencjał pola grawitacyjnego



$$V(r) = -\frac{GM}{r}$$

$$V(r) = \frac{1}{m} \cdot \int_r^{\infty} \vec{F} \cdot d\vec{\rho} = \int_r^{\infty} \vec{\gamma} \cdot d\vec{\rho}$$

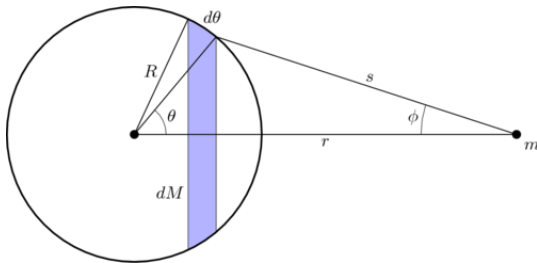
$$\int_r^{\infty} dV = V(\infty) - V(r) = -V(r)$$

Wektor natężenia pola grawitacyjnego jest prostopadły do powierzchni ekwipotencjalnej i jest skierowany od powierzchni o potencjale wyższym do powierzchni o potencjale niższym.

## Pole grawitacyjne na zewnątrz kuli (I)

Kulę możemy podzielić na nieskończenie wiele cienkich koncentrycznych powłok

Postaramy się wykazać że oddziaływanie grawitacyjne masy punktowej  $m$  z taką powłoką można zredukować do oddziaływania masy punktowej  $m$  z masą punkową leżącą w środku masy powłoki (o odpowiedniej masie).



Rozpatrzmy oddziaływanie między elementami masy powłoki a masą  $m$ :  $dF = G \frac{m \cdot dM}{s^2}$ .

Ze względu na symetrię problemu widzimy, że składowe pionowe wektora  $dF$  zniósą się i pozostanie tylko oddziaływanie w kierunku  $r$ :

$$dF_r = G \frac{m \cdot dM}{s^2} \cos \varphi$$

Całkowaną siłę otrzymamy całkując  $m$ :  $F_r = Gm \int \frac{dM}{s^2} \cos \varphi$ .

Musimy powiązać ze sobą:  $dM$ ,  $s$ ,  $r$ ,  $\varphi$  i  $\theta$ ...

Powierzchnia pasa między  $\theta$  i  $d\theta$ :  $2\pi R^2 \sin \theta d\theta$ , zaś powierzchnia całej powłoki: a jej masa  $M$ .

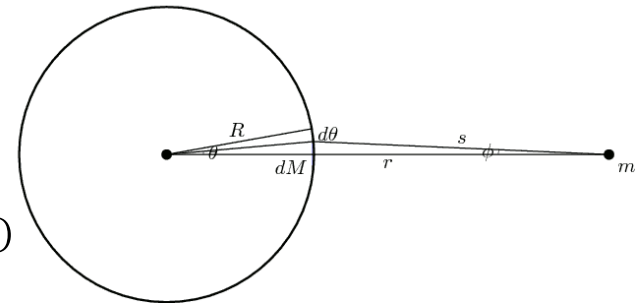
Otrzymujemy:  $dM = \frac{2\pi R^2 \sin \theta}{4\pi R^2} M d\theta$  oraz  $F_r = \frac{GMm}{2} \int \frac{\sin \theta \cos \varphi}{s^2} d\theta$ .

Z twierdzenia kosinusów:  $R^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos \varphi$  oraz  $s^2 = r^2 + R^2 - 2rR \cos \theta$

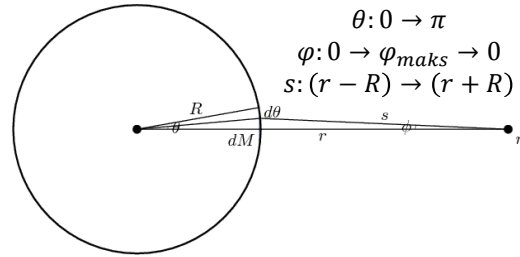
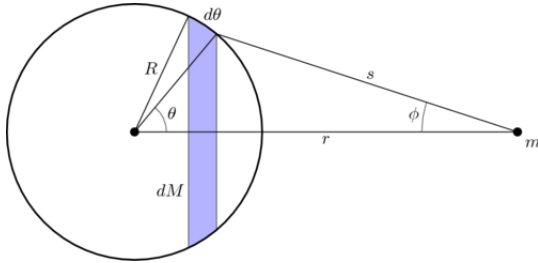
Drugie z powyższych różniczkujemy stronami:  $s ds = rR \sin \theta d\theta$

Granice całkowania:

$$\begin{aligned} \theta: & 0 \rightarrow \pi \\ \varphi: & 0 \rightarrow \varphi_{maks} \rightarrow 0 \\ s: & (r - R) \rightarrow (r + R) \end{aligned}$$



## Pole grawitacyjne na zewnątrz kuli (II)



$$F_r = Gm \int \frac{dM}{s^2} \cos\varphi = \frac{GMm}{2} \int \frac{\sin\theta \cos\varphi}{s^2} d\theta = \left| \begin{array}{l} s ds = rR \sin\theta d\theta \\ \cos\varphi = \frac{r^2 + s^2 - R^2}{2rs} \end{array} \right| = \frac{GMm}{2} \int_{r-R}^{r+R} \left( 1 + \frac{r^2 - R^2}{s^2} \right)$$

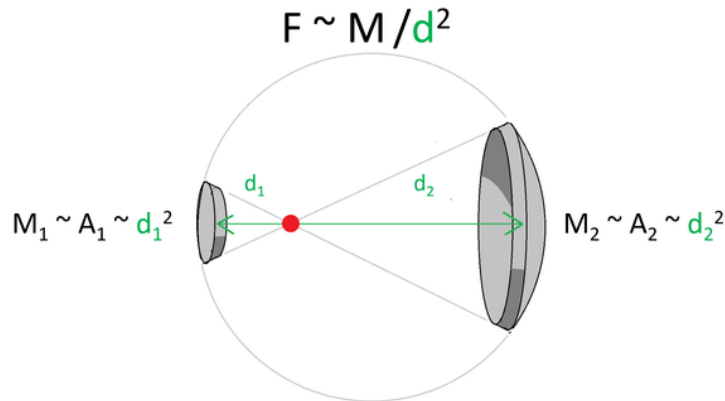
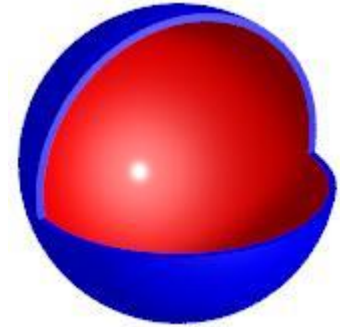
$$F_r = \frac{GMm}{2} \left( s - \frac{r^2 - R^2}{s} \right) \Big|_{r-R}^{r+R} = G \frac{mM}{r^2}$$

Powtarzając powyższe dla nieskończonej ilości powłok o promieniu od 0 do R otrzymamy, że:

**Oddziaływanie między kulą o masie  $M$  a masą punktową  $m$  odległą od niej o  $r$  można traktować jak oddziaływanie między dwoma masami punktowymi  $m$  i  $M$  odległymi o  $r$ .**

## Pole grawitacyjne wewnątrz sfery

1. Sfera ma masę  $m$  i jej grubość jest nieskończenie mała
2. Na dowolną masę punktową leżącą wewnątrz sfery działa siła proporcjonalna do masy (wielkości) powierzchni i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości masy punktovej od tej powierzchni:  $F_{1(2)} \sim \frac{A_{1(2)}}{d_{1(2)}^2}$

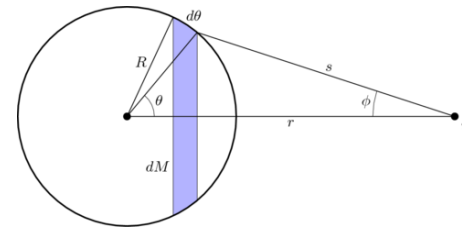
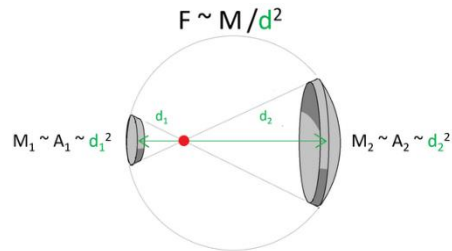


**Wewnątrz sfery siła oddziaływania grawitacyjnego jest równa zero.**

3. Z rozważań geometrycznych wynika, że:  $\frac{A_1}{A_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2}$
4. Z obu powyższych widać, że:  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1 d_2^2}{A_2 d_1^2} = 1$
5. Wynika stąd, że wkłady od  $A_1$  i  $A_2$  znoszą się. Można w ten sposób podzielić całą powierzchnię sferyczną i uzyskać siłę wypadkową równą zero. Pole wewnątrz sfery o dowolnej grubości też jest zero, ponieważ można podzielić tą sferę na szereg cienkich warstw współśrodkowych.

## Pole grawitacyjne wewnątrz kuli

1. Kula ma masę  $M$
2. Na dowolną masę punktową leżącą wewnątrz sfery działają siły pochodzące od zewnętrznej powłoki i od kuli znajdującej się między środkiem układu a aktualnym położeniem masy punktowej.



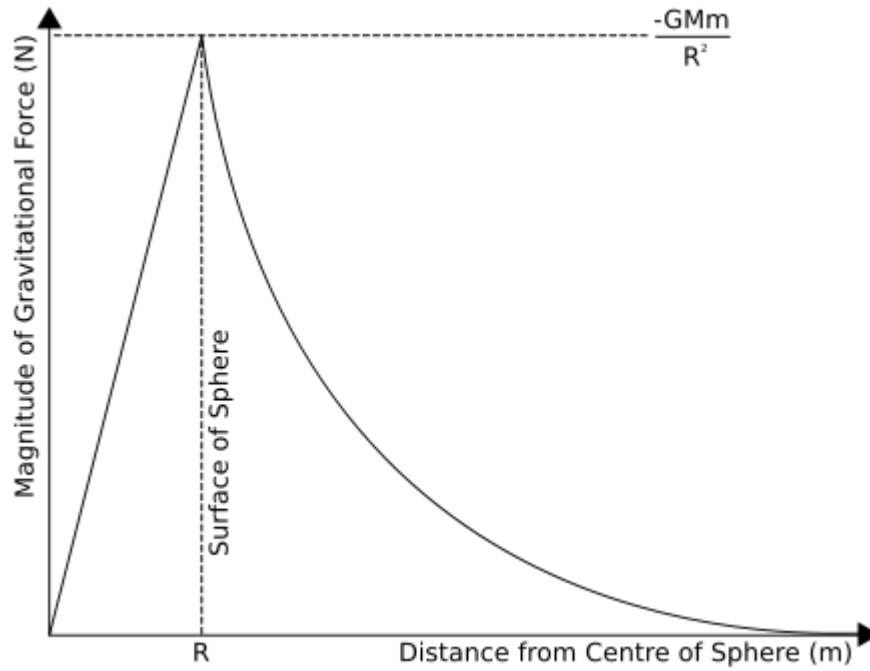
**Wewnątrz sfery siła oddziaływania grawitacyjnego jest równa zero.**

**Oddziaływanie między kulą o masie  $M$  a masą punktową  $m$  odległą od niej o  $r$  można traktować jak oddziaływanie między dwoma masami punktowymi  $m$  i  $M$  odległymi o  $r$ .**

$$F = -G \frac{m}{r^2} \int_M dM = -G \frac{m}{r^2} \int_0^r \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} 4\pi x^2 dx = -\frac{4}{3} Gm\rho\pi \frac{1}{r^2} \cdot r^3 = -\frac{4}{3} Gm\rho\pi r$$



## Pole grawitacyjne kuli



$$F = -\frac{4}{3}Gm\rho\pi r$$

$$F_r = G\frac{mM}{r^2}$$

# Przyspieszenie dośrodkowe

Zgodnie z drugim prawem dynamiki siła działająca na element masy powinna mu nadawać przyspieszenie, które nazywamy **przyspieszeniem ziemskim** lub grawitacyjnym równe:

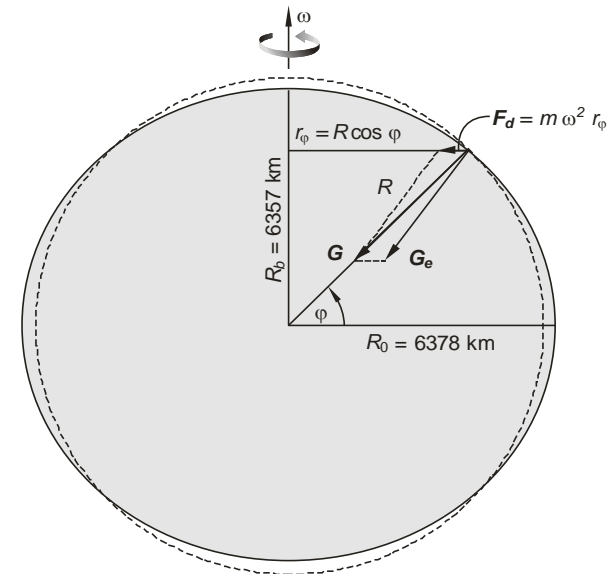
$$\vec{g} = G_c \frac{M}{r^3} \hat{r}$$

a jego wartość:

$$g = G_c \frac{M}{r^2}$$

Ziemia wiruje wokół własnej osi z prędkością kątową  $\omega = 2\pi/T$  (gdzie  $T \approx 24$  h). Czyli każdy jej element ulega swego rodzaju unoszeniu z taką właśnie prędkością i po torze w kształcie koła o promieniu wodzącym  $r_\phi = R \cos\phi$ . Iloczyn wektorowy prędkości liniowej takiego elementu i prędkości kątowej jest **przyspieszeniem dośrodkowym** tzn.:

$$\omega \times v_l = a_d = \omega \times (\omega \times r_\phi)$$



## Siła dośrodkowa

Siła dośrodkowa działająca na ten element:

$$F_d = m \cdot a_d$$

Czyli jej wartość wynosi:

$$F_d = m\omega^2 r_\varphi = m\omega^2 R \cos \varphi$$

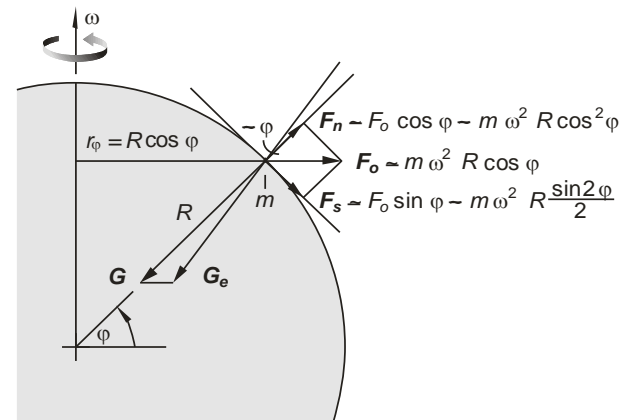
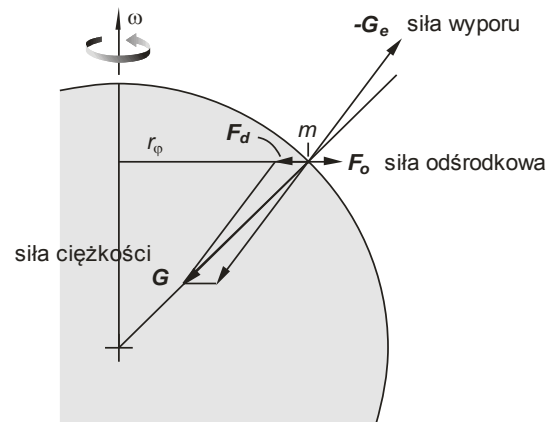
Ta siła ma wpływ na rzeczywistą wielkość i kierunek wypadkowej siły grawitacji  $G_e$ .

Biorąc pod uwagę siłę dośrodkową, a właściwie **reakcję bezwładnej masy na tę siłę** czyli **siłę odśrodkową**, rzeczywistą wartość przyspieszenia ziemskiego wyznaczoną dla nieruchomej Ziemi musimy poprawić o efekt jej działania. Zakładając tylko minimalną zmianę kierunku wynikającą z bardzo dużej dysproporcji pomiędzy siłą dośrodkową i grawitacji tzn. mając na uwadze, że  $F_d \ll G_e$  możemy napisać, że składowa normalna  $F_n$ :

$$F_n \approx m\omega^2 R \cos^2 \varphi$$

a efektywne przyspieszenie ziemskie:

$$g_e \approx g - \omega^2 R \cos^2 \varphi$$



## Masa zredukowana

$$m_1 \frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad m_2 \frac{d^2 \vec{r}_2}{dt^2} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad \vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$$

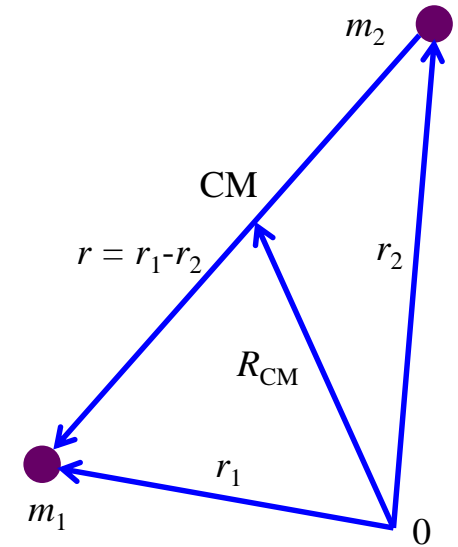
$$(+)\ m_1 \frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 \vec{r}_2}{dt^2} = \vec{0} \quad \int \left( m_1 \frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} + m_2 \frac{d^2 \vec{r}_2}{dt^2} \right) dt = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_1 \frac{d\vec{r}_1}{dt} + m_2 \frac{d\vec{r}_2}{dt} = \vec{const}$$

$$\vec{R}_{CM} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2} \quad \frac{d}{dt} \vec{R}_{CM} = \dot{\vec{R}}_{CM} = \frac{m_1 \frac{d\vec{r}_1}{dt} + m_2 \frac{d\vec{r}_2}{dt}}{m_1 + m_2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt} \vec{R}_{CM} = \dot{\vec{R}}_{CM} = \vec{const}$$

$$\frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} = -\frac{1}{m_1} \frac{G m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad \frac{d^2 \vec{r}_2}{dt^2} = \frac{1}{m_2} \frac{G m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$



## Masa zredukowana

$$\frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} = -\frac{1}{m_1} \frac{Gm_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad \frac{d^2 \vec{r}_2}{dt^2} = \frac{1}{m_2} \frac{Gm_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (-)$$

$$\frac{d^2 (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{dt^2} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\left( \frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1} \right) \frac{Gm_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

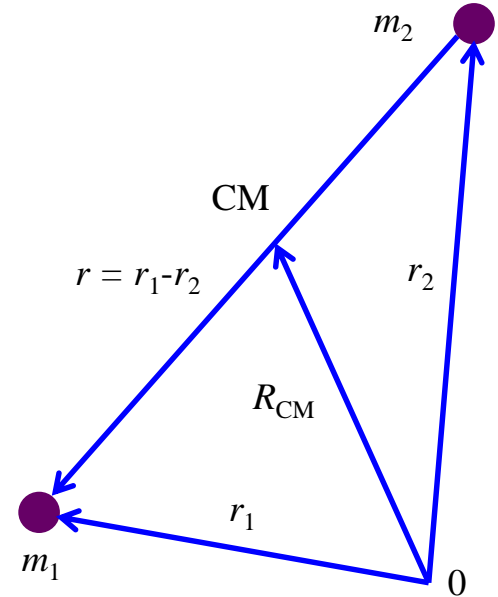
$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_1} \quad \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

$$\mu \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\frac{Gm_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

$$m_1 \ll m_2 \Rightarrow \mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = m_1 \frac{1}{\left( \frac{m_1}{m_2} + 1 \right)} \approx m_1 \left( 1 - \frac{m_1}{m_2} \right)$$

Dla atomu wodoru:

$$\mu \approx m_e \left( 1 - \frac{m_e}{m_p} \right) = m_e \left( 1 - \frac{m_e}{1836 m_e} \right) = m_e \left( 1 - \frac{1}{1836} \right)$$





## Ruch pod wpływem sił centralnych

Moment siły centralnej równy zeru:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = \mathbf{0}$$

Z II zasady dynamiki dla ruchu obrotowego:

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} = \mathbf{0}$$

wynika, że moment pędu jest stały:

$$\vec{L} = \text{const}$$

## Ruch pod wpływem sił centralnych

Pod wpływem siły centralnej ciała poruszają się po tzw. krzywych stożkowych: elipsie, paraboli lub hiperboli.

Wszystkie krzywe stożkowe można opisać równaniem we współrzędnych biegunowych:

$r, \varphi$  - współrzędne punktu;

$p$  - parametr kąta rozwarcia

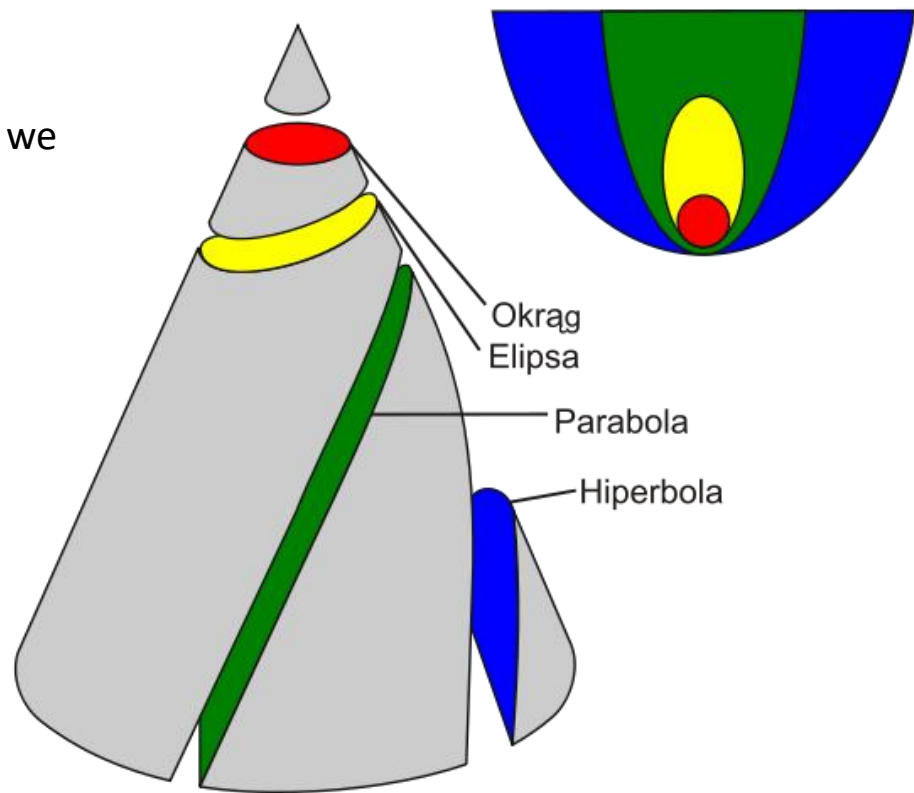
$e$  - mimośród krzywej, decydujący o jej kształcie:

$0 < e < 1$  - elipsa

$e = 0$  - okrąg, szczególny przypadek elipsy;

$e = 1$  - parabola;

$e > 1$  - hiperbola.

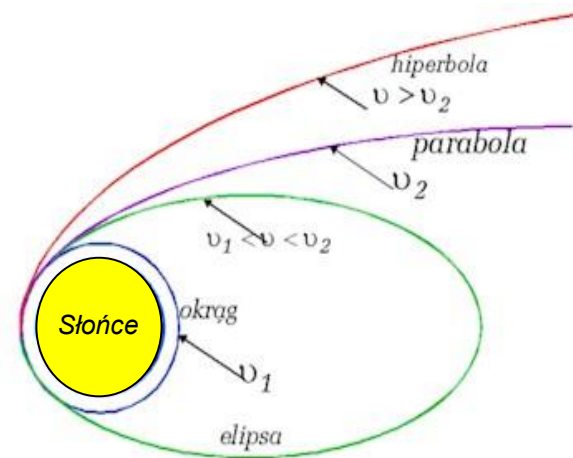
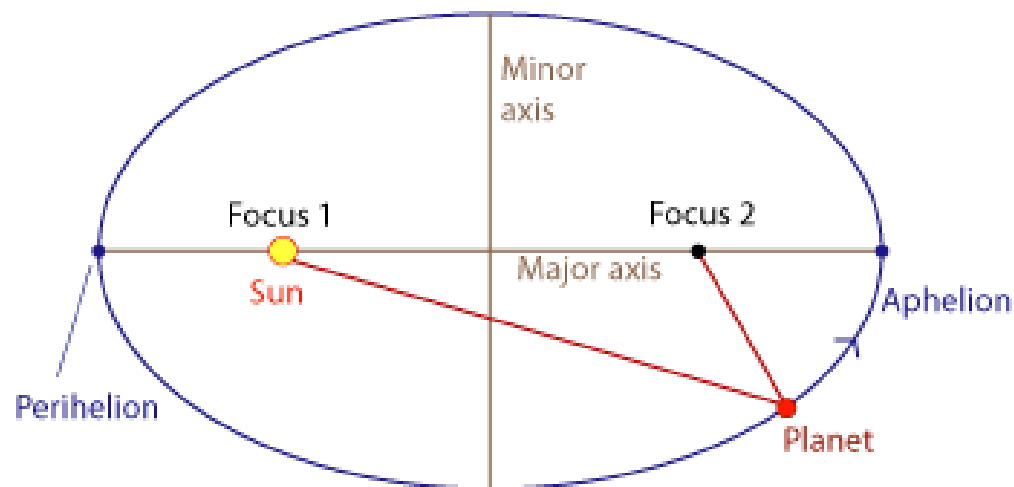


## Prawa Keplera (I)

1. **Planety poruszają się po torach eliptycznych. Słońce znajduje się w jednym z ognisk elipsy.**
2. **Promień wodzący planety zakreśla w równych czasach równe pola (prędkość polowa jest stała).**
3. **Stosunek kwadratów czasów obiegu planet wokół Słońca równy jest stosunkowi trzecich potęg dużych półosi.**

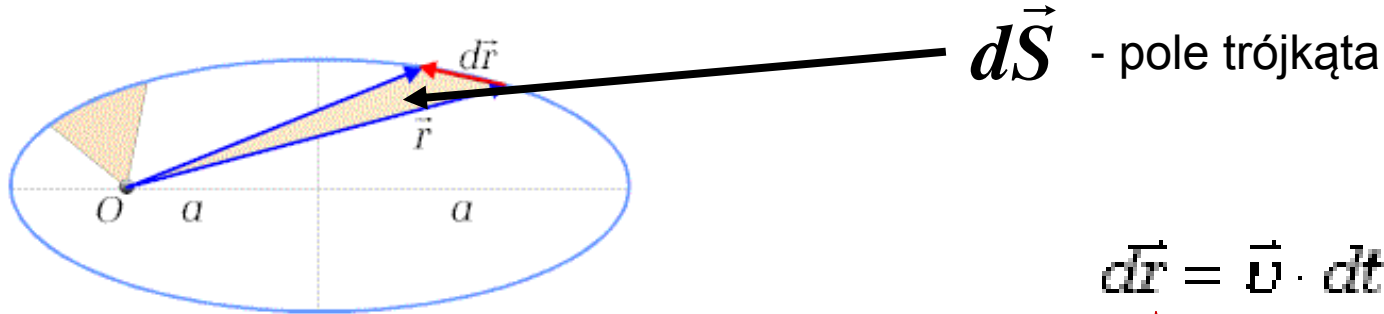
## Prawa Keplera (II)

1. Planety poruszają się po torach eliptycznych. Słońce znajduje się w jednym z ognisk elipsy.



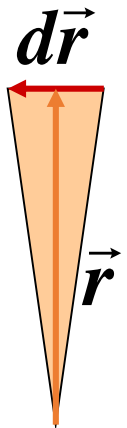
## Prawa Keplera (II)

2. Promień wodzący planety zakreśla w równych czasach równe pola (prędkość polowa jest stała).



$$d\vec{r} = \vec{v} \cdot dt$$

$$\vec{r} \times d\vec{r} = \vec{r} \times \vec{v} \cdot dt = 2 \cdot d\vec{S}$$



$$\vec{\sigma} = \frac{d\vec{S}}{dt} \quad \text{- prędkość polowa}$$

$$\vec{\sigma} = \frac{d\vec{S}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot (\vec{r} \times \vec{v}) = \frac{1}{2 \cdot m} \cdot (\vec{r} \times \vec{p}) = \frac{1}{2 \cdot m} \cdot \vec{L}$$



## Prawa Keplera (IV)

### 3. Stosunek kwadratów czasów obiegu planet wokół Słońca równy jest stosunkowi trzecich potęg dużych półosi.

Ruch planety wokół Słońca odbywa się pod wpływem siły dośrodkowej, którą stanowi siła ich wzajemnego przyciągania grawitacyjnego:

$$F = G \frac{m \cdot M}{R^2}$$

Przyspieszenie dośrodkowe  $a$  z jakim porusza się planeta wynosi:

$$a = \omega^2 R \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Zapisując dla tego układu drugą zasadę dynamiki Newtona dostaniemy:

$$G \frac{m \cdot M}{R^2} = m\omega^2 R$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} R^3$$

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} a^3$$

## Pierwsza prędkość kosmiczna

Siła przyciągania grawitacyjnego jest równoważona przez siłę odśrodkową:

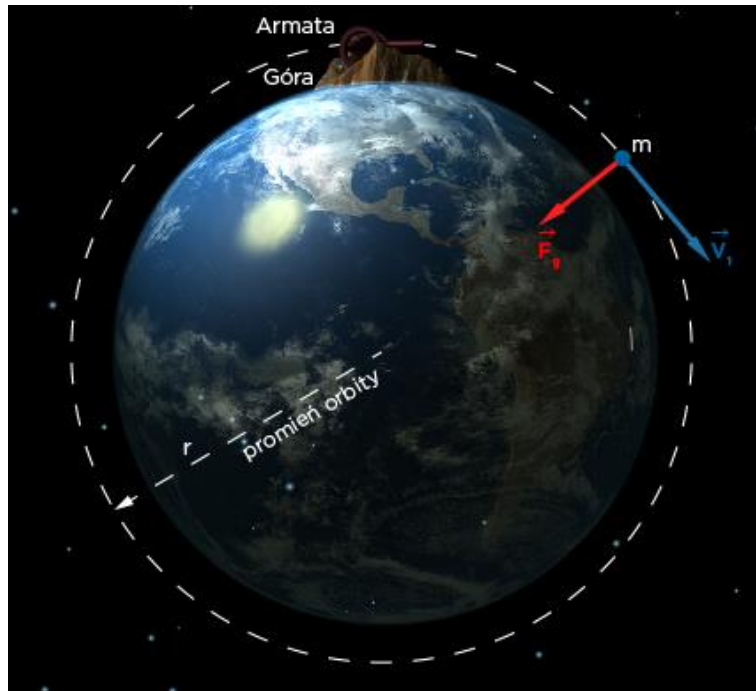
$$\frac{\cancel{m} \cdot v^2}{\cancel{r}} = G \cdot \frac{\cancel{m} \cdot M}{r^2}$$



$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}}$$

# Pierwsza prędkość kosmiczna

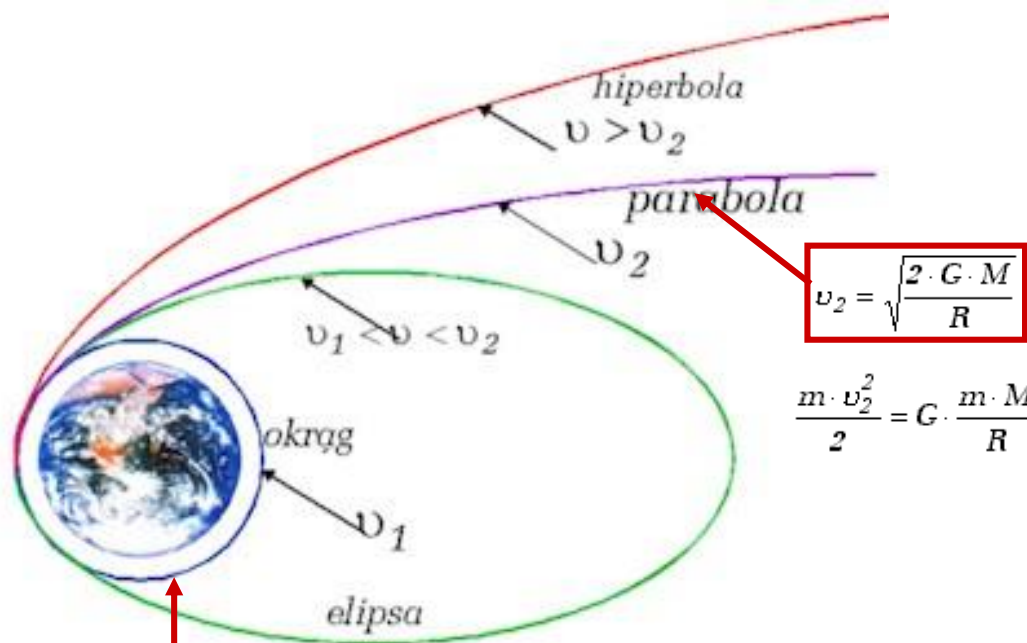
Pierwszą prędkością kosmiczną nazywamy najmniejszą możliwą prędkość jaką musi mieć punkt materialny krążący wokół Ziemi na orbicie bliskiej promieniowi Ziemi.



$$\frac{m \cdot v_1^2}{R} = m \cdot g$$

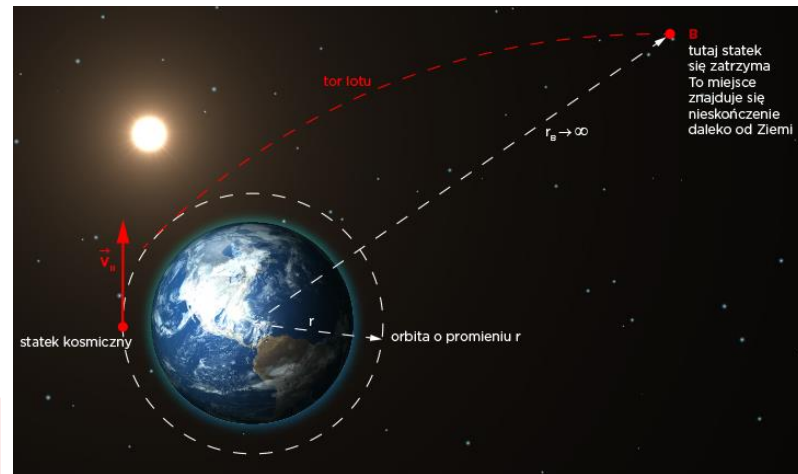
$$v_1 = \sqrt{R \cdot g} \approx 7.9 \text{ km/s}$$

# Druga prędkość kosmiczna



$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$$

$$\frac{m \cdot v_2^2}{2} = G \cdot \frac{m \cdot M}{R}$$



$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Druga prędkość kosmiczna - najmniejszą prędkość, która umożliwi punktowi materialnego pokonanie siły grawitacji ziemskiej i oddalenie się w przestrzeń kosmiczną.

# Trzecia prędkość kosmiczna

Trzecia prędkość kosmiczna - najmniejszą prędkość, która umożliwia punktowi materialnego pokonanie siły grawitacji Słońca i opuszczenie układu słonecznego.

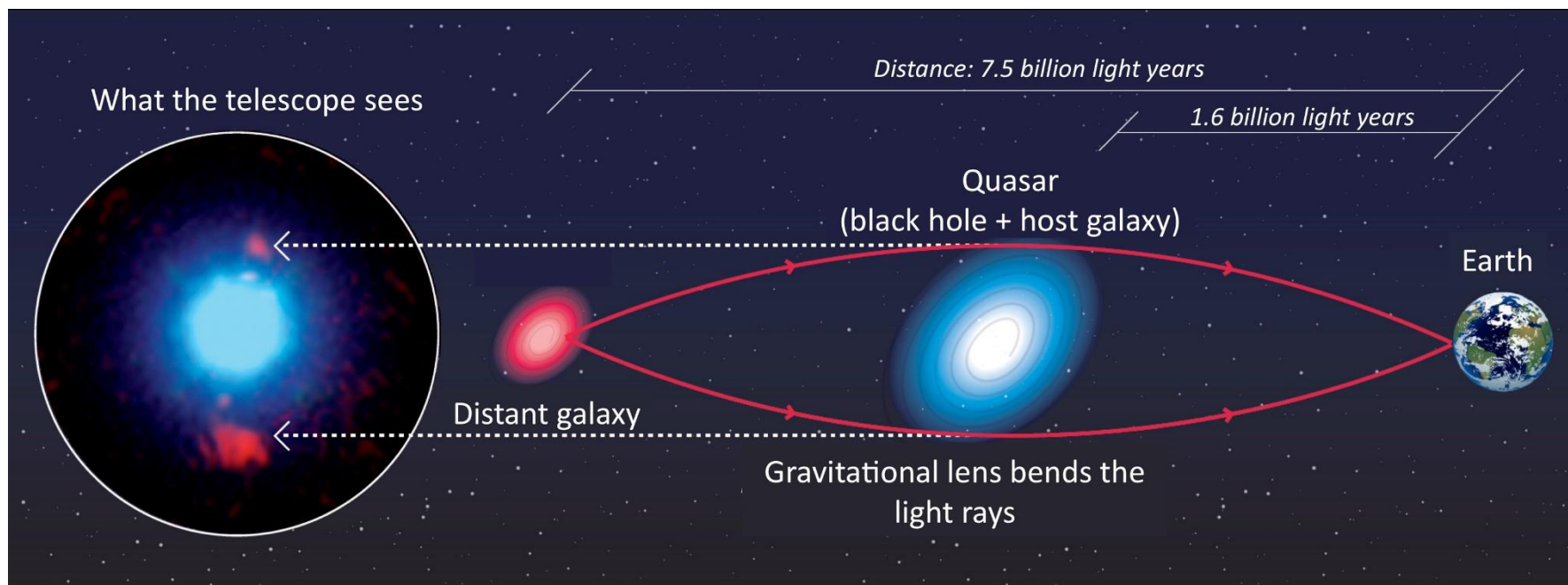
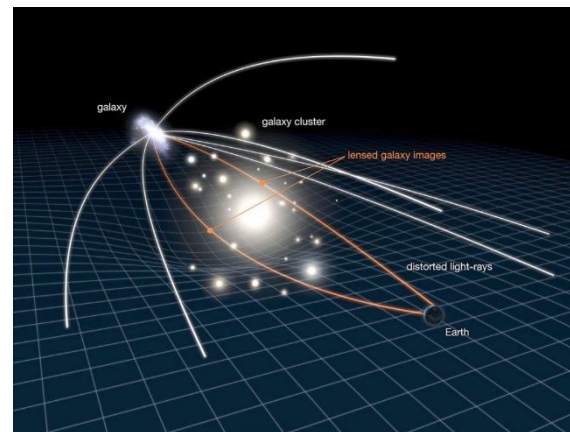
$$v_3 = \sqrt{\frac{2GM_s}{R}}$$

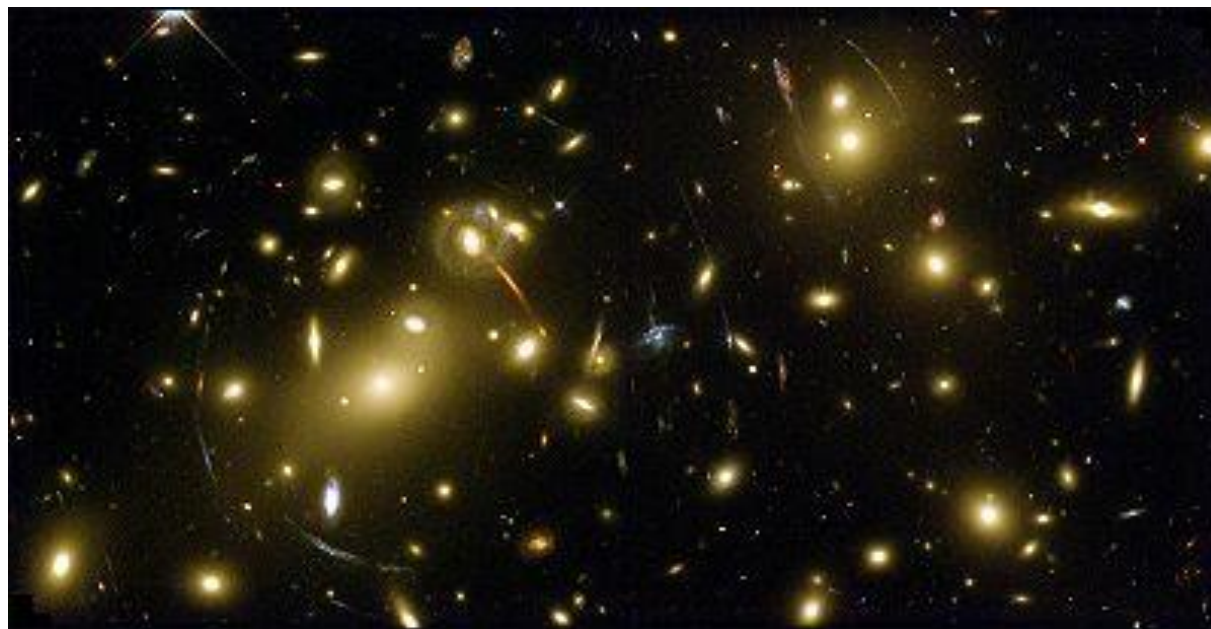
gdzie  $M_s$  – masa Słońca,  $R$  – odległość od Słońca



## Soczewkowanie grawitacyjne

Niezależne potwierdzenie dużych mas gromad galaktyk uzyskuje się dzięki zjawisku soczewkowania grawitacyjnego, tj. ugięcia promieni świetlnych przez pole grawitacyjne. Ze względu na duże masy gromad, efekt ten jest stosunkowo łatwo i często obserwowany. Jednocześnie, wskutek ogniskowania wiązki światła wzmocnieniu ulega obserwowana jasność bardzo odległych galaktyk i kwazarów.





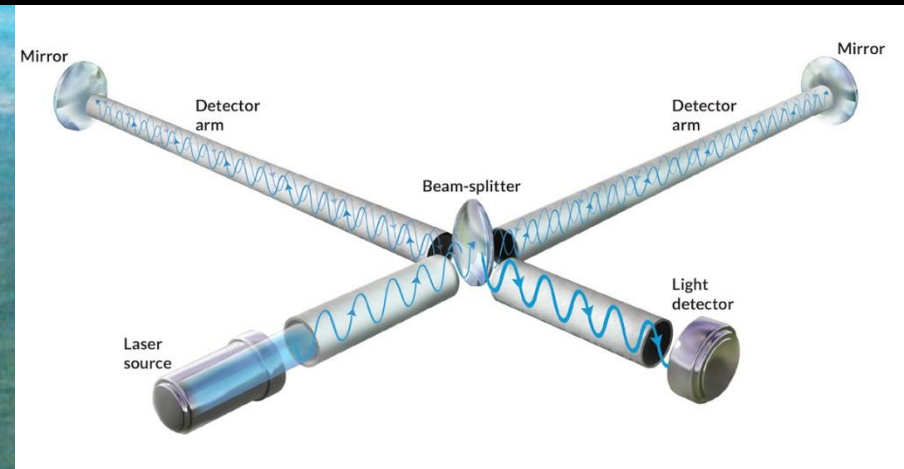
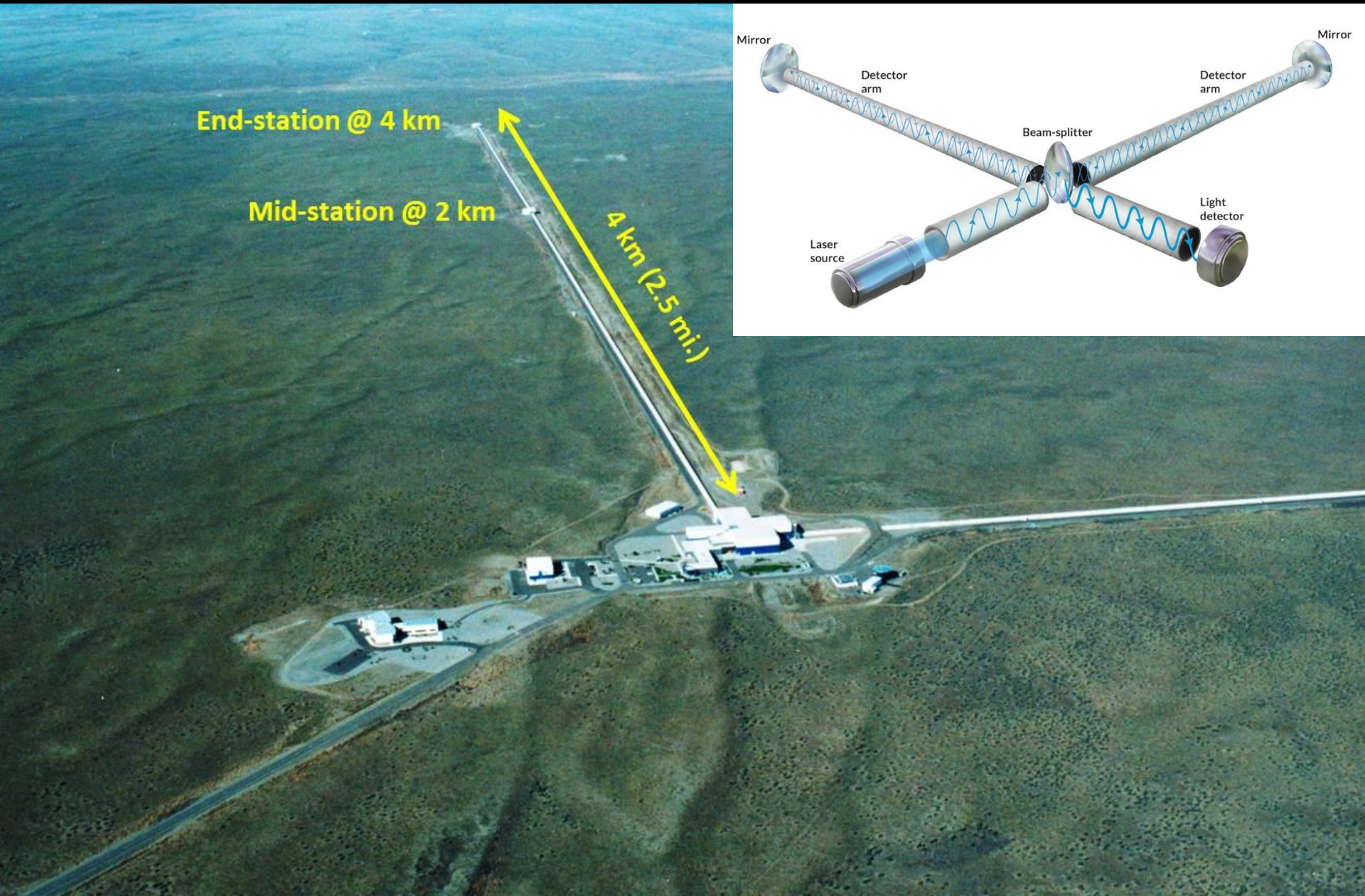
Gromada galaktyk A2218 zniekształca obrazy odległych galaktyk. Na pierwszym planie widać jasne galaktyki z gromady; cienkie świetliste łuki są wydłużonymi i zakrzywionymi koncentrycznie wokół środka masy obrazami galaktyk tła. Rozmieszczenie i kształt łuków pozwalają wyznaczyć rozkład masy tej gromady. Fot. HST/NASA.

## Soczewkowanie grawitacyjne



Zaginanie promieni świetlnych galaktyki spiralnej przez pole grawitacyjne gromady galaktyk Cl0024+1654. Znajdujące się na pierwszym planie żółtawe galaktyki gromady uginają promienie świetlne niebieskiej galaktyki spiralnej. W wyniku tego powstało pięć oddzielnych obrazów tej galaktyki: jeden blisko środka zdjęcia, a pozostałe cztery - rozmieszczone w przybliżeniu wzdłuż okręgu "na godzinach" 4, 8, 9 i 10. Gromada Cl0024+1654 znajduje się w gwiazdozbiore Ryb, w odległości około 1500 megaparseków (Mpc); galaktyka spiralna - mniej więcej dwa razy dalej. Fot. HST/NASA.





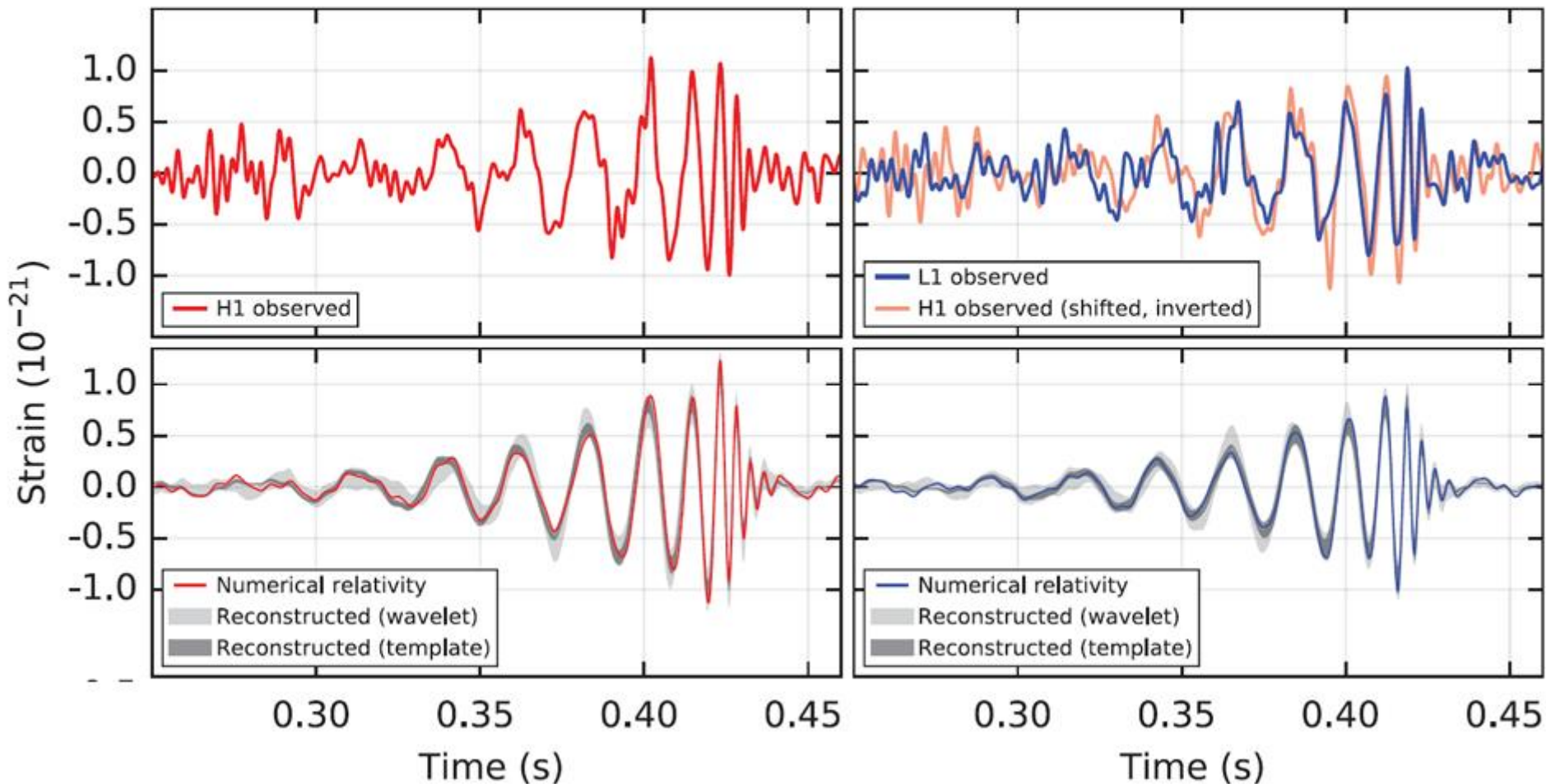


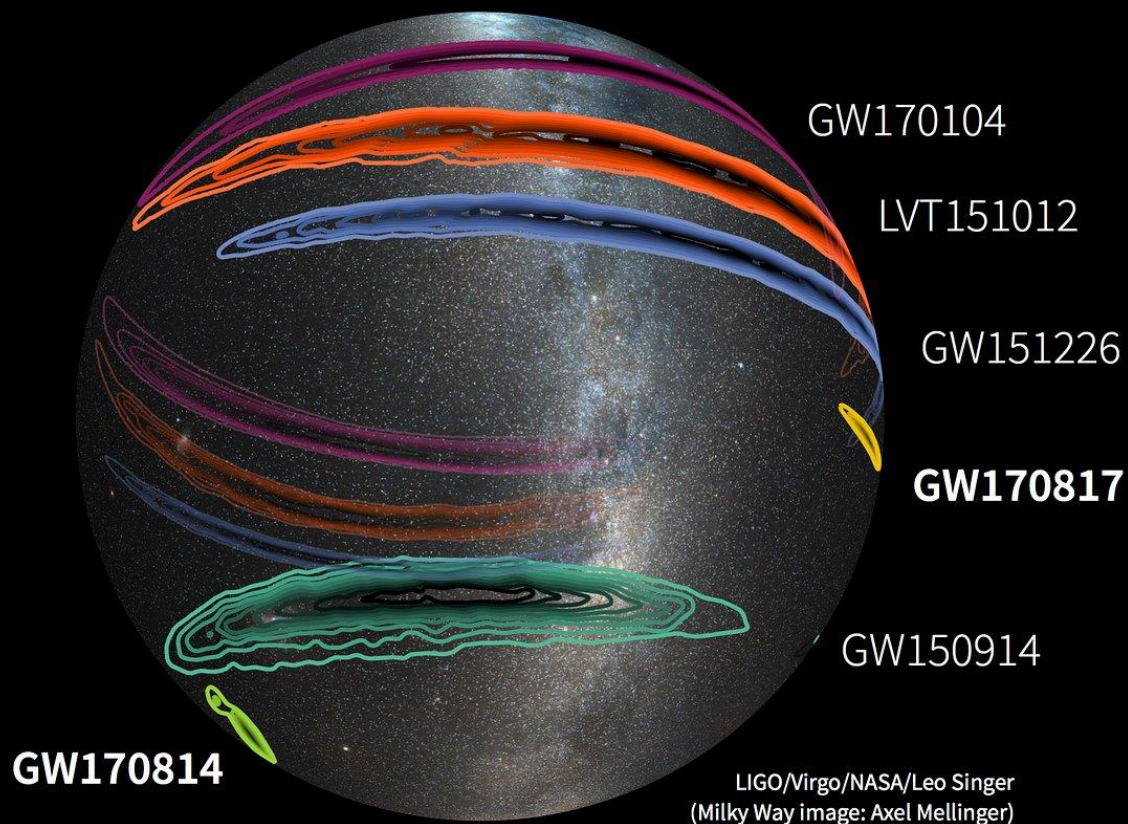
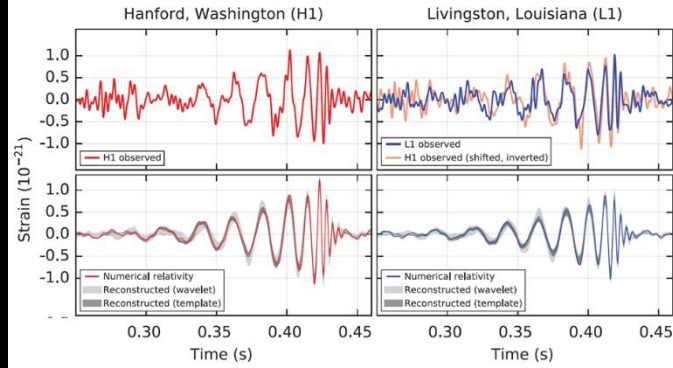


Fale grawitacyjne zarejestrowane przez dwa amerykańskie detektory należące do LIGO (Laserowe Interferometryczne Obserwatorium Fal Grawitacyjnych) – w Livingstone (Luizjana) i w Hanford (Waszyngton) oraz detektor Advanced Virgo, znajdujący się w Europejskim Obserwatorium Grawitacyjnym (EGO) w Cascinie we Włoszech.

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)







- 1,7 sekundy po odnotowaniu fal grawitacyjnych teleskop Fermiego wykrył krótką serię promieni gamma z tego samego źródła.
- 11 godzin później po raz pierwszy dostrzeżono światło widzialne w obserwowanym obszarze galaktyki NGC 4993, zlokalizowanej w odległości około 130 milionów lat świetlnych od Ziemi w kierunku konstelacji Hydra.
- Po połączeniu dwóch gwiazd neutronowych, nastąpił silny rozbłysk radioaktywnych ciężkich pierwiastków. Opuściły kilonową z prędkością jednej piątej prędkości światła. Widma zebrane w ramach ePESSTO i za pomocą instrumentu X-shooter na VLT wskazują na emisje cezu i telluru.
- W ciągu zaledwie kilku dni barwa gwiazdy zmieniła się z niebieskiej na czerwoną (pierwszy raz zarejestrowano tak szybko przebiegający proces).
- Skład chemiczny wytworzonego materiału: około 6 proc. masy kilonowej stanowią ciężkie pierwiastki. Ilość samego złota jest 200 razy większa niż masa Ziemi, a platyny – prawie 500.