

きちんと理解するのは 意外に難しい潮汐力

谷村 省吾

名古屋大学大学院情報科学研究科

主な参考文献：

- 松田卓也『間違いだらけの物理学』学研教育出版 (2014)
- S. Weinberg, "To Explain the World" Harper (2015)
- ファインマン『物理法則はいかにして発見されたか』

物理学を正しく理解する・ 教えることは難しい

谷村 省吾

名古屋大学大学院情報科学研究科

参考文献：

- 松田卓也『間違いだらけの物理学』学研教育出版 (2014)
- S. Weinberg, "To Explain the World" Harper (2015)

話の出どころ(1)

- 2009年6月、京大基研で松田卓也氏が 「ファイマンも間違った潮汐力」 という講演を行い、私も聴いた。そのときは、なるほどと私も思った。
- 2016年4月、名大生協主催の「研究者になりたい人集合」という新入生歓迎企画で、私は講演し、潮汐力の問題をクイズとして新入生に出題した。その議論の中で、ポスドクの方が私の思い違いを指摘してくれた。

話の出どころ(2)

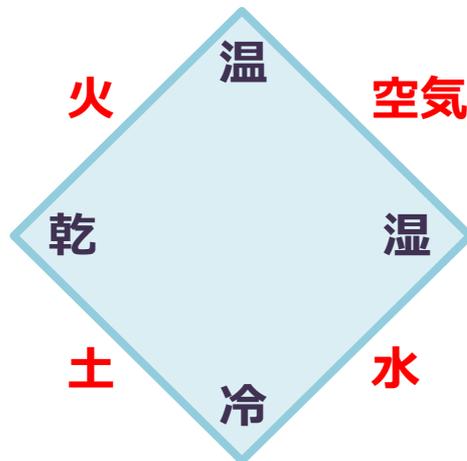
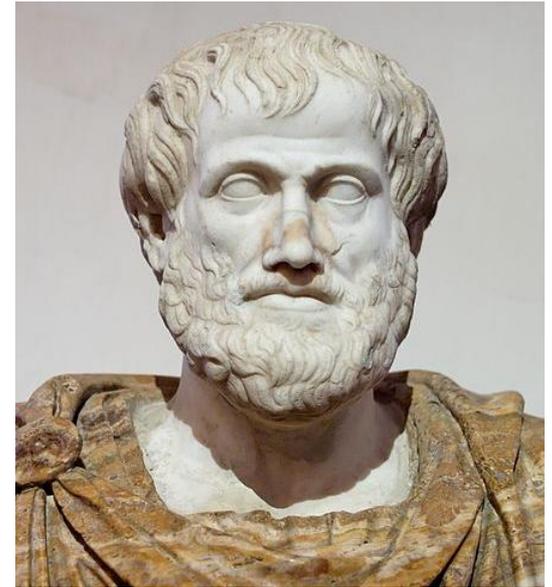
- 2016年9月、愛媛大学で集中講義とセミナーをした折、間違いを正した潮汐力の話を紹介した。が、それでも私の疑問は完全には消えず、かえって宿題が増えた。
- 天白ゼミ準備のため文献を調べてみると、潮汐力の問題は過去に何度も蒸し返されていることがわかった。地球物理・惑星物理の専門家にとっては完全に解決されている問題なのだが、門外漢たちが何度も誤解を蒸し返しているのである。

潮汐力の出どころを問う

- 重力と遠心力の問題
- 遠心力 = 慣性力の一種
- 慣性と力の関係を問い質しておきましょう。
- 力学法則の定式化を問い質しておきましょう。

アリストテレスの素朴物理学

- 重いものは速く落ちる
- 力が作用していない物体はやがて止まる
- 地球中心、同心円軌道
- 温冷乾湿（形相）と四元素説



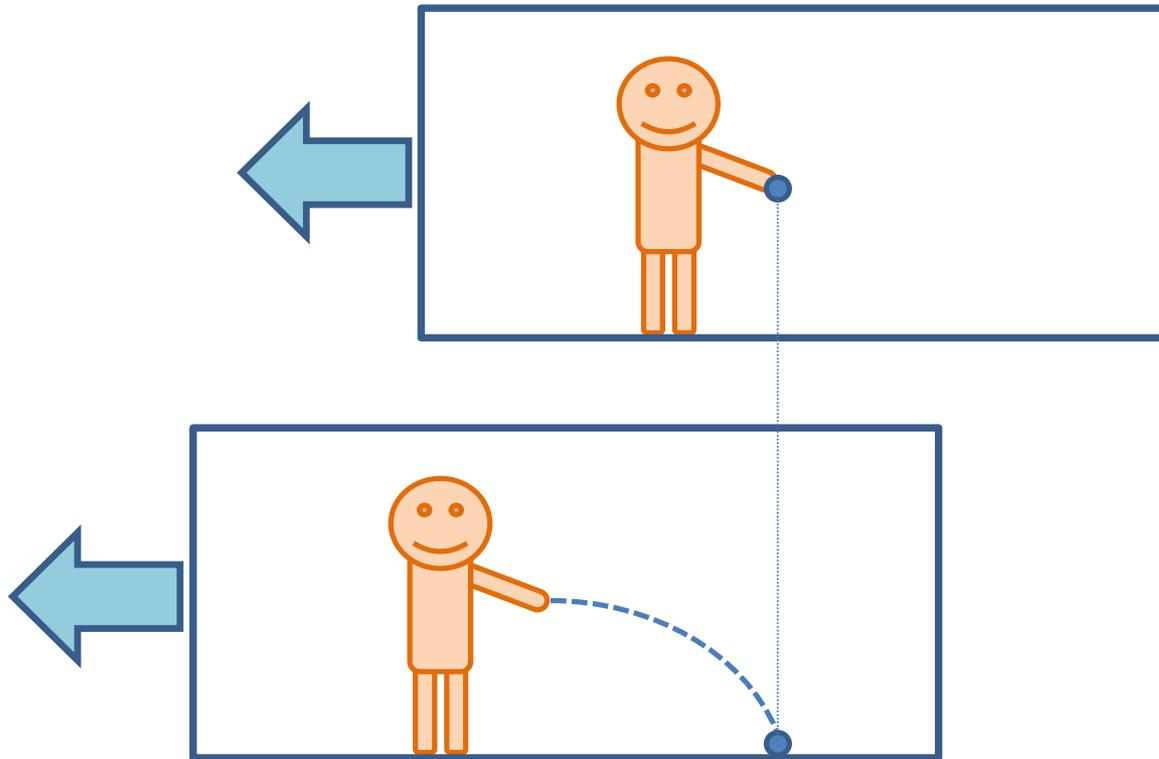
- 現象観察からの法則抽出
- 目的論的因果関係
- 量より質を重視

Aristotle 384-322BC

URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aristotle>

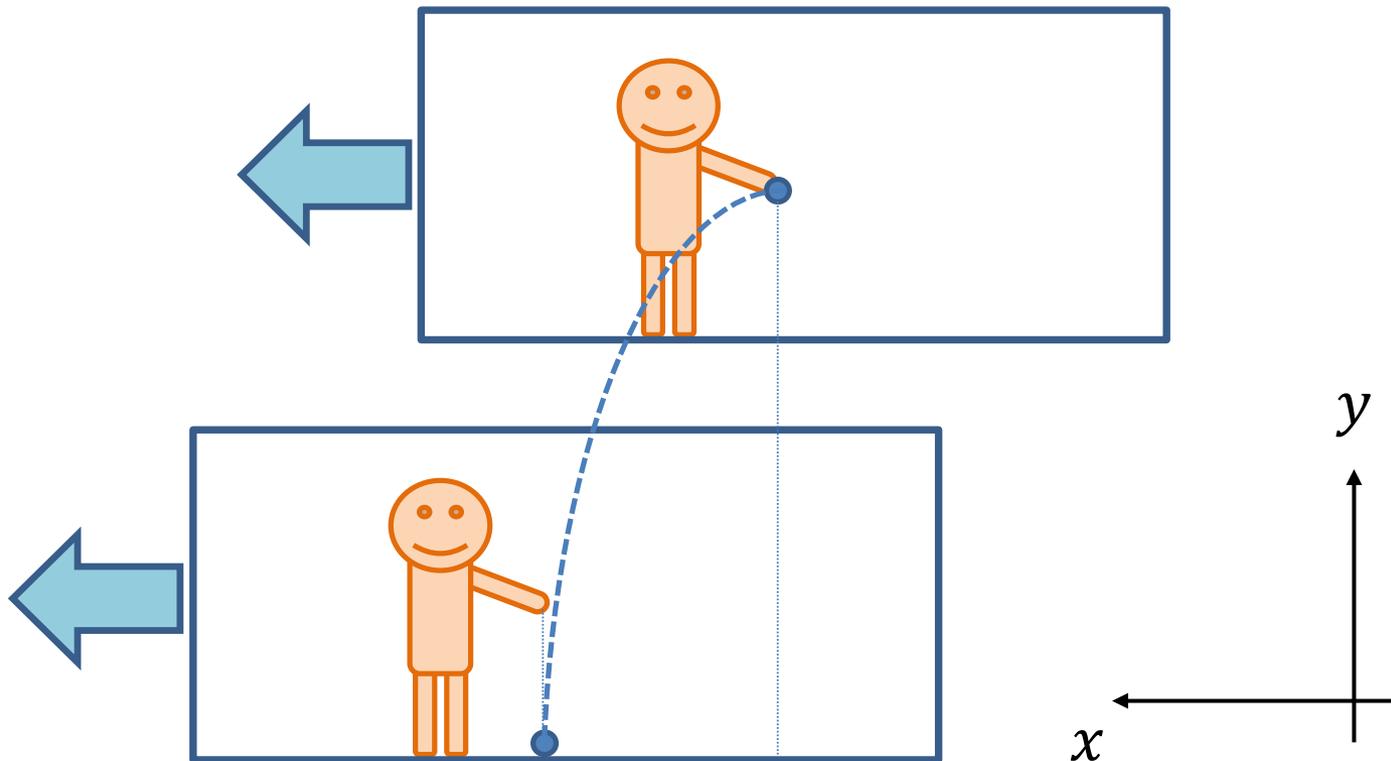
アリストテレス的運動論

- 等速度で走る車の中でものを落とすと、車内では後方に着地する（はずだ）。



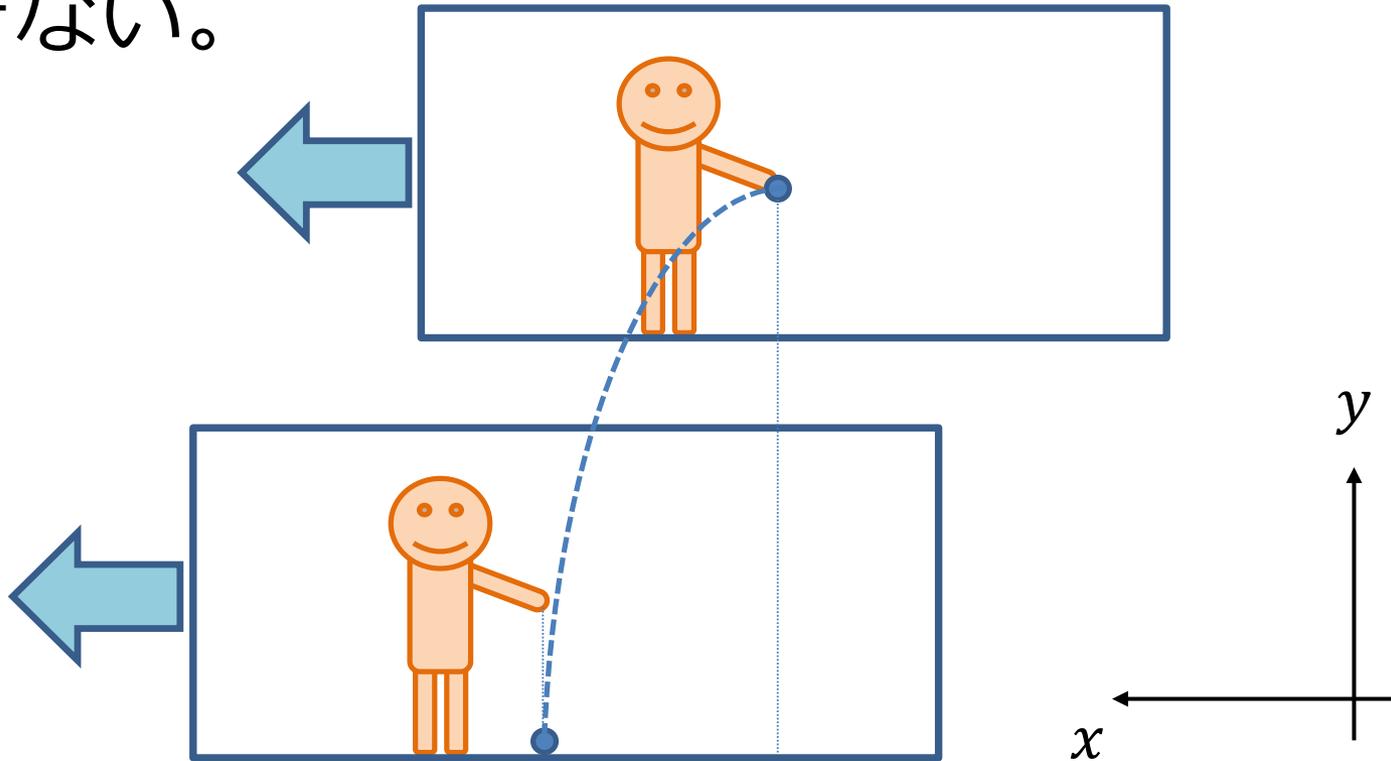
ニュートン力学

- 慣性の法則： x 方向の等速度運動
- 力と加速度の法則： y 方向の加速運動



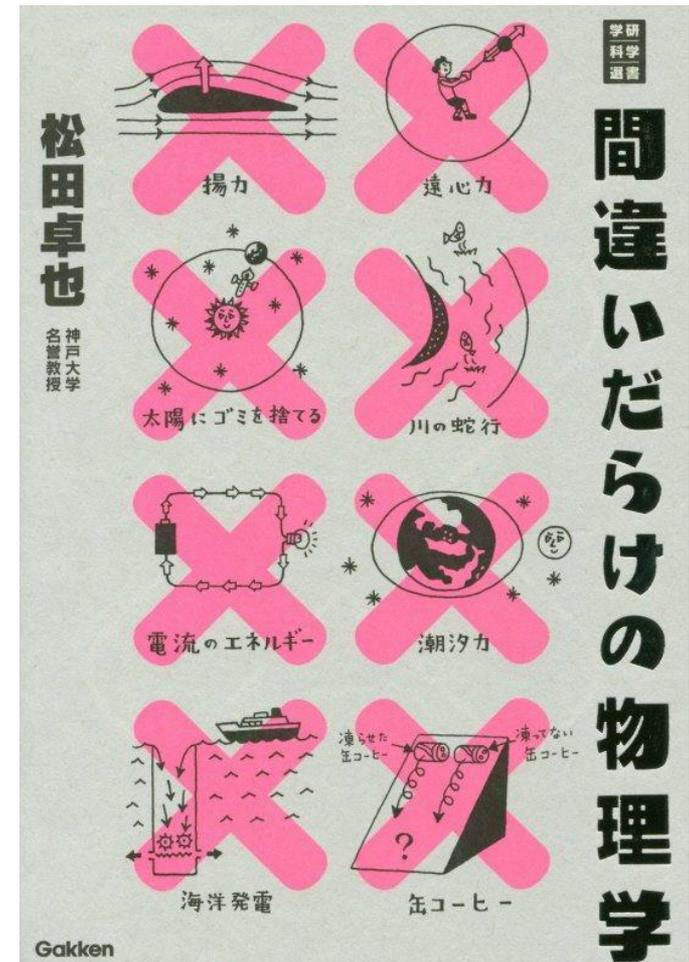
ガリレオの相対性

- 等速度で運動する車（船）内でいかなる実験をしても、自分の速度を知ることはいできない。



松田卓也先生 「間違いだらけの物理学」

- 世にはびこる「間違い物理学」を成敗しよう（もの笑いにしよう）とする本。
- たしかにいいことも書いてある。
- しかし「え？それは先生がお間違いでは？」あるいは「お考えが足りないのでは？」と思えるところも何箇所かある。



松田卓也先生

「間違いだらけの物理学」

- 第1法則：力を受けていない物体は等速直線運動する。
- 第2法則：力を受けている物体には、力に比例し、質量に反比例する加速度が生じる。

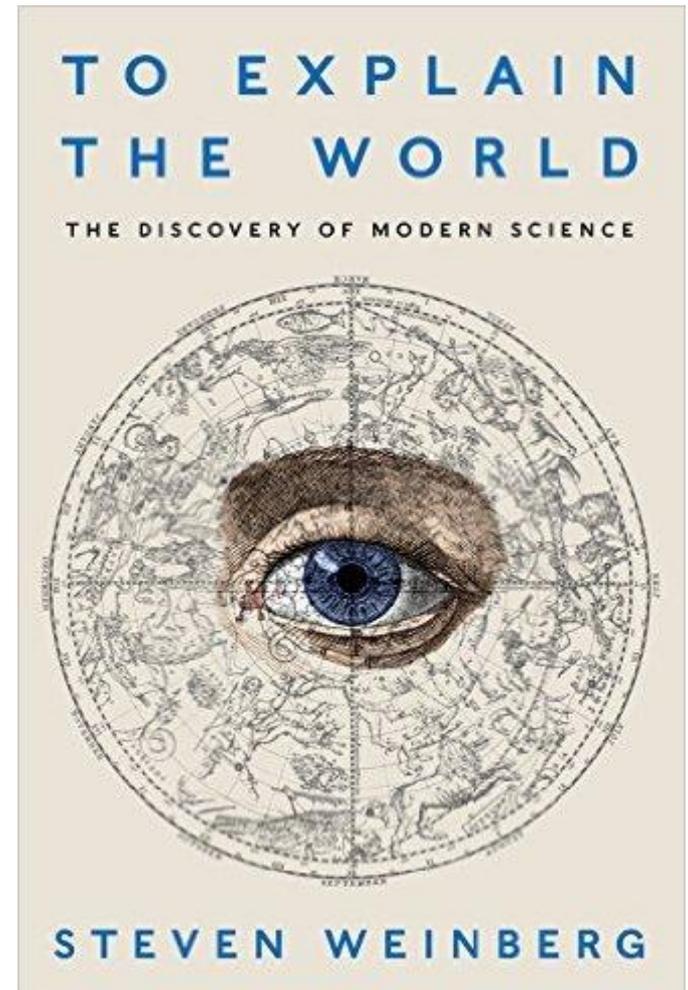
$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}$$

- 松田氏(pp.55-58): $\mathbf{F} = \mathbf{0} \Rightarrow \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 t$
第1法則は第2法則に含まれる。第3法則も第2法則から導ける。

第3法則は第2法則のcorollary か、という問題についても諸説あり。

Steven Weinberg “To Explain the World”

- 科学史の本。
- 当時の視点ではなく、現代の視点から歴史を批判的に検討している。
- 「科学の発見」というタイトルで和訳されている。



Steven Weinberg

“To Explain the World”

- 第1法則：力を受けていない物体は等速直線運動する。
- 第2法則：力を受けている物体には、力に比例し、質量に反比例する加速度が生じる。

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}$$

- Weinberg (p.234): It is not clear why Newton bothered to include it as a separate law, since the first law is a trivial (though important) consequence of the second.

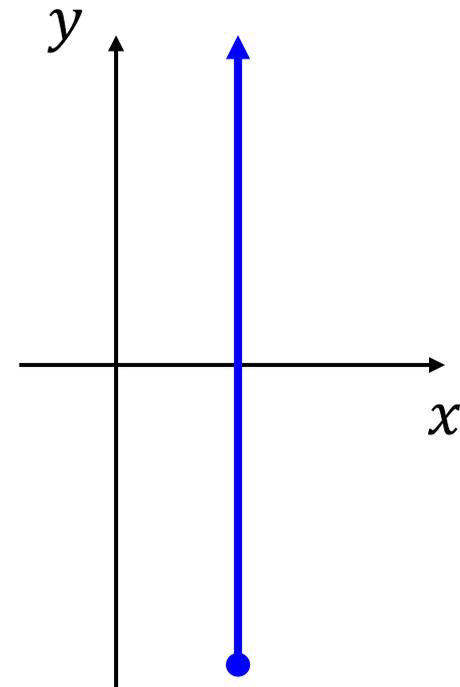
ニュートン力学の第1法則は 何のためにあるのか？

- 例1) 2次元直交座標系で

$$\begin{cases} x = x_0 \\ y = v_0 t \end{cases}$$

という運動は、**極座標系では**

$$\begin{cases} r = \sqrt{x_0^2 + v_0^2 t^2} \\ \theta = \tan^{-1} \frac{v_0 t}{x_0} \end{cases}$$



- 等速直線運動 = 位置が時間の1次関数**
と言いたいところだが、本当は等速度運動であっても、
変な座標を使っていると、座標値は時間の1次関数にならない。

ニュートン力学の第1法則は 何のためにあるのか？

- 例2) 2次元直交座標系で

$$\begin{cases} x = x_0 \\ y = v_0 t \end{cases}$$

という運動は、**回転座標系では**

$$\begin{cases} x = x_0 \cos \omega t + v_0 t \sin \omega t \\ y = -x_0 \sin \omega t + v_0 t \cos \omega t \end{cases}$$

- **等速直線運動 = 位置が時間の1次関数**
と言いたいところだが、本当は等速度運動であっても、
変な座標を使っていると、座標値は時間の1次関数に
ならない。

ニュートン力学の第1法則は 何のためにあるのか？

- 第1法則：力を受けていない物体は等速直線運動する（座標値が時間の1次関数になる）。
- 第1法則は、慣性の法則が成立するような座標系（=慣性系）を使って力学の方程式を書きなさい、ということを行っている。
- 第1法則がないと、何を基準にして加速度を定めたらよいのかわからない。
- 適正な座標系を使わないと、第2法則が成立しない。

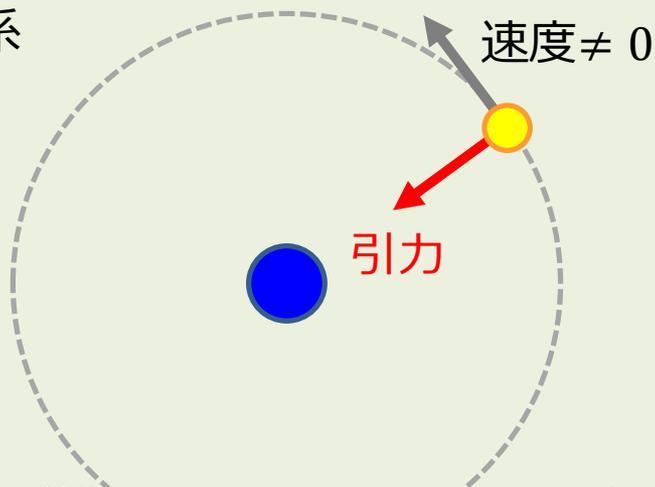
この人たちはどんな人か？

- 松田卓也氏は、相対論や宇宙物理や流体力学の専門家。しかも、いわゆる擬似科学の批判者としても有名。
- ワインバーグは、相対論的場の量子論や一般相対論や宇宙論の専門家。言わずと知れたノーベル物理学賞受賞者である。
- そんな人たちが慣性系の物理的意義をちゃんと理解せずに、力学法則を批判的に論じている！

松田卓也先生の正しい言い分

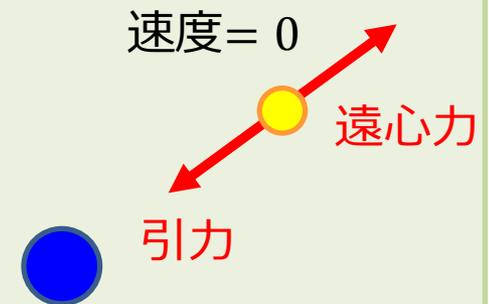
- 「引力（重力や張力）と遠心力が釣り合って円運動する」という類の説明は、たいていの場合、正しく使われていない。
- 正しくは、慣性系では遠心力という「力」はない。
- 遠心力は回転座標系でのみ現れる。（松田先生のこの説明は正しいと谷村も思う）

慣性系



遠心力が働いていると思うのは間違い

回転系



引力と遠心力が釣り合っている
（そして衛星は静止している）

潮汐力の話

- 以下、潮汐力のことを詳しく話します（これが私の講演の主題）。
- このねたも、松田卓也氏の本で語られている。
- 松田氏の、通説批判は当たっている。
- が、松田氏の解説も満点ではない。

潮の満ち引き



東京都港区台場の海。この日
(2007年5月17日)は新月で、満
潮時最高潮位は**192センチメートル**。
18時19分撮影。



同日付、同地点での干潮時の写真。
この日の干潮時最低潮位は**マイナス
18センチメートル**。10時48分撮影。



210 cm の潮位変動

潮の満ち引き



潮の干満が激しいカナダのファンディ湾 (Bay of Fundy)。満潮時。

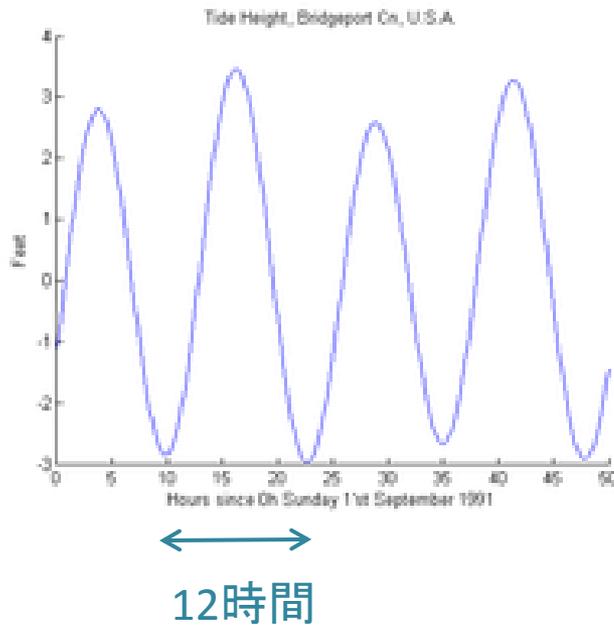


同じ地点での干潮時の写真。干満差は世界一で、最大15メートルとなる。

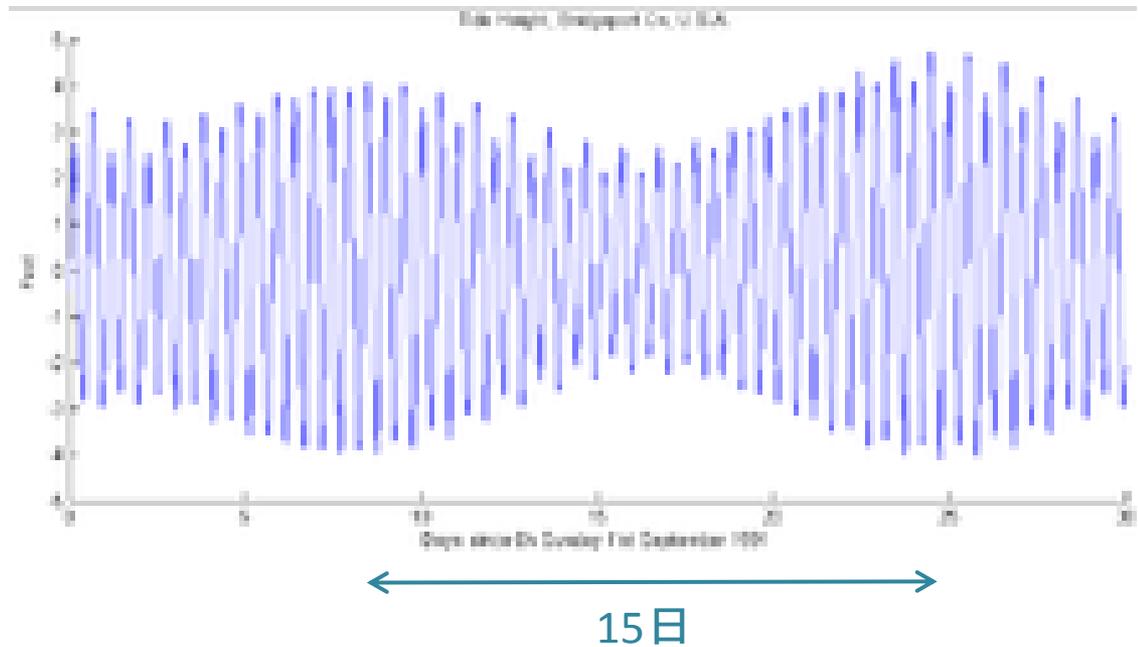
<https://ja.wikipedia.org/wiki/潮汐>

潮の満ち引き

50時間の水位の変化



30日間の水位の変化



潮汐についての観察事実

- 1日に2度、満潮と干潮がある。つまり、満潮と干潮の間は6時間。
- 14～15日の周期で干満の差が最大になる。
- だいたい満月と新月の日に干満の差が最大になる。

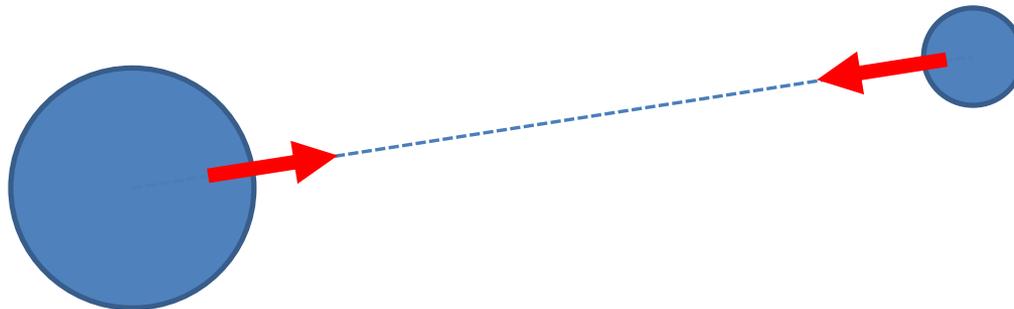
万有引力の法則

- 質量 M と m の物体が距離 r だけ離れていたら大きさ F の力で引きあう。

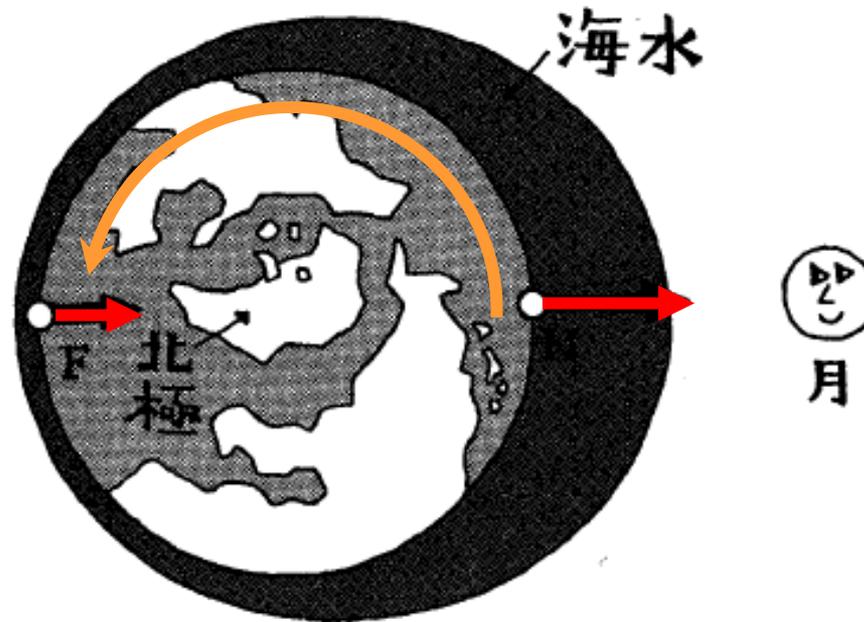
$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

- 万有引力定数（ニュートン定数）

$$G = 6.67408 \times 10^{-11} \text{ N kg}^{-2} \text{ m}^2$$

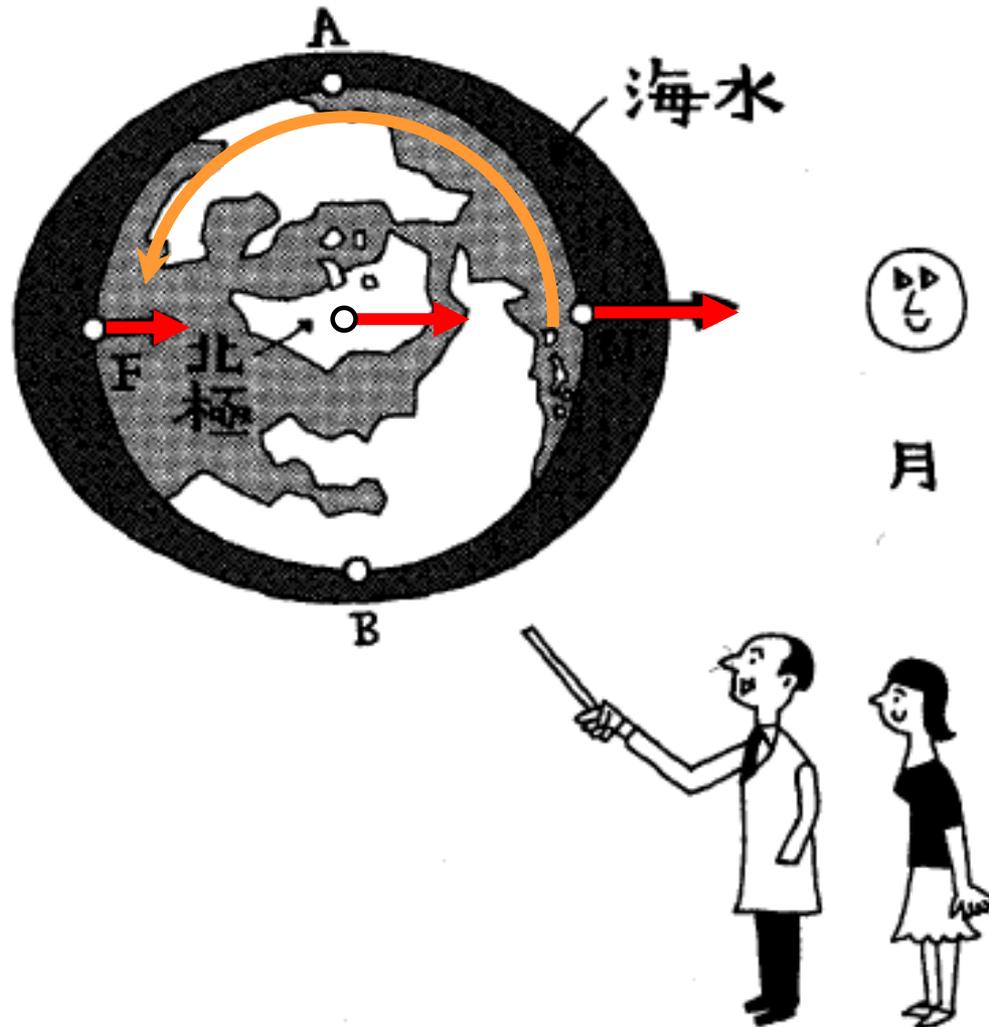


安直な説明



- 月の引力で海水が引っ張られるのが潮汐の原因だとしたら、こうなるはずではないか？
- これなら、1日1回満潮、1回干潮になるはず。
- 1日に2回起こる満潮を説明できない。

その次に安直な説明



- 海水が月に引っ張られ、地球自体も月に引っ張られる。それで月と向き合う海面と、月の反対側の海面が、両方とも盛り上がる、という説明。
- ファインマンの『物理法則はいかにして発見されたか』にも同様の図と説明が載っている。
- なんとなく正しそうだが、ちゃんとした説明とは思えない。
- 両側がちょうど同じ高さの満潮になることをうまく説明できていない。

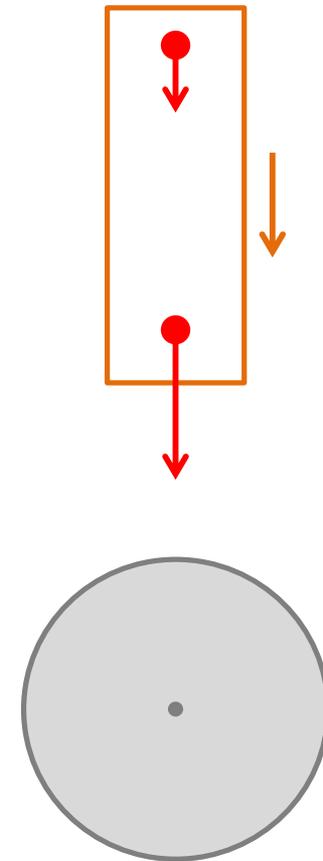
潮汐力を計算してみる1

- 長さ20mの車両を立てて、地上付近を落下させるときの、車両の上下両端の加速度の差：

$$\begin{aligned}\Delta g &= g \times \frac{2l}{r} \\ &= 9.8 \text{ ms}^{-2} \times \frac{2 \times 20 \text{ m}}{6400 \text{ km}} \\ &= 6.1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}\end{aligned}$$

- 1分間で生じる変位（自由粒子なら）

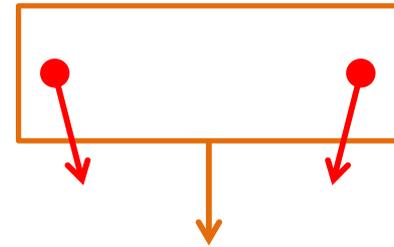
$$\Delta l = \frac{1}{2} \Delta g \cdot t^2 = 11 \text{ cm}$$



潮汐力を計算してみる2

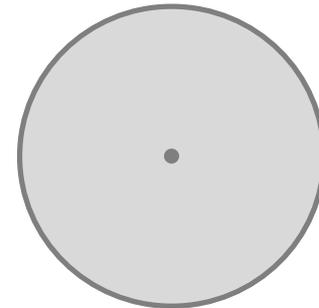
- 長さ20mの車両を水平にして、地上付近を落下させるときの、車両の前後両端の加速度の差：

$$\begin{aligned}\Delta g &= g \times \frac{l}{r} \\ &= 9.8 \text{ ms}^{-2} \times \frac{20 \text{ m}}{6400 \text{ km}} \\ &= 3.1 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}\end{aligned}$$



- 1分間で生じる変位（自由粒子なら）

$$\Delta l = \frac{1}{2} \Delta g \cdot t^2 = 5.6 \text{ cm}$$



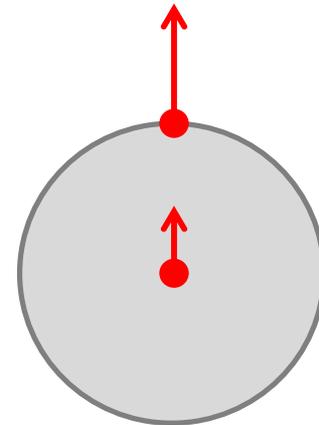
潮汐力を計算してみる3

- 月が地球に及ぼす潮汐力：地球中心に作用する重力と、月に面した地表に作用する重力の差

$$\begin{aligned}\Delta g &= g \times \left(\frac{r}{R}\right)^2 \times \frac{2r}{R} \\ &= 9.8 \text{ ms}^{-2} \times \left(\frac{6,400 \text{ km}}{384,000 \text{ km}}\right)^3 \times 2 \\ &= 9.0 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-2}\end{aligned}$$

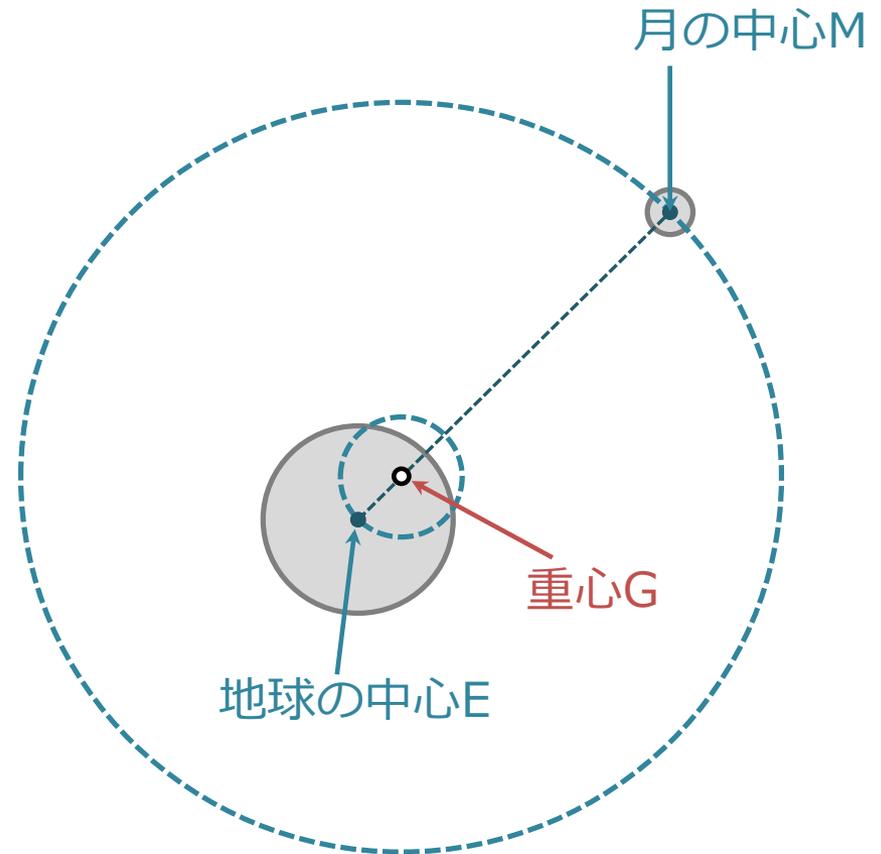
- 6時間で生じる変位（自由粒子なら）

$$\Delta l = \frac{1}{2} \Delta g \cdot t^2 = 0.97 \text{ m}$$



謎解きの第一歩

- 地球と月の運動は、本当は、太陽や他の惑星も絡んだ多体問題。
- 2体問題で近似したら楕円軌道だが、円軌道で近似する。
- 慣性系では、地球と月の重心が等速直線運動していて、**重心の周りを地球と月が回りあっている。**

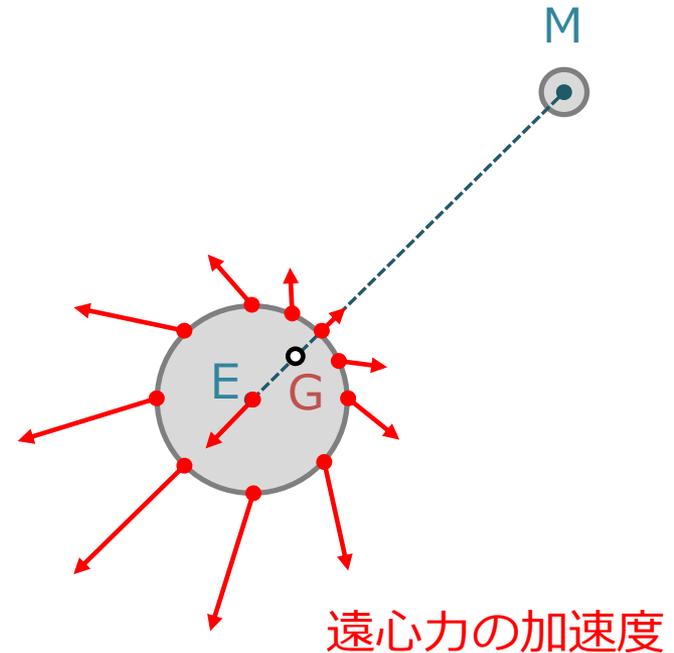


Wikipedia「潮汐」 <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%BD%AE%E6%B1%90>

Wikipedia「公転運動」 <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orbit3.gif>

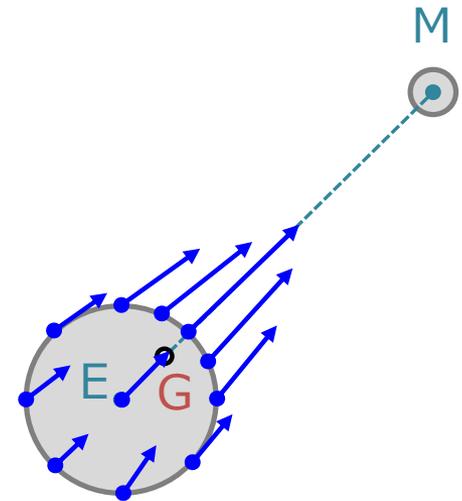
謎解きの第二步

- この運動を、重心周りで一定の角速度で回転している座標系から見る。
- 天体は静止して見える。
- この座標系は慣性系ではない。
- 遠心力が生じる。
- 遠心力の向きは、回転の中心Gから遠心方向。
- 遠心力の大きさは、重心からの距離に比例。



謎解きの第三步

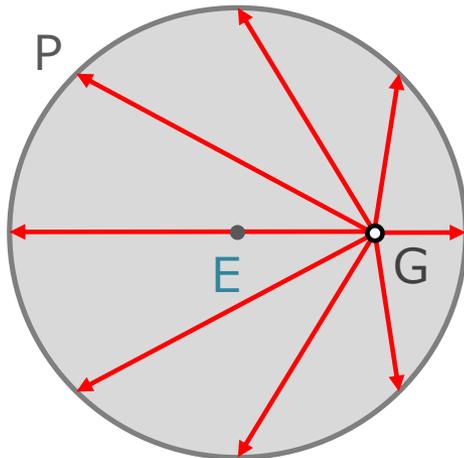
- 重力の大きさは相手天体の中心からの距離の2乗に反比例する。
- 遠心力と重力との合力はどうなっているか？



重力の加速度

ここからが松田卓也氏の巧みな分析1

- 地球の中心 E 、月の中心 M 、地球と月の重心 G
- 任意の点 P における遠心力加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例する。

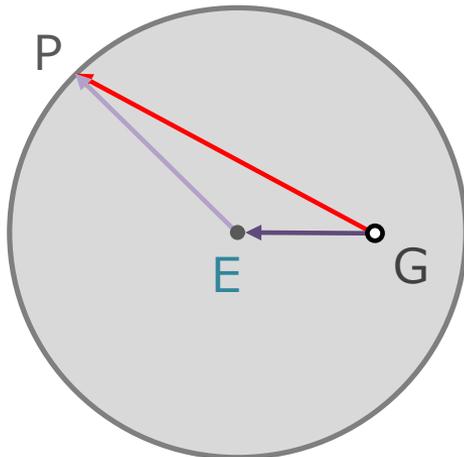


各点 P における遠心力の加速度



ここからが松田卓也氏の巧みな分析2

- 地球の中心 E 、月の中心 M 、地球と月の重心 G
- 任意の点 P における遠心力加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例する。
- ベクトルの分解： $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$

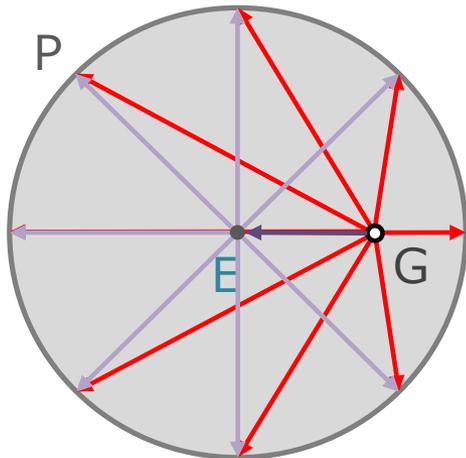


ベクトルの分解 $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$



ここからが松田卓也氏の巧みな分析3

- 地球の中心 E 、月の中心 M 、地球と月の重心 G
- 任意の点 P における遠心力加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例する。
- ベクトルの分解： $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$
- 海水を鉛直方向に動かす成分は \overrightarrow{EP}

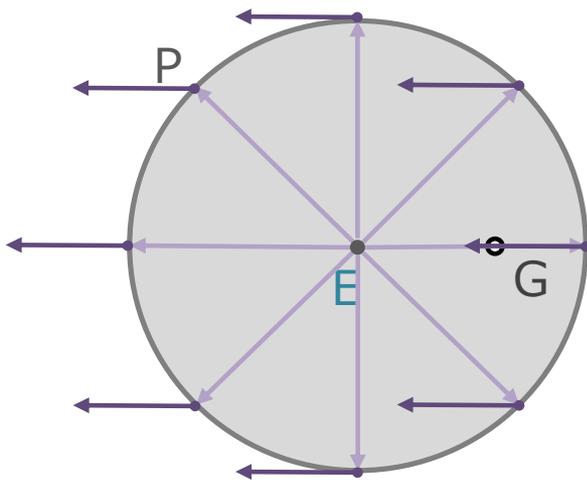


ベクトルの分解 $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$



ここからが松田卓也氏の巧みな分析4

- 地球の中心 E 、月の中心 M 、地球と月の重心 G
- 任意の点 P における遠心力加速度はベクトル \overrightarrow{GP} に比例する。
- ベクトルの分解： $\overrightarrow{GP} = \overrightarrow{GE} + \overrightarrow{EP}$
- 海水を鉛直方向に動かす成分は \overrightarrow{EP}
- 海水を月の反対方向に動かす成分 \overrightarrow{GE} は地球表面上で一定。
- ここまでの推論は、近似なしに、厳密に成り立つ。

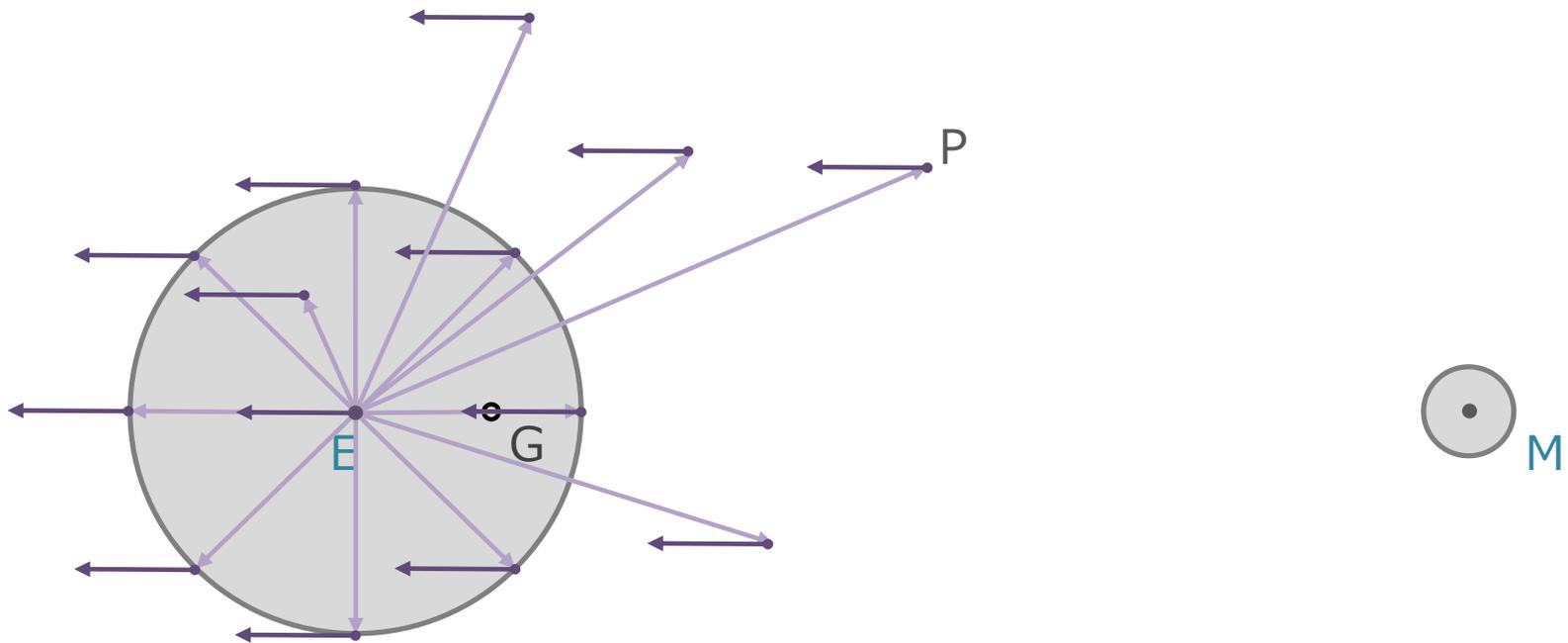


遠心力は、半径方向の成分と、月の反対向き成分とに分解される。



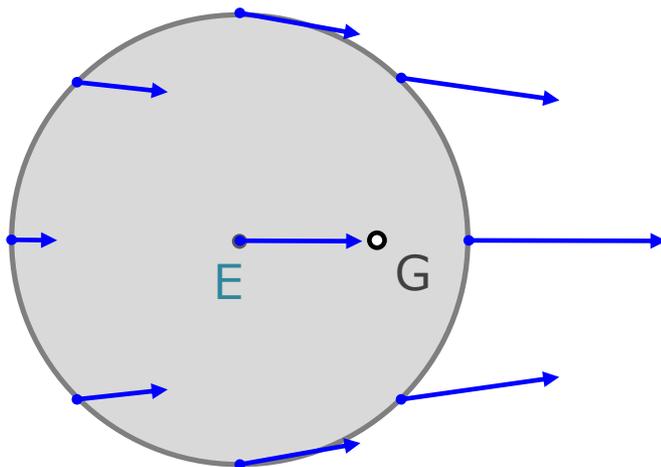
遠心力

- もっと一般的に言えば、あらゆる場所における遠心力加速度は、地球の中心からのベクトル \vec{EP} と、一定のベクトル \vec{GE} との和に比例する。
- 地球の中心も同じ遠心加速度 \vec{GE} を受けている。



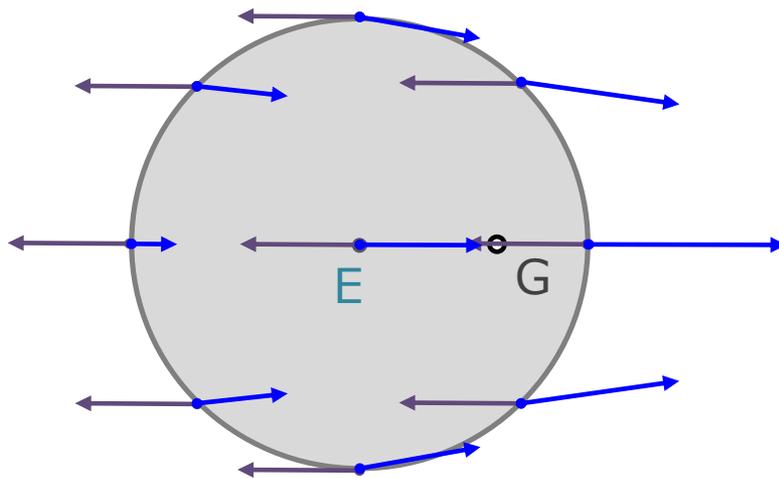
重力

- いわゆる万有引力の法則：各点に月が及ぼす重力は、月の中心を向き、大きさは距離の2乗に反比例する。
- 地球の半径に比べて月と地球の中心間の距離が十分に大きければ、地球表面上では、月が及ぼす重力の向きは一定で、その大きさは月からの距離の1次関数として変動する（1次近似）。



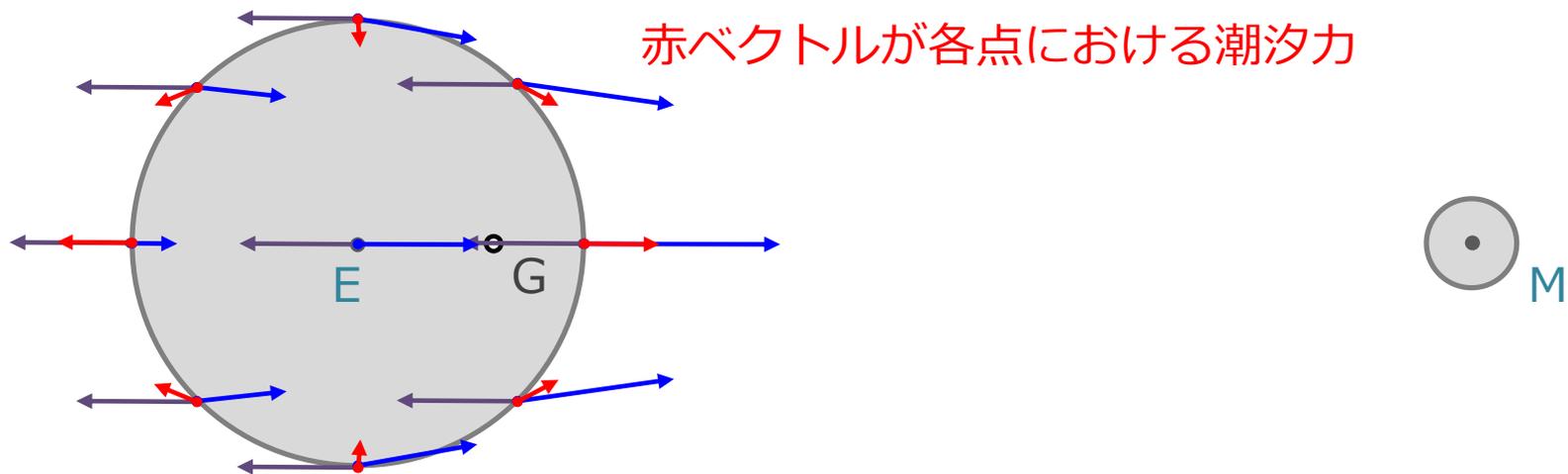
遠心力と重力

- 遠心力加速度の月から逃げる方向成分（一定ベクトル）と月が及ぼす重力加速度のベクトルとを重ねて書くと、こうなる。
- とくに地球の中心では、遠心力と重力が打ち消し合う。



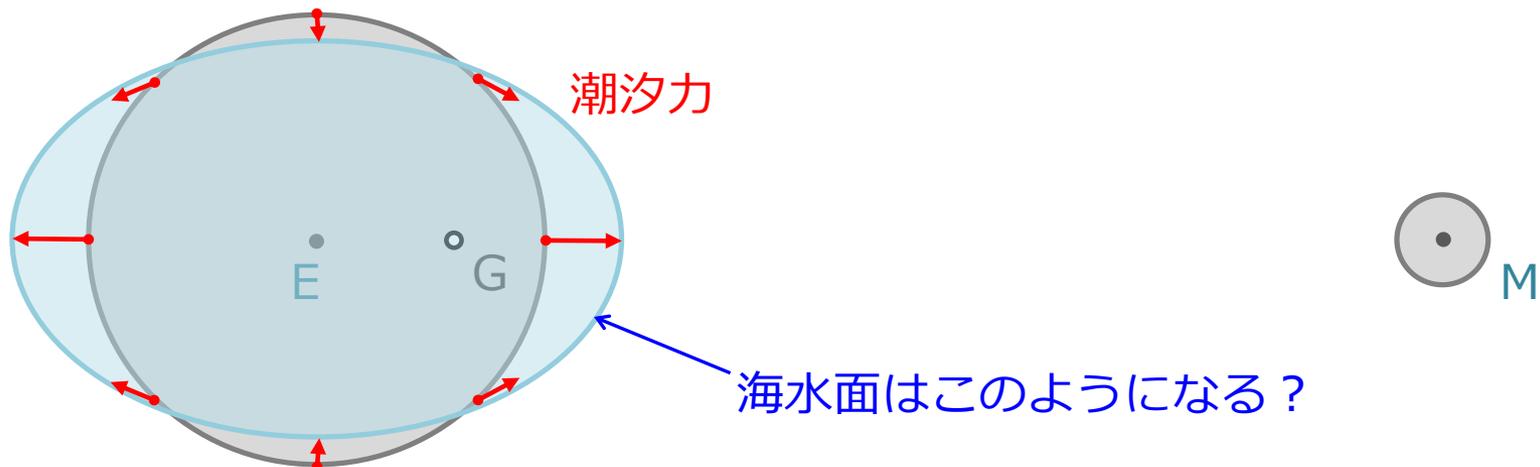
遠心力 + 重力 = 潮汐力！

- 遠心力加速度の月から逃げる方向成分（一定ベクトル）と月が及ぼす重力加速度のベクトルとを重ねて書くと、こうなる。
- とくに地球の中心では、遠心力と重力が打ち消し合う。
- 遠心力と重力の合力が潮汐力。
- 以上が、松田氏による謎解き。
- めでたしめでたし・・・と言いたいところだが・・・



月が昇ると満潮になる？

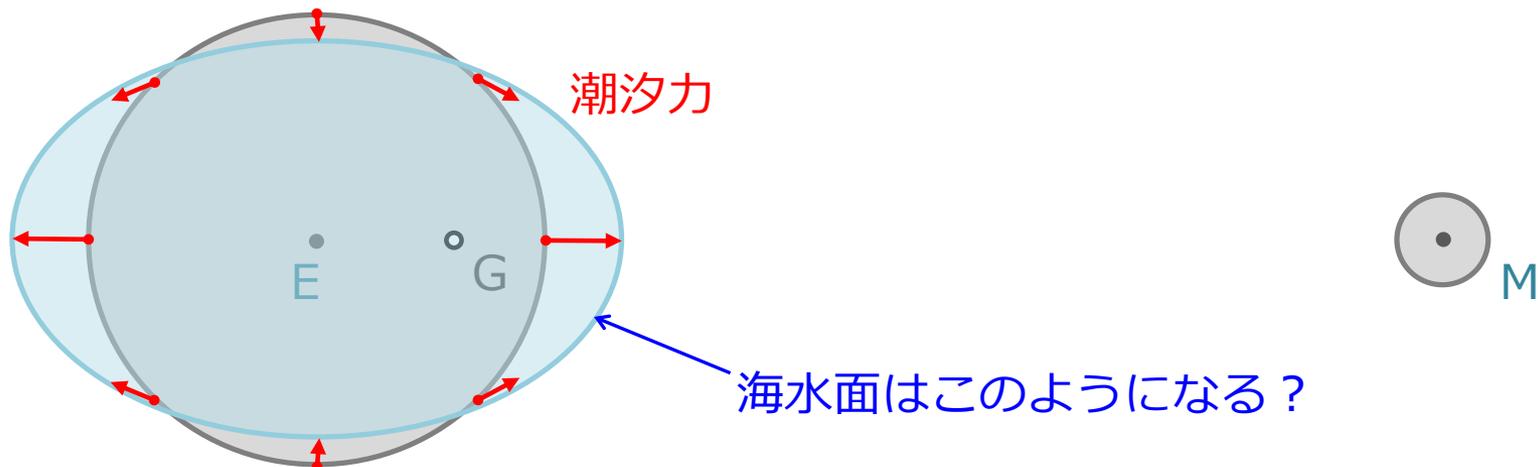
- この説明だと、月に面している側と反対側が満潮で、それに直交する面が干潮になるかのような印象を与える。
- 実際、松田氏の本を含め、ほとんどの本にそういう図が描かれている。



実際は・・・松山では

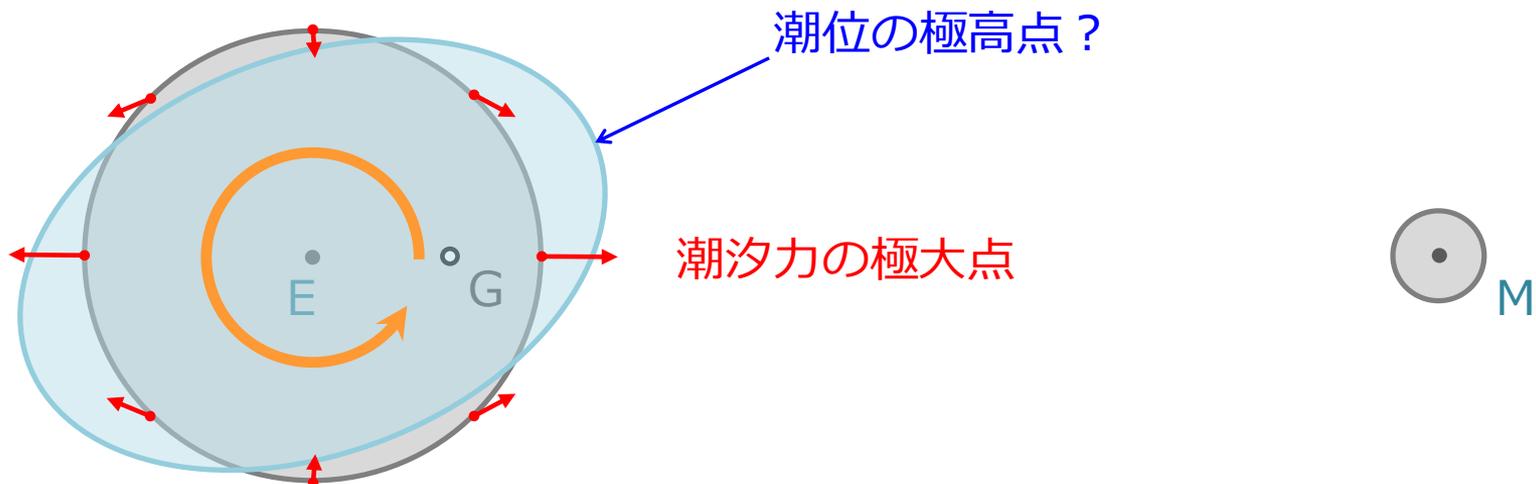
<http://www.data.jma.go.jp/kaiyou/db/tide/suisan/suisan.php?stn=MT>

- 気象庁は、いろいろな海岸における海面の高さの予測値をネットで発表している。そのデータは潮位表と呼ばれる。
- 2016年8月18日は満月だった。この日、松山市の港では、
- 8:45（潮位326cm）と 21:36（365cm）に満潮
- 3:00（107cm）と 15:00（27cm）に干潮
- 月が南中する時刻 0:00 に満潮になるわけではない。
- 瀬戸内海は潮流が複雑。



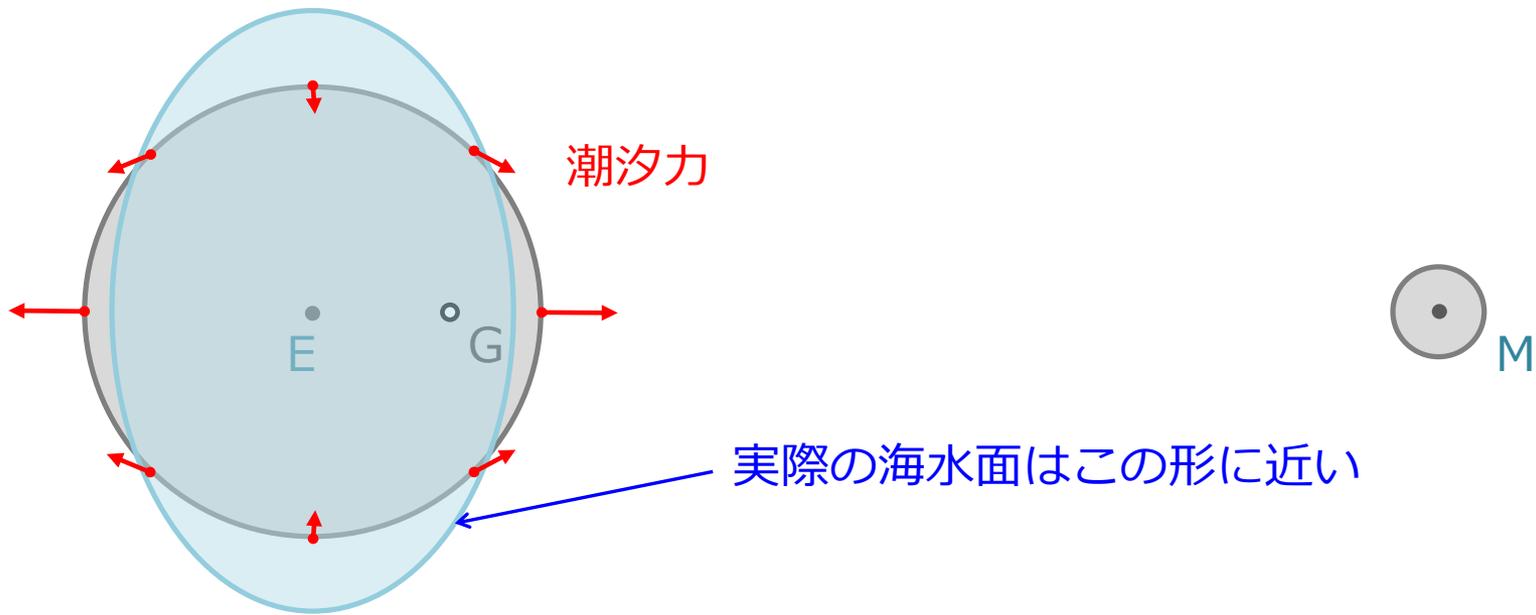
こういうことは予想できる

- 複雑な地形が海水の移動を妨げる効果はあるだろう。
- 地球は自転しているので、潮汐力が極大になる場所と、干満のピークが現れる場所は、ずれるかもしれない。



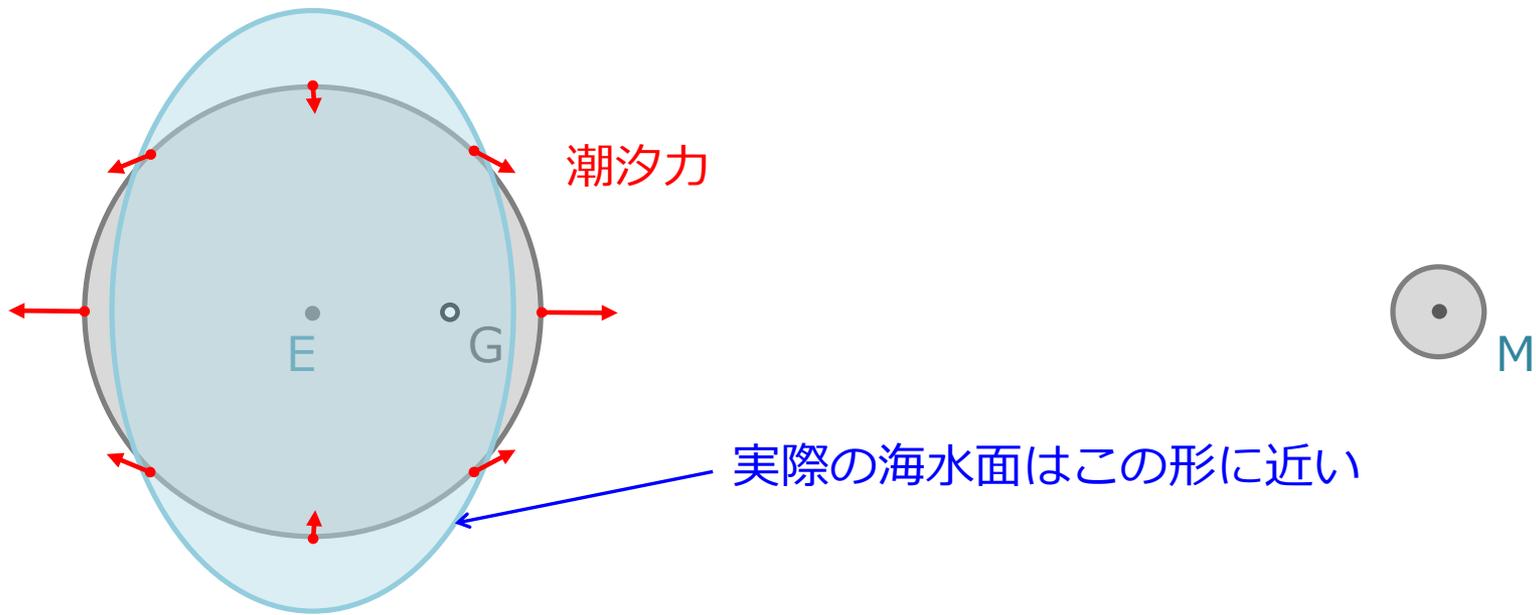
実際は・・・高知では

- 太平洋に面した港ではどうか？
- 2016年8月18日は満月だった。この日、高知市の港では、
- 5:22（潮位196cm）と 18:32（198cm）に満潮
- 11:58（19cm）と 0:15（73cm）に干潮
- 月が南中する時刻 0:00 付近に干潮になる。
- つまり、月が南の空に昇ると干潮、が正解。



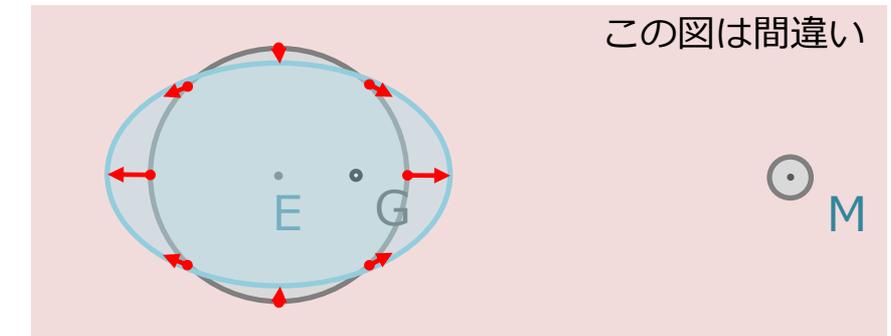
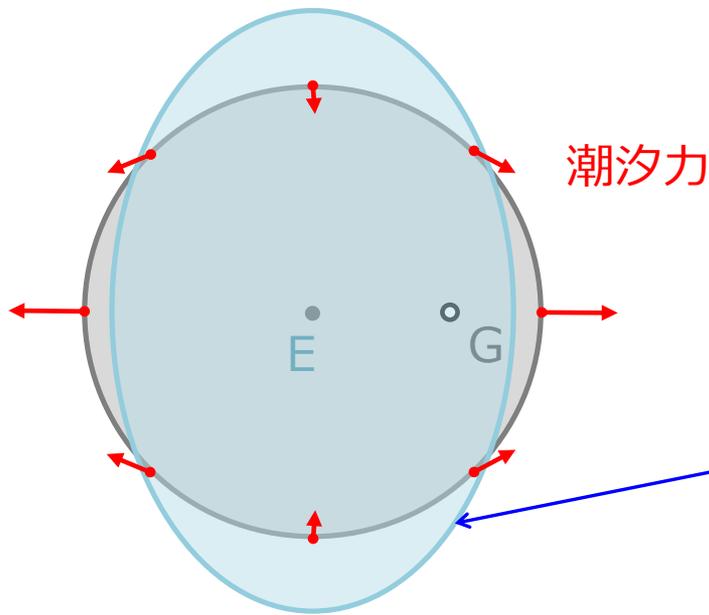
父島（小笠原諸島）では

- 太平洋に浮かぶ父島。絶海の孤島と言っていいでしょう。
- 2016年10月1日は新月。この日、父島では、
- 5:47（潮位119cm）と17:59（120cm）に満潮
- 23:40（39cm）と11:52（38cm）に干潮
- 月が南中する時刻 12:00 付近に干潮になる。
- つまり、月が南の空に昇ると干潮、が正解。



どうしてこうなるの？

- 月が南中すると干潮、が正解。
- 潮汐力と、実際の潮汐は位相がずれている。
- しかし、正しい図が描かれている解説書は、私が探した限り皆無であった。
- さて、どうしてこのようなずれが生ずるのか？



実際の海水面はこの形に近い

簡単なモデル

(これが今回のトークの中で唯一の谷村オリジナルの部分)

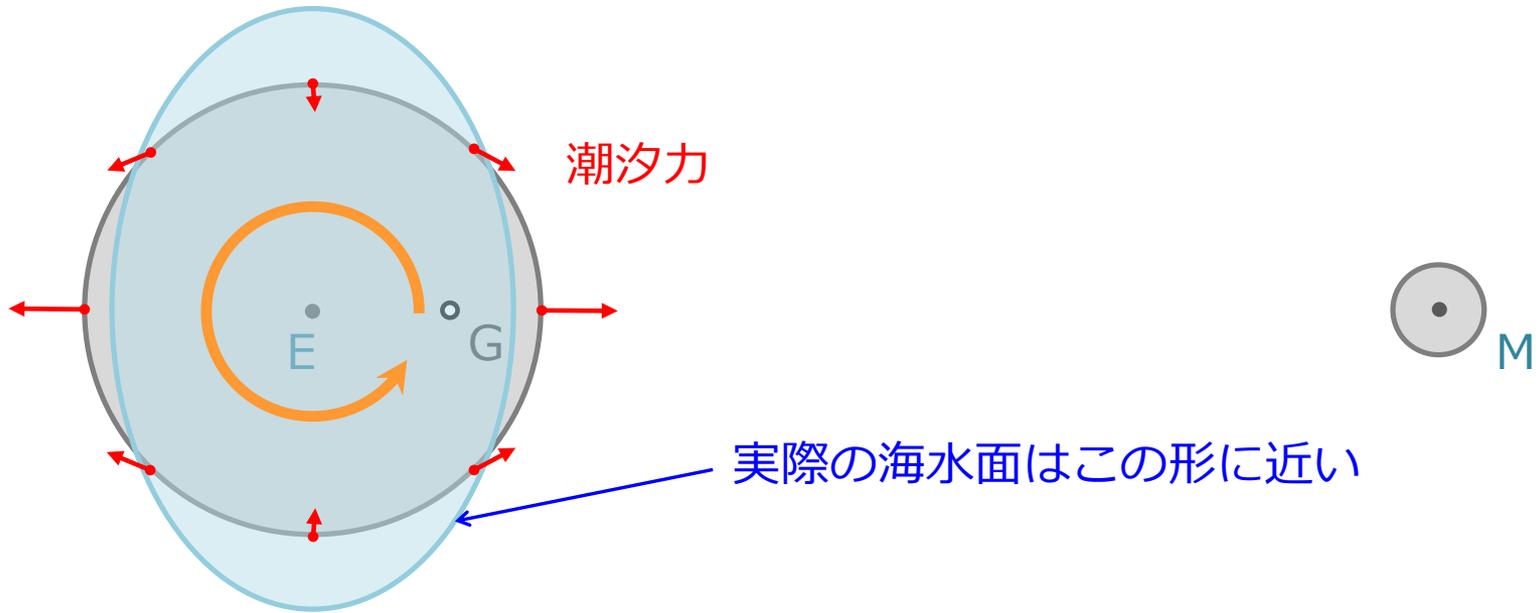
- 地球の自転を考慮
- 海面の上下運動だけが周期的外力で揺さぶられるというモデル：

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = f(t) = f_0 \cos \omega t$$

積分すると、

$$z(t) = -\frac{f_0}{m\omega^2} \cos \omega t$$

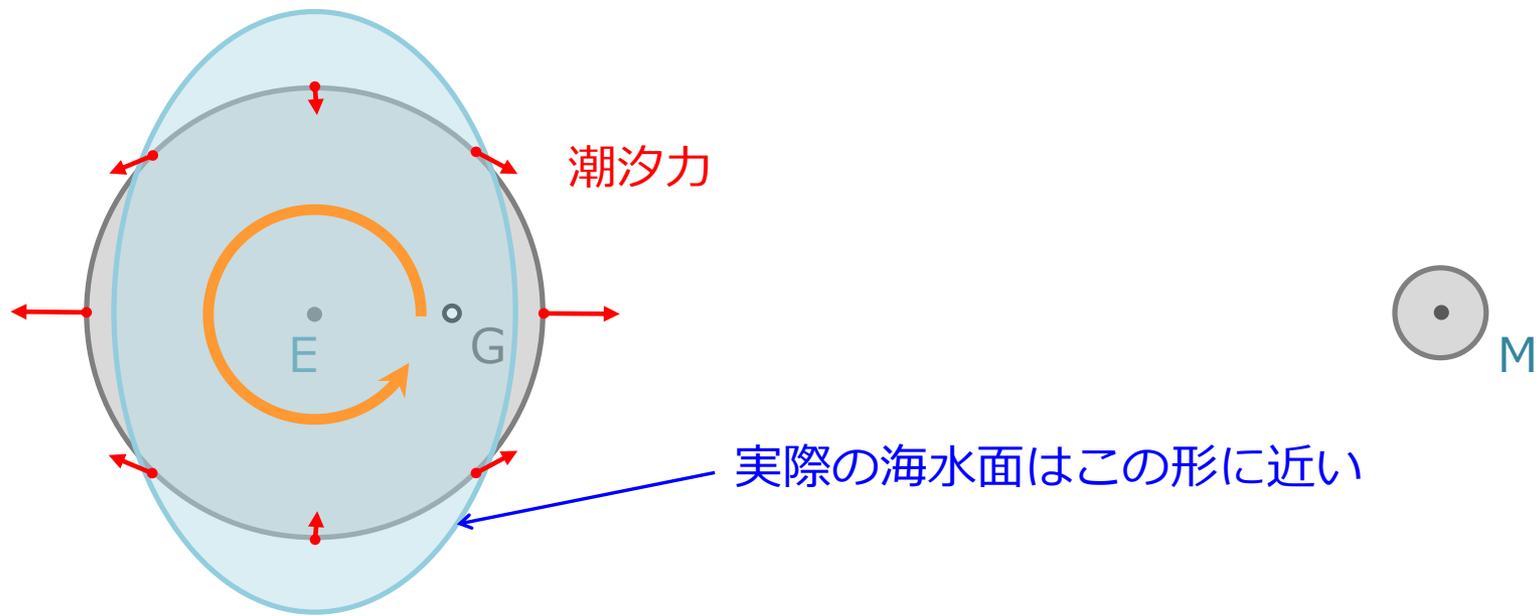
- 潮汐力と潮汐は位相が逆転。



現実には・・・

潮汐に影響する要因が多数ある：

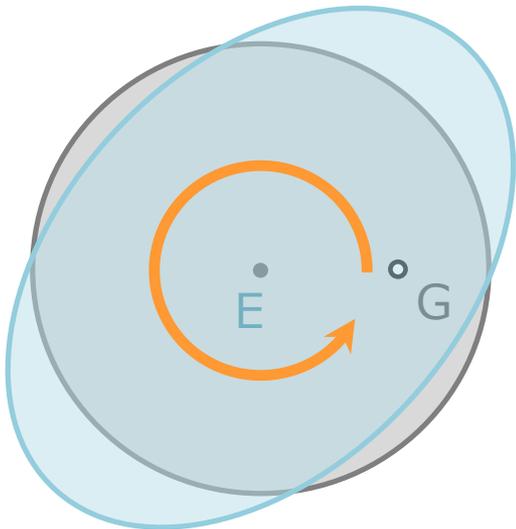
- 太陽の影響
- 地球の自転によるコリオリ力
- 海底の形、海岸線の形、海流、海水の鉛直方向の運動
- 月の公転面と地球の自転軸との傾き、楕円軌道
- 風、波浪、大気圧の変化、海水密度の非一様性・・・など



ハワイでは

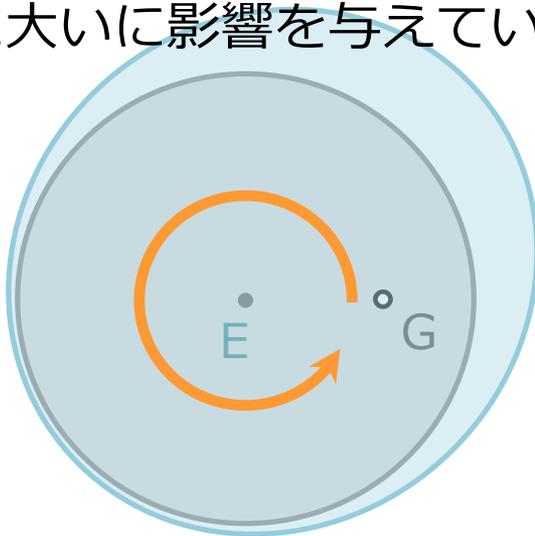
<http://tides.mobilegeographics.com/calendar/year/2602.html>

- 太平洋に浮かぶハワイ島ではどうか？
- 2016年9月30日は**新月**。この日、**ハワイ・オアフ島**では、
- 3:42（潮位1.7ft）と 15:41（1.7ft）に満潮
- 9:42（0.4ft）と 21:53（0.2ft）に干潮
- 月が南中する時刻 12:00 よりも 3時間40分遅れて満潮になる！
- この謎を谷村は解明していない。



その他

- オホーツク海沿岸や日本海沿岸では干満の差は小さく、引き潮・満ち潮が1日に1回しか明確に観測できない場所・時期もある。
- 潮汐力と潮位とのずれは、水深にも依存している（浅いと逆位相、深いと同位相になる）。
- これらの原因は、地球物理的には説明がついている（永田・彦坂・宮崎『海洋物理Ⅲ』などを参照）。
- 惑星や衛星の内部にも潮汐力は及んでおり、天体内部のダイナミクスに大いに影響を与えている。



今日、用意してきた話題は
だいたい終わりましたが・・・

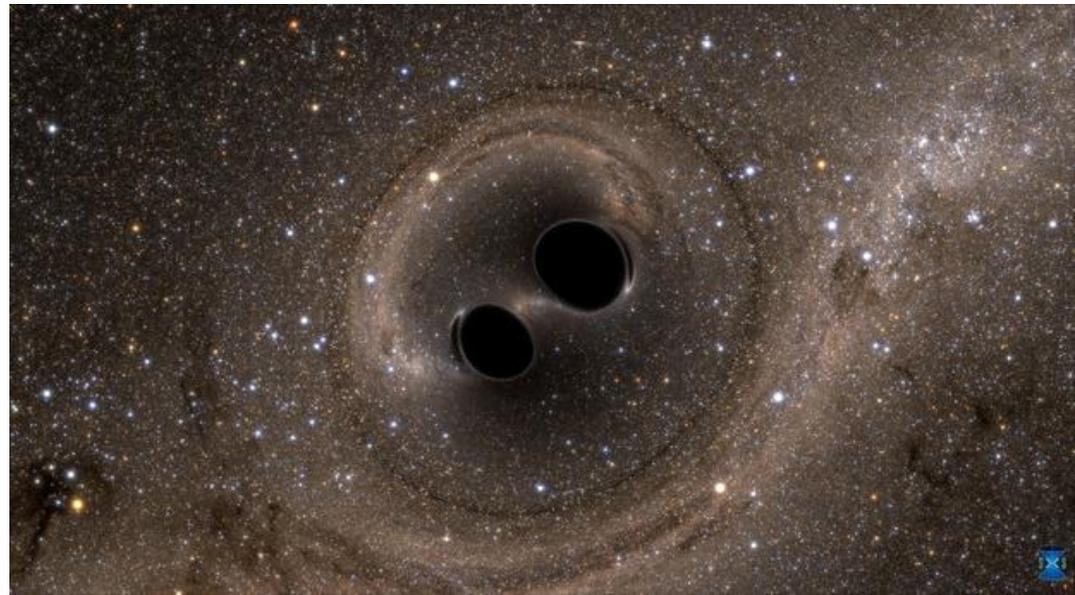
潮汐力に関して、もう一つ面白い話題があるので、そちらにも触れます。

- 重力波

重力波

- gravitational wave, gravitational radiation
- 時空のひずみ（伸縮）が光速で伝わる波動
- 1916年、アインシュタインが一般相対性理論にもとづいて、その存在を予測
- 1974-79年、ハルスとテイラーが中性子星連星の公転周期の変化（重力波の間接的証拠）を発見（1993年にノーベル賞）
- 2015年、LIGOプロジェクトがブラックホール連星の合体で生じた重力波を直接観測

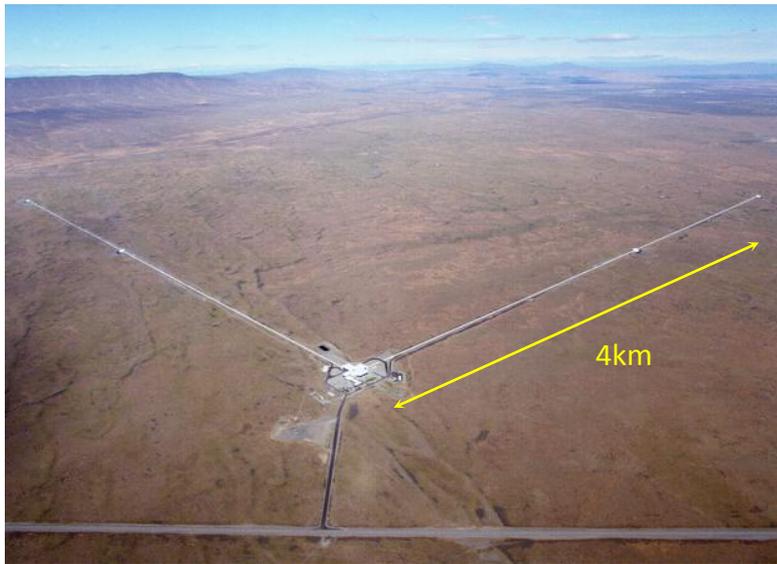
<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20160211d>



LIGO

= Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory

- 巨大なマイケルソン型の干渉計を2箇所設置
- x方向とy方向の腕の伸縮の差を検出する
- 2015年9月14日と12月26日に、ブラックホール連星の衝突合体から生じたと見られる重力波を検出



LIGO Hanford, USA

<http://www.geekwire.com/2016/after-gravitation-wave-rumors-its-getting-close-to-go-time-for-advanced-ligo-results/>

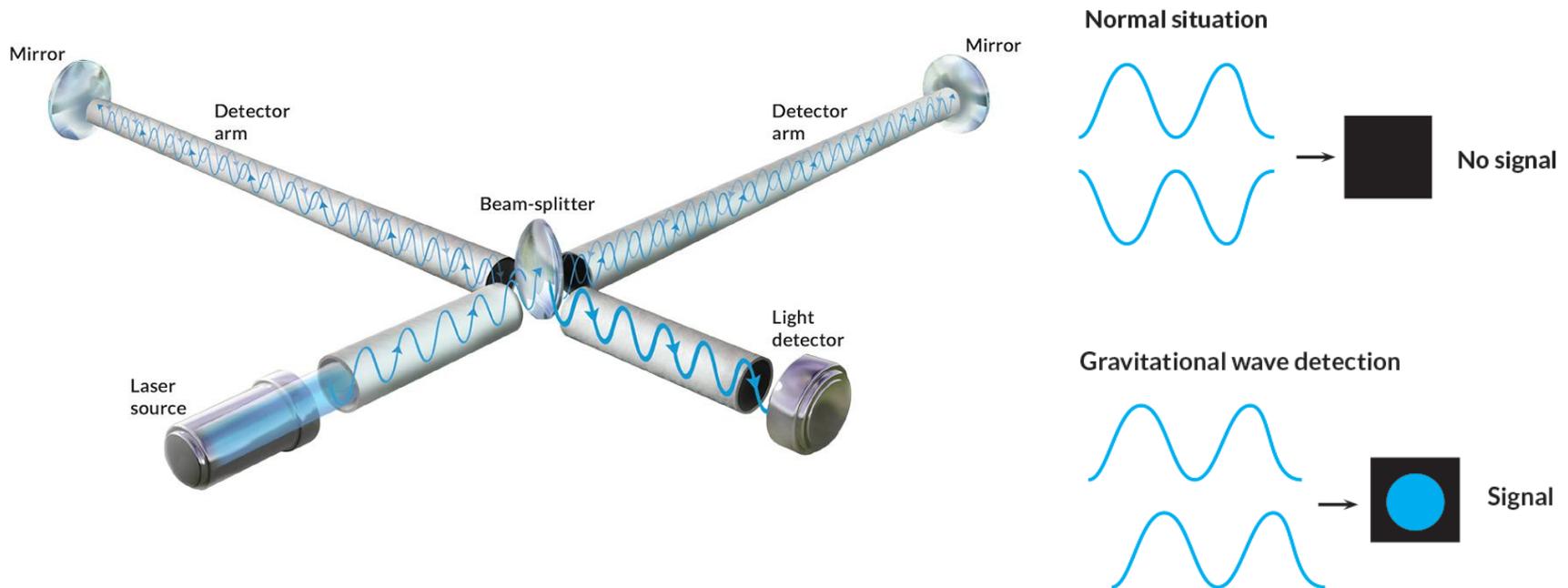


LIGO Livingstone, USA

<https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-ligo>

LIGOに関する素朴な疑問

重力波は x 方向と y 方向の干渉計の腕を潮汐力で伸縮させる。干渉計は、この腕の長さの変化を干渉の変化として検出すると言うが、干渉計の腕の長さが伸縮するのと同様に、光の波長も伸縮するから、重力波が来ても干渉効果には何の変化も生じないのではないか？



LIGOに関する素朴な疑問に対する答え

- 干渉計の腕の長さが伸縮するのと同様に、光の波長も伸縮するから、重力波が来ても干渉効果には何の変化も生じないのではないか？
- この疑問に対して答えている英語の論文やブログはたくさんある。
- 結論としては、干渉計の腕は伸び縮みするが、光の波長は伸び縮みせず、重力波は干渉の変化として観測されるはずだ、という答えになっている。
- しかし、答えの論理の厳密さはピンキリで、「本当に正しい説明」があるのか、よくわからない。

答え 1

- Peter R. Saulson, *If light waves are stretched by gravitational waves, how can we use light as a ruler to detect gravitational waves?* American Journal of Physics **65**, 501 (1997) による説明
- 重力波の波長は 1000km のオーダー
- 干渉計の腕の長さは 4km
- 重力波も光速
- したがって、光が干渉計の腕を往復する間に腕の伸縮はほとんど起きていない。
- ちなみに宇宙背景輻射は、宇宙膨張と同じ時間スケールで伝達するので、宇宙膨張に比例して背景輻射の波長も伸びる。

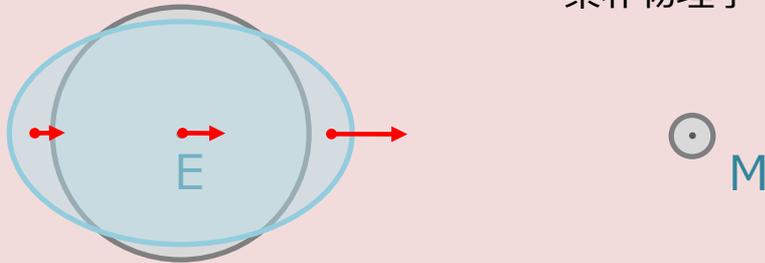
答え 2

- V. Faraoni, *A common misconception about LIGO detectors of gravitational waves*, *General Relativity and Gravitation* **39**, 677 (2007) による説明
- 干渉計の鏡は massive particle の測地線に沿って動く。
- 光は massless particle であり、light-like (null)測地線に沿って動き、その運動量ベクトルは測地線に沿って平行移動される。
- つまり、干渉計の鏡の運動と、光の波長の変化を決める方程式はまったく別ものであり、それらをちゃんと解くと、重力波の計量の伸縮に比例して鏡は動くが、光の波長はほとんど変化しないことがわかる。
- たぶん、これが一般相対論に忠実な答え。しかし、光を電磁波として扱うのではなく massless particle として扱っているので、場の理論としての一貫性に欠ける。

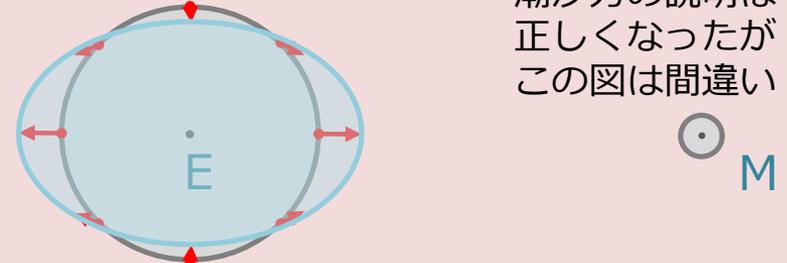
まとめ

- 素朴物理学は、正統派物理学者から見れば、笑いものであることがある。
- しかし、素朴物理学を正そうとする正統派物理学者の答えですら、完璧ではないことがあり、学習者を中途半端にわかったつもりにさせていることがある。

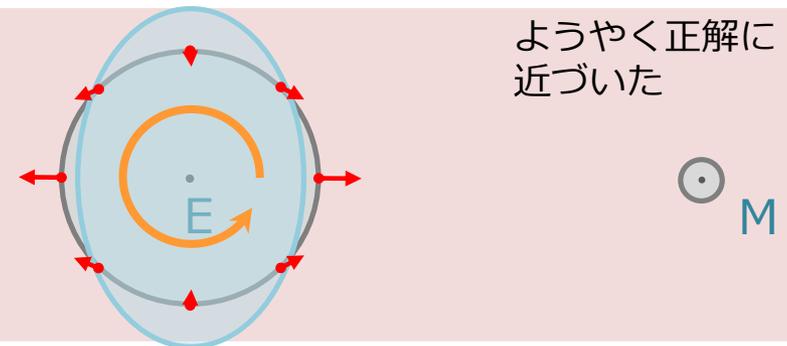
素朴物理学



潮汐力の説明は正しくなったがこの図は間違い



ようやく正解に近づいた



まとめ

- 素朴物理学は、正統派物理学者から見れば、笑いものであることがある。
- しかし、素朴物理学を正そうとする正統派物理学者の答えですら、完璧ではないことがあり、学習者を中途半端にわかったつもりにさせていることがある。
- 考え得ることが漏れなく考えられていて、本質的な部分が絞りこまれていて、一貫性があるストーリーになっていて、しかも気づいていなかった事実をも気づかせてくれる説明が「よい説明」になるのだと思われる。
- 何事においても、わかったつもりになって慢心せず、修正を受け入れる態度と、建設的懐疑心が大切だと思われる。

ご清聴、ありがとうございました

参考文献

1. [松田卓也「ファインマンも間違った潮汐力」第二回科学交流セミナー, 2009年6月22日, 京都大学基礎物理学研究所](#)
2. 松田卓也『間違いだらけの物理学』学研教育出版 (2014)
3. 潮汐力と遠心力を巡るよくある誤解 ([基礎科学研究所 科学の散歩道](#))
4. S. Weinberg, "To Explain the World" Harper (2015)
5. ファインマン『物理法則はいかにして発見されたか』ダイヤモンド社(1968)
6. 潮汐のしくみ ([気象庁ウェブページ](#))
7. 潮位表 ([気象庁ウェブページ](#))
8. 中野猿人『潮汐学』 (古今書院) (1940)
9. 永田豊・彦坂繁雄・宮崎正衛『海洋物理Ⅲ』 (東海大学出版会) (1971)
10. [半田利弘「潮汐力は共通重心周りの遠心力で起こるのではない」](#) (天文教育)
11. [樋山克明「潮汐と自転による天体の変形およびそれを用いた衛星の内部構造の推定について」](#) (北海道大学)
12. [池田幸夫・酒井啓雄・古川博「高校地学教科書における潮汐現象の説明とその問題点」](#) (科教研報)

谷村の目から見て、間違いが目立たない (おそらく正しい) のは、7, 8, 9, 11, 12.