

潮汐力から理解するリーマン曲率

～時空の曲がりを直感的に～



自己紹介

- 真名海さめ
 - 🌸 VRChat物理学集会の主催
 - 🎓 社会人学生として通信制大学在学中
- 得意分野：
 - 📷 コンピュータビジョン (画像認識 / 点群処理)
 - 🌐 空間情報処理 (地理情報 / リモートセンシング)
 - ☁️ クラウドインフラ設計 / IaC (AWS, GCP)
- 学生時代は地球物理学を専攻
- 地球観測技術のエンジニアとして活動中



今日話すこと

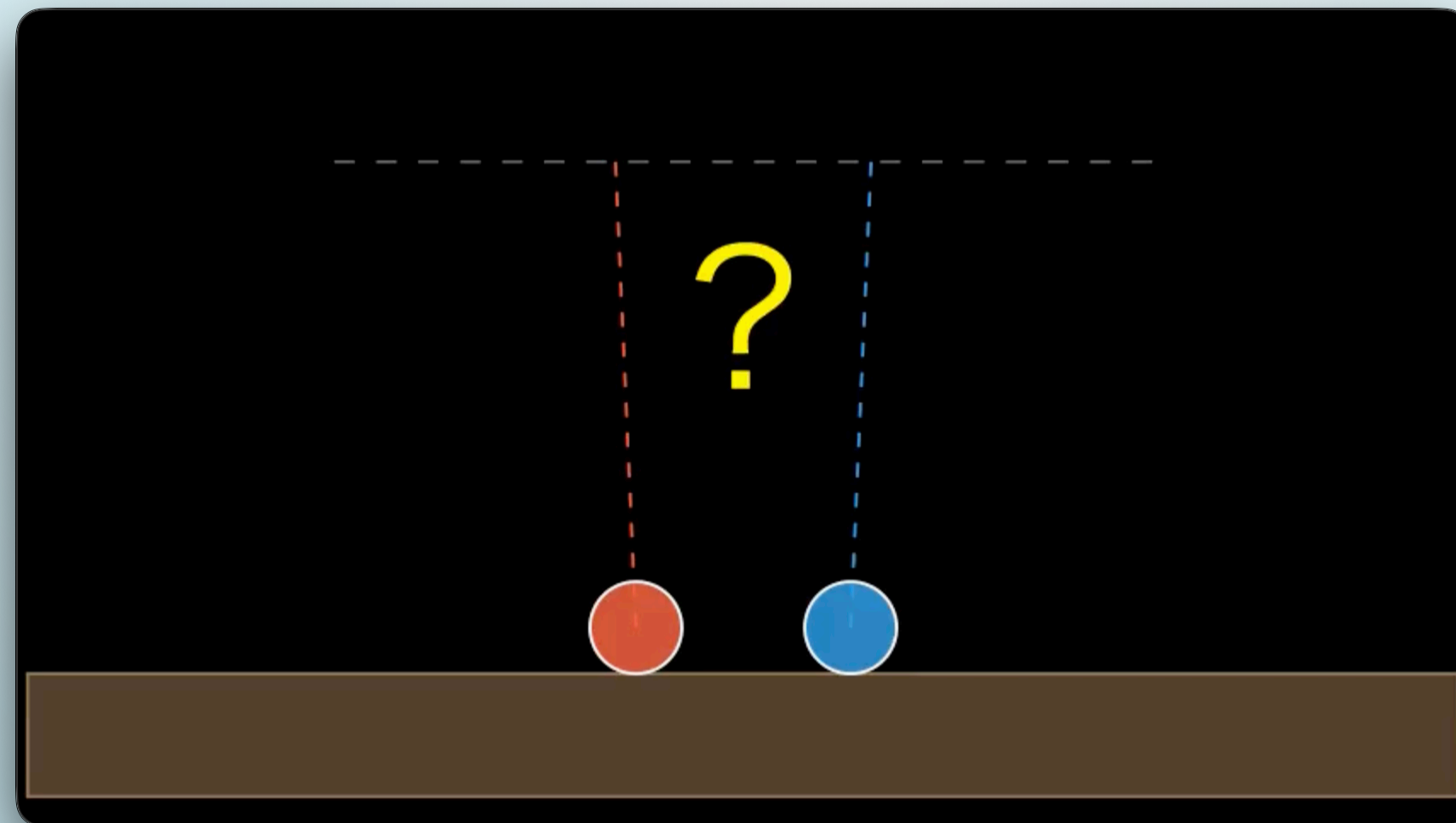
- 2つのボールを落とす思考実験から始めて...
- **等価原理** — 重力と加速度の関係
- **潮汐力** — 自由落下しても消せない「本物の重力」
- **リーマン曲率** — 時空の曲がりの数学的記述
- **平行移動** — 曲がった空間での不思議な現象

※ 共変微分やクリストッフェル記号は使わず、直感的に理解していきます

重力で体が引き伸ばされる？

2つのボールを落としたら？

- 2つのボールを横に並べて同時に落としたら？
- 平行に落ちてぶつからない？
- 厳密にはちよつと違う！
- 一般相対論の核心「**時空の曲がり**」の影響



あなたの体は伸びている？

- 頭と足では地球の中心からの距離がわずかに違う
- 足の方が地球に近い → ほんの少し強い重力
- その結果、体は**縦に少し引き伸ば**されている



この「引き伸ばし」を生む **時空の曲がり** と **潮汐力** が一般相対論の核心

等価原理

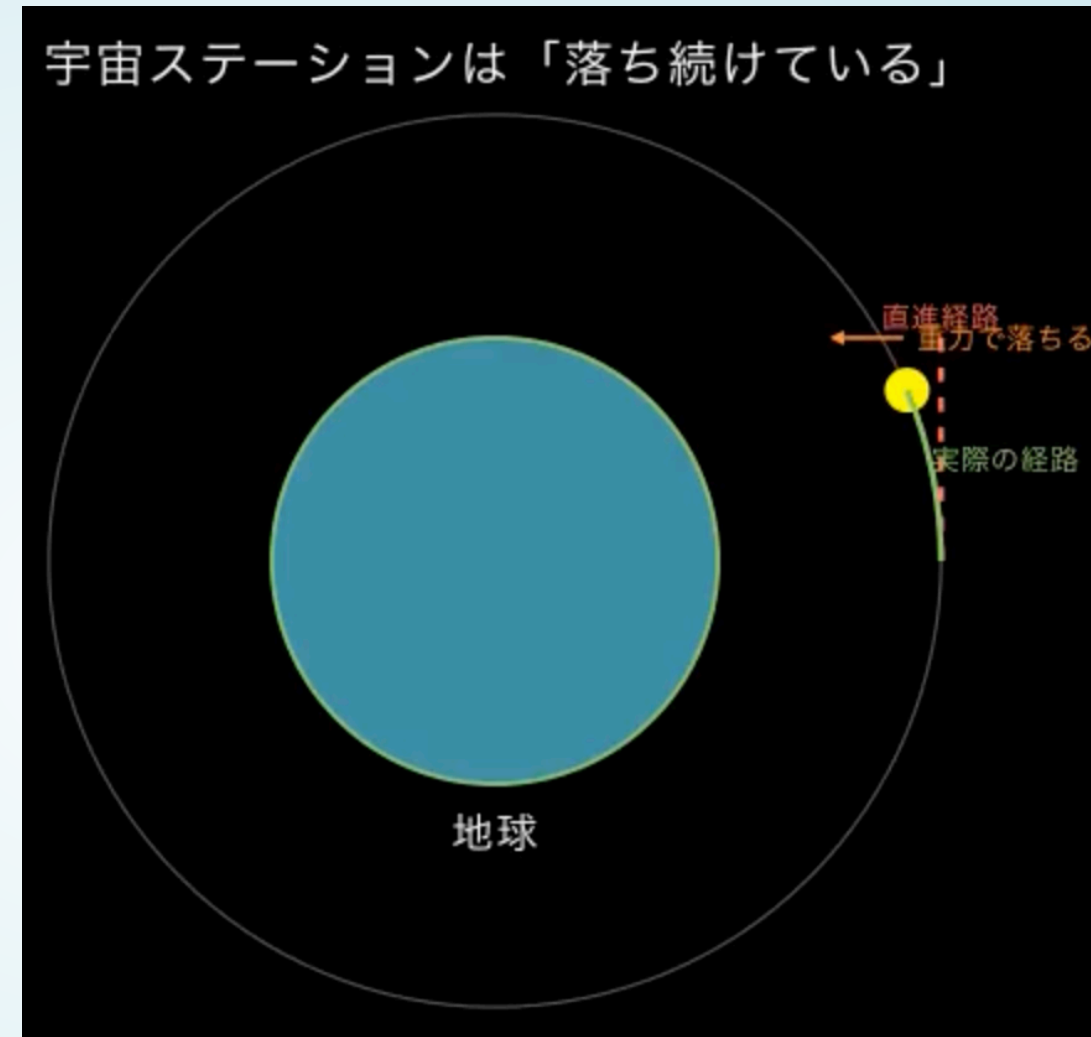
重力ってそもそも何？

- 飛行機に乗っていて突然エンジンが止まったら？
- 自由落下する飛行機の中 → **無重力状態**を体験



宇宙ステーションの「無重力」

- 宇宙飛行士が浮いているのも同じ原理
- 宇宙ステーションは地球の周りを**落ち続けている**
- 中の人**は重力を感じない**
→ 無重力状態



自由落下している人にとって、「**重力は消えた**」ように感じられる

等価原理

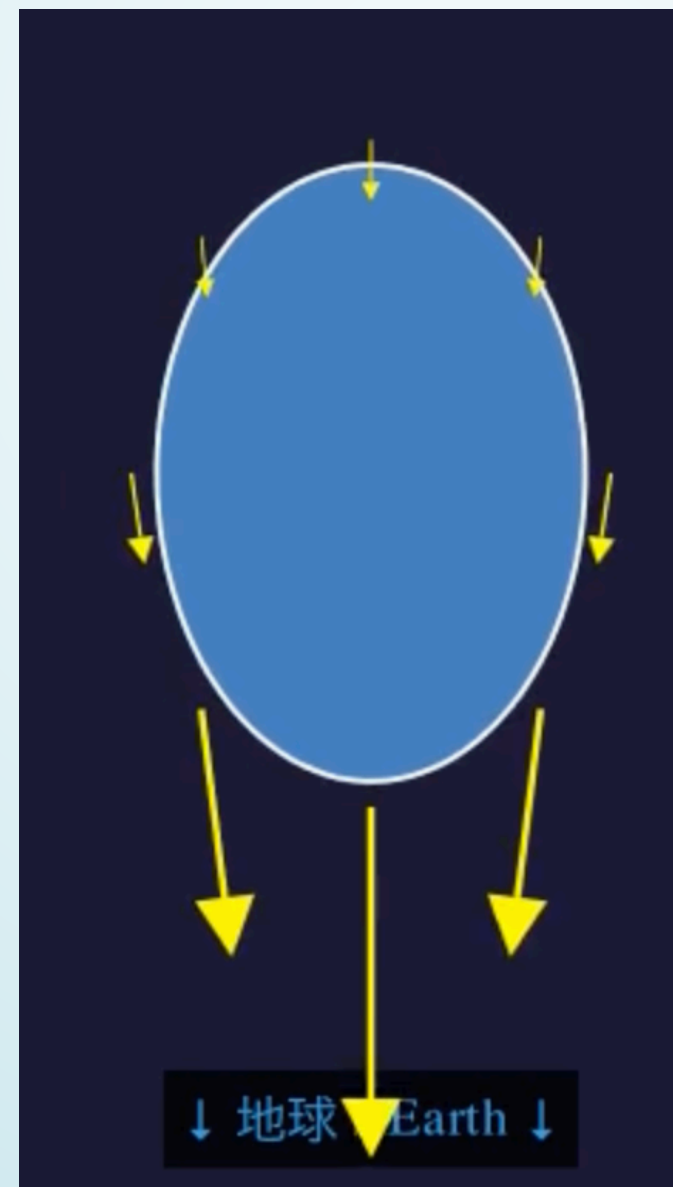
- 落ちている飛行機の中？宇宙空間？
- → 区別することができない！



等価原理: 重力と加速度は局所的には区別できない

消せない「本物の重力効果」

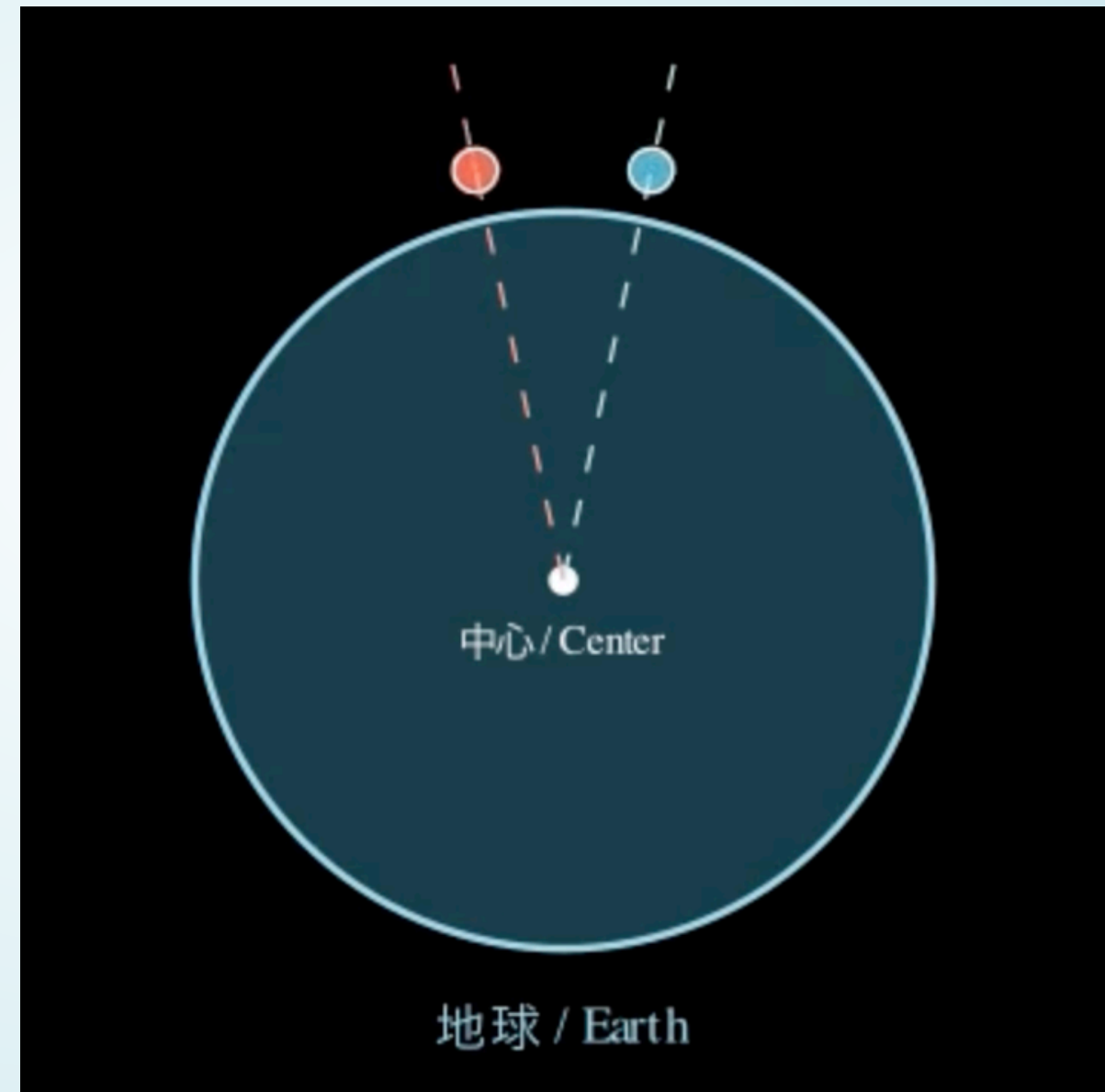
- 自由落下で消せるなら重力は本当に存在するの？
- 自由落下では消せない「**本物の重力効果**」がある
- それが **潮汐力**



自由落下するボールから
潮汐力を考える

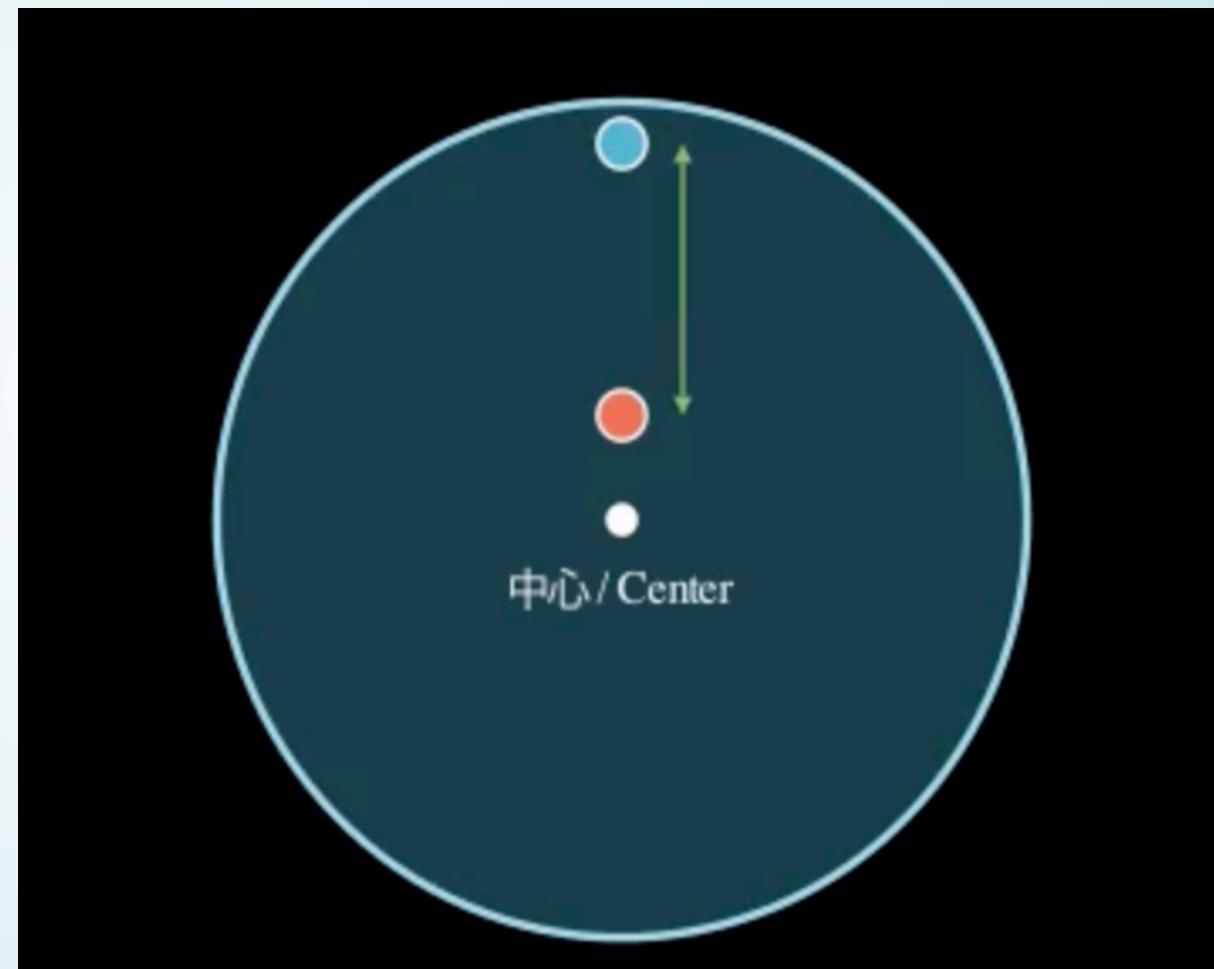
2つのボール — 横に並べて落とす

- 2つのボールを横に並べて地球に向かって落とす
- 平行に落ちていつまでもぶつからない？
- **いいえ！** — 地球は丸い
- 重力は地球の**中心**に向かって働く
- → 2つのボールは少しずつ近づいていく



2つのボール — 縦に並べて落とす

- 2つのボールを縦に並べて落とす
- どちらが速く落ちる？ → **下のボール**
- 地球に近い方がより強い重力を受ける
- → 2つのボールは落下しながら少しずつ**離れていく**



落下する飛行機の中から見ると？

- ボールは浮いて見える
- でも横に並べたボールは近づいていく
- 縦に並べたボールは離れていく
- **無重力のはずなのにボールが勝手に動く！**



潮汐力とは？

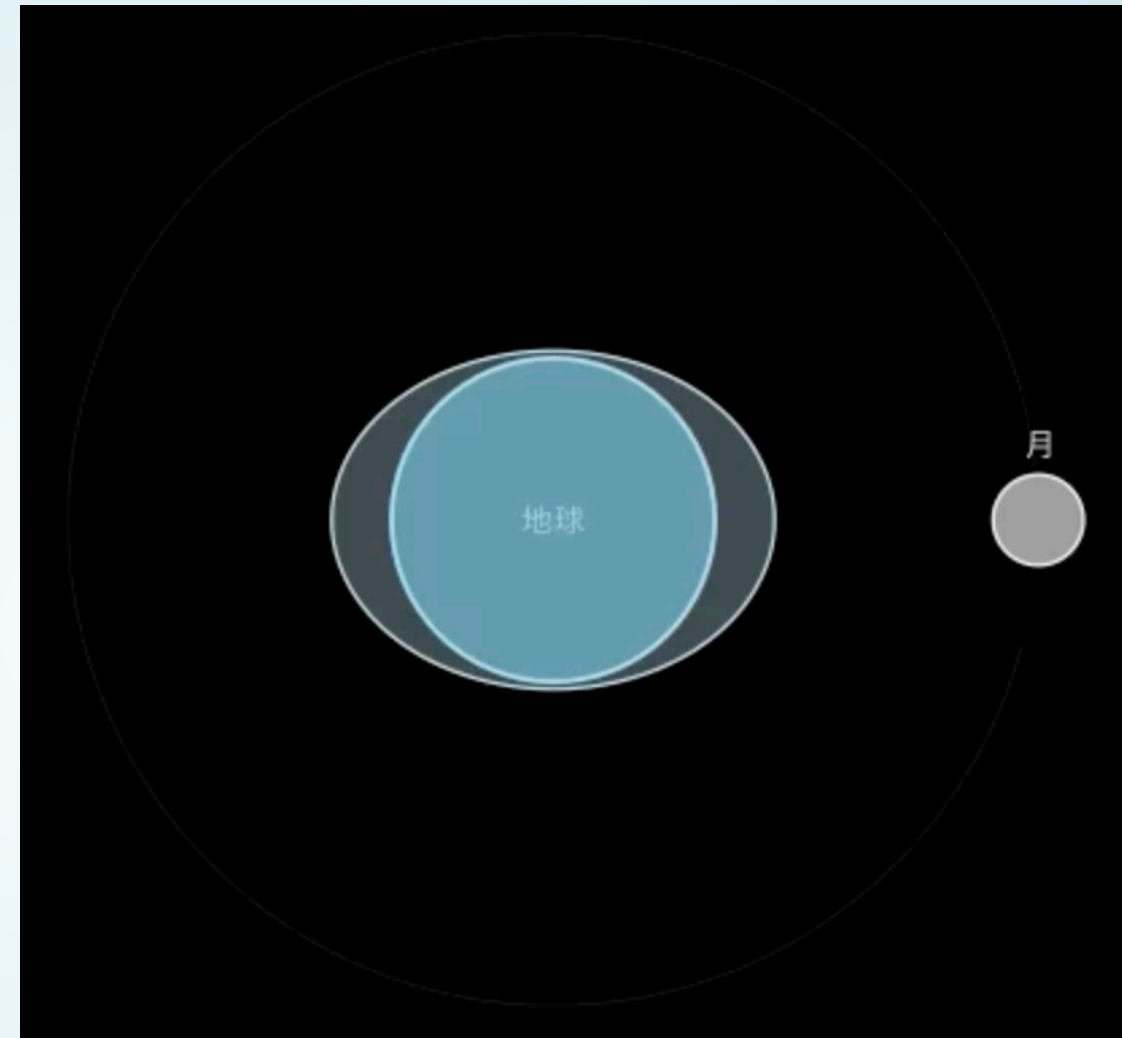
- 潮汐力は重力が場所によって違うことで生じる
- 自由落下しても消すことができない重力効果

- これこそが **潮汐力**
 - 重力が場所によって違うことで生じる、自由落下しても消すことができない重力効果

潮汐力の身近な例

潮の満ち引き

- 地球が受ける月の重力は、月に近い側と遠い側で**強さが違う**
- その差が海水を引っ張って潮の満ち引きを起こす



潮汐力が「**本物の重力効果**」！

● スパゲッティ化

- ブラックホールの近くでは頭と足で受ける重力の差がとてつもなく大きい
- スパゲッティみたいに引き伸ばされてしまう



重力 = 時空の曲がり = 潮
汐力

潮汐力 = 時空の曲がり

- さっきの2つのボールの実験を思い出すと.....
 - 横 → 近づく、縦 → 離れる
- 自由落下する飛行機の中で「無重力なのにボールが動く」
- **これこそが時空の曲がり**



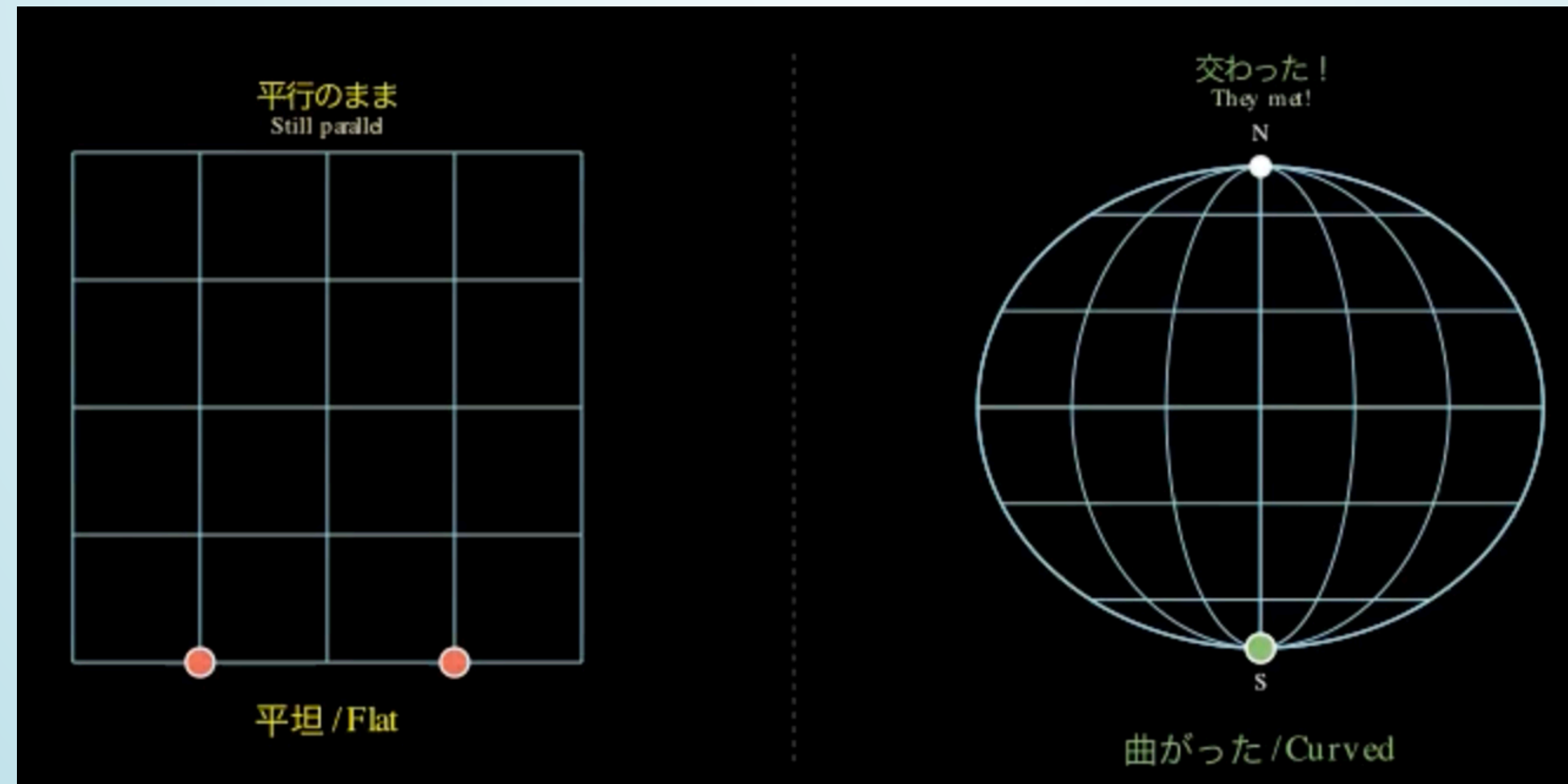
平らな空間 VS 曲がった空間

平らな空間

- 平行線はどこまでいっても平行のまま

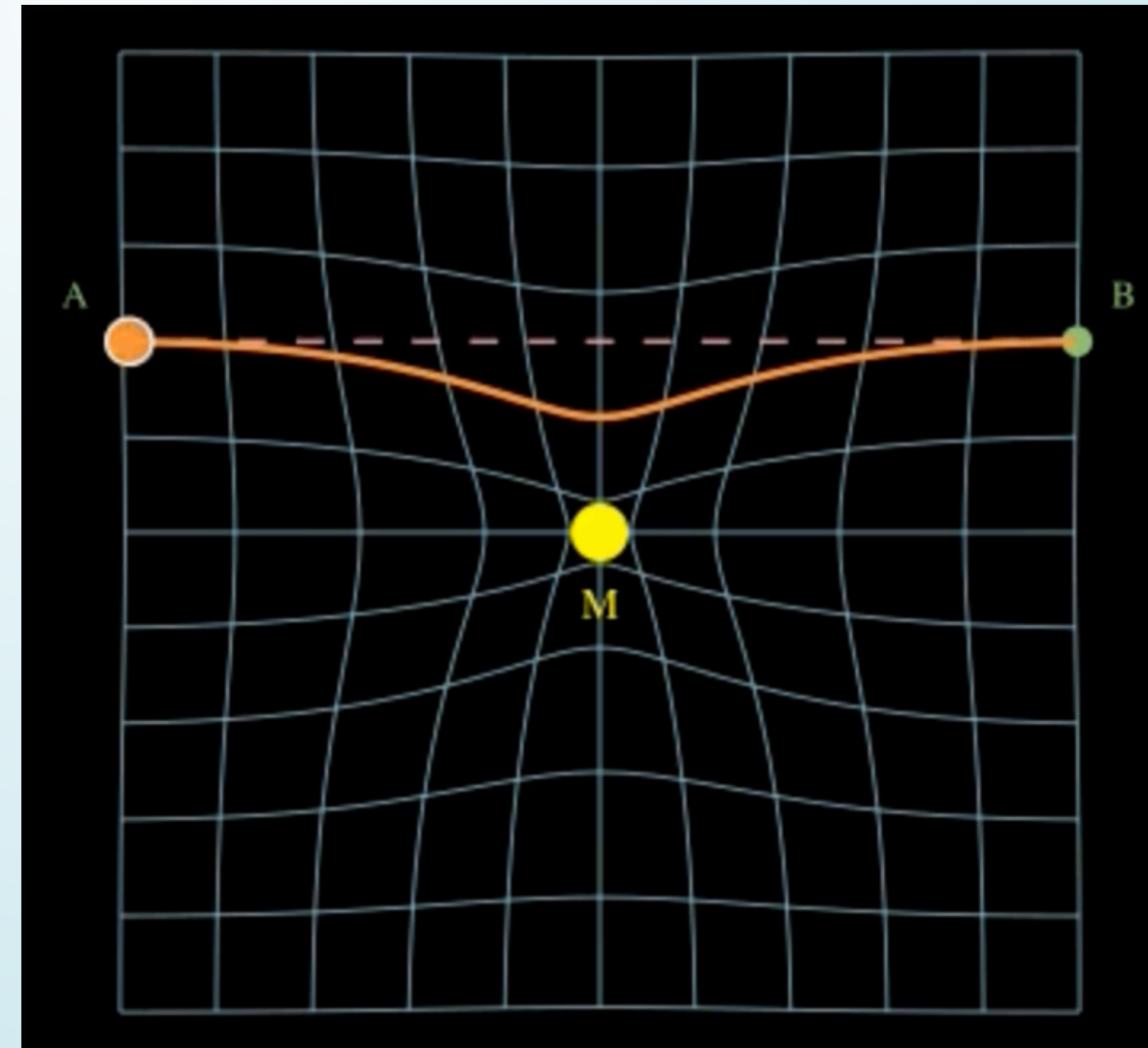
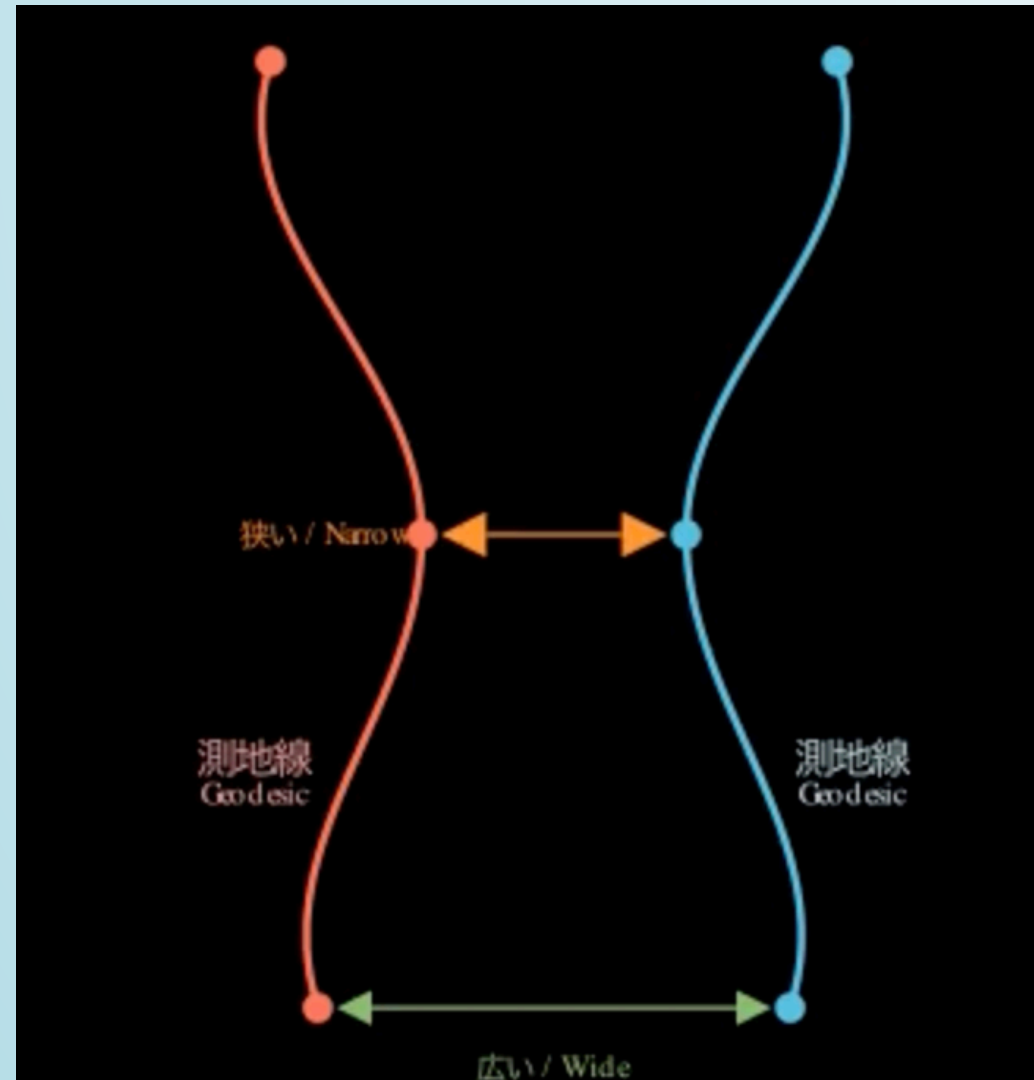
曲がった空間

- 平行線が近づいたり離れたりする
- 丸い地球がまさに身近な例



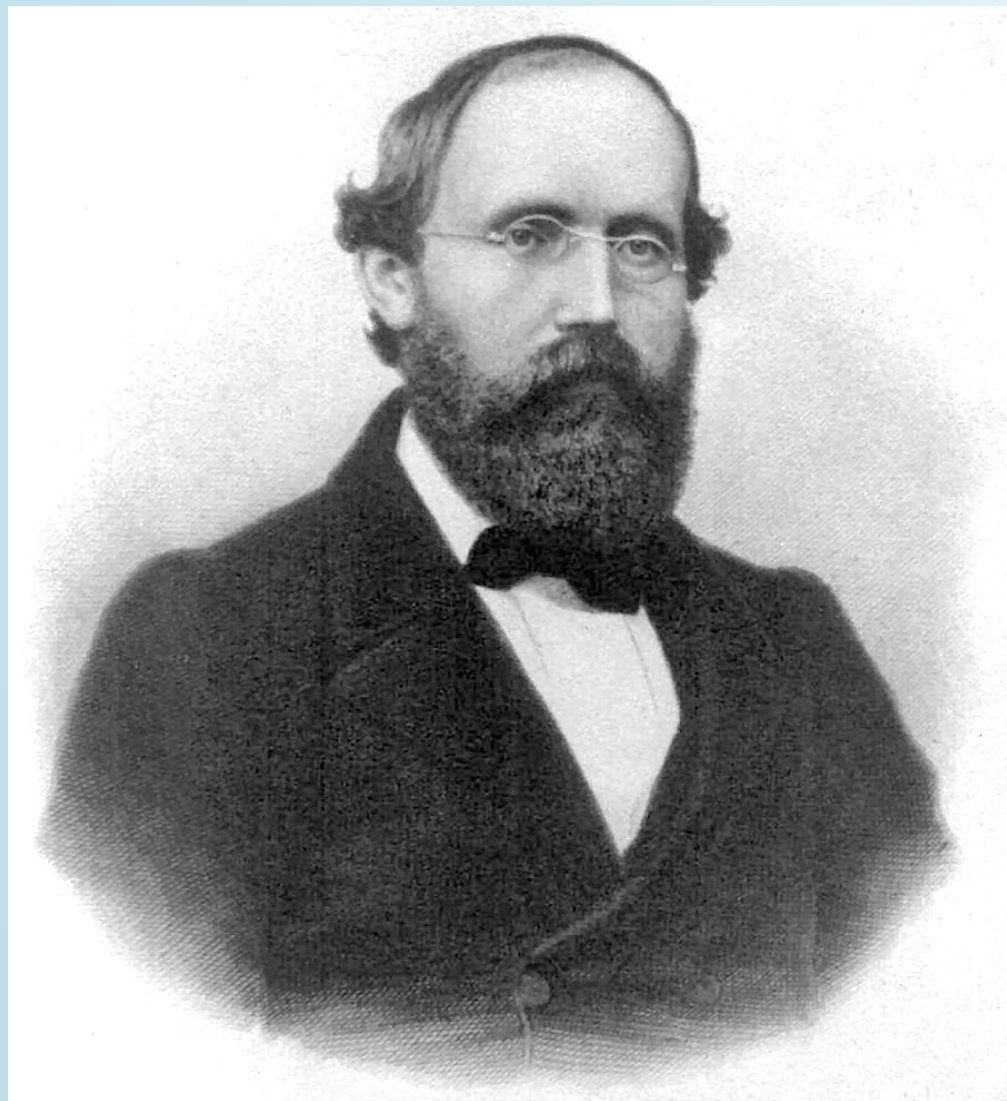
測地線と測地線偏差

- **測地線:** 自由落下する物体が進む道
- 自由落下している物体は、測地線に沿って「まっすぐ」最短距離を進んでいる
- **測地線偏差:** 2本の測地線の間隔が変化すること



リーマン曲率

- 19世紀の数学者ベルンハルト・リーマンが考案
- 2本の線がどれだけ近づいたり離れたりするかを数学的に記述



リーマン曲率: 近くを通る2つの自由落下物体がどれだけ近づいたり離れたりするかを測る量

アインシュタインの発見



- アインシュタインは、リーマン曲率こそが時空の曲がりであり、重力そのものと考えた
- 学生時代の同級生で数学者のマルセル・グロスマンの助けを借りて、リーマン幾何学を一般相対論に応用した

潮汐力 = 測地線偏差 = リーマン曲率

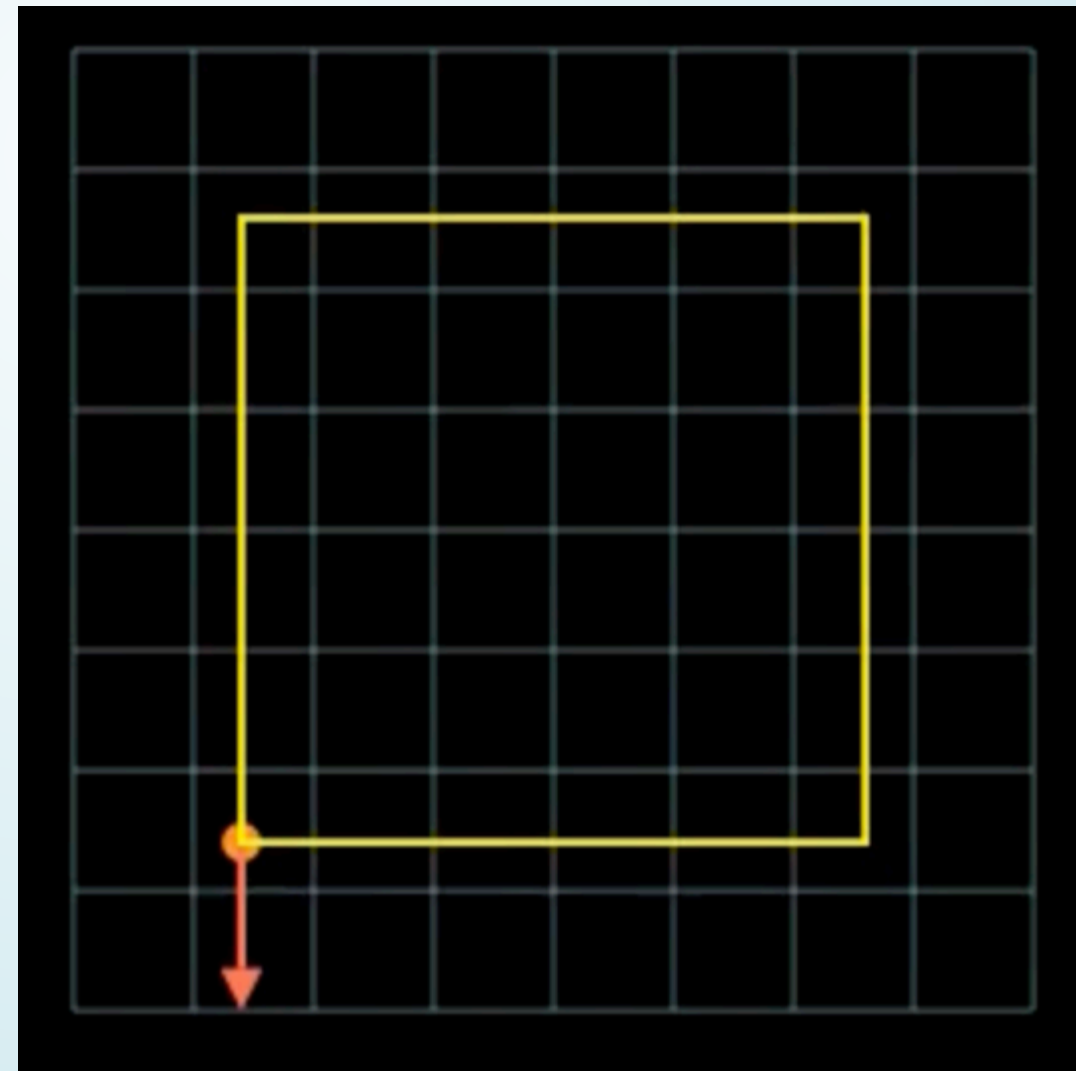
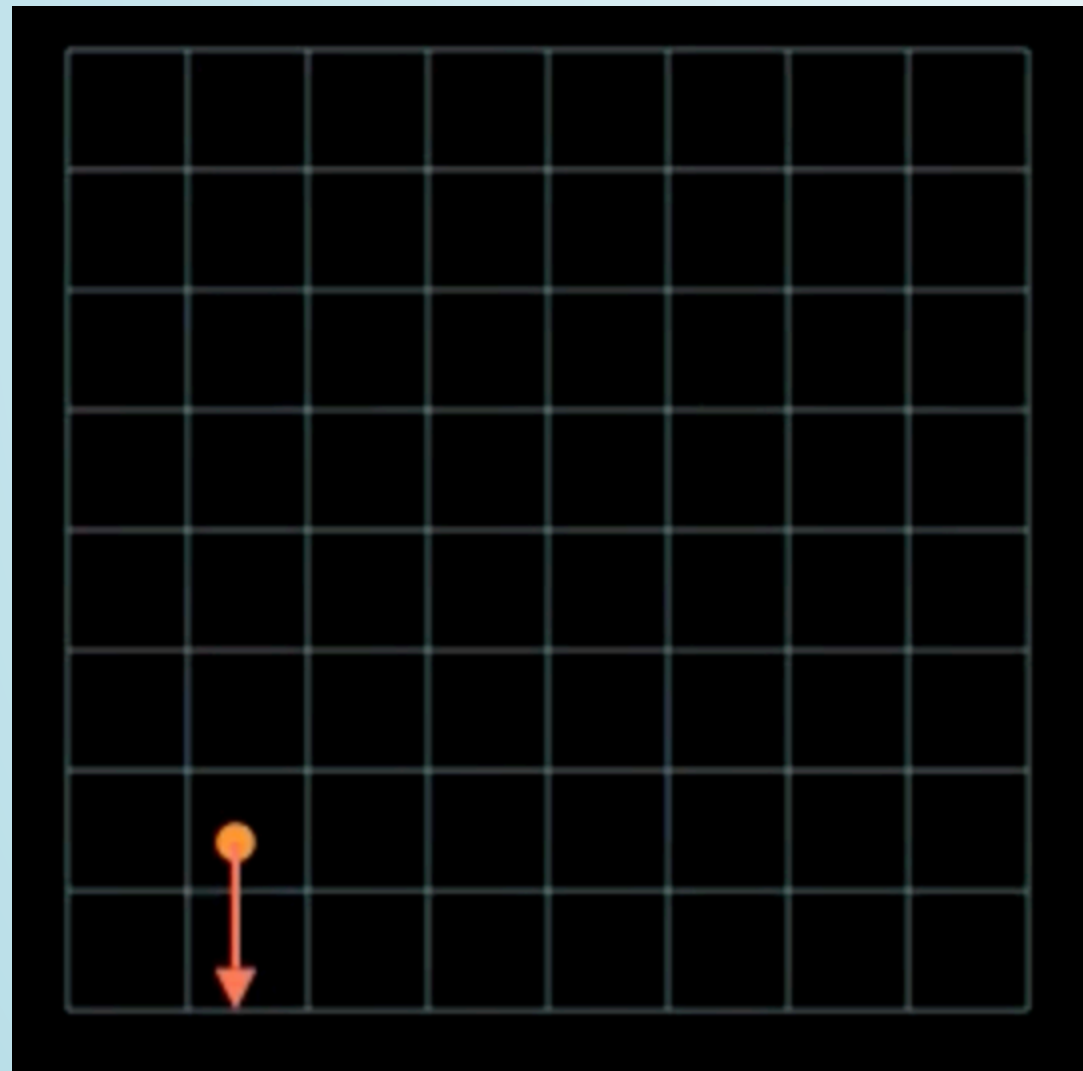
- 潮汐力を生むのは、測地線偏差による重力の差
- 測地線偏差（時空の曲がり）が大きいほど、潮汐力も大きくなる

潮汐力、測地線偏差、リーマン曲率は**同じ概念が異なる現れ方**をしているだけ

曲がった空間での平行移動

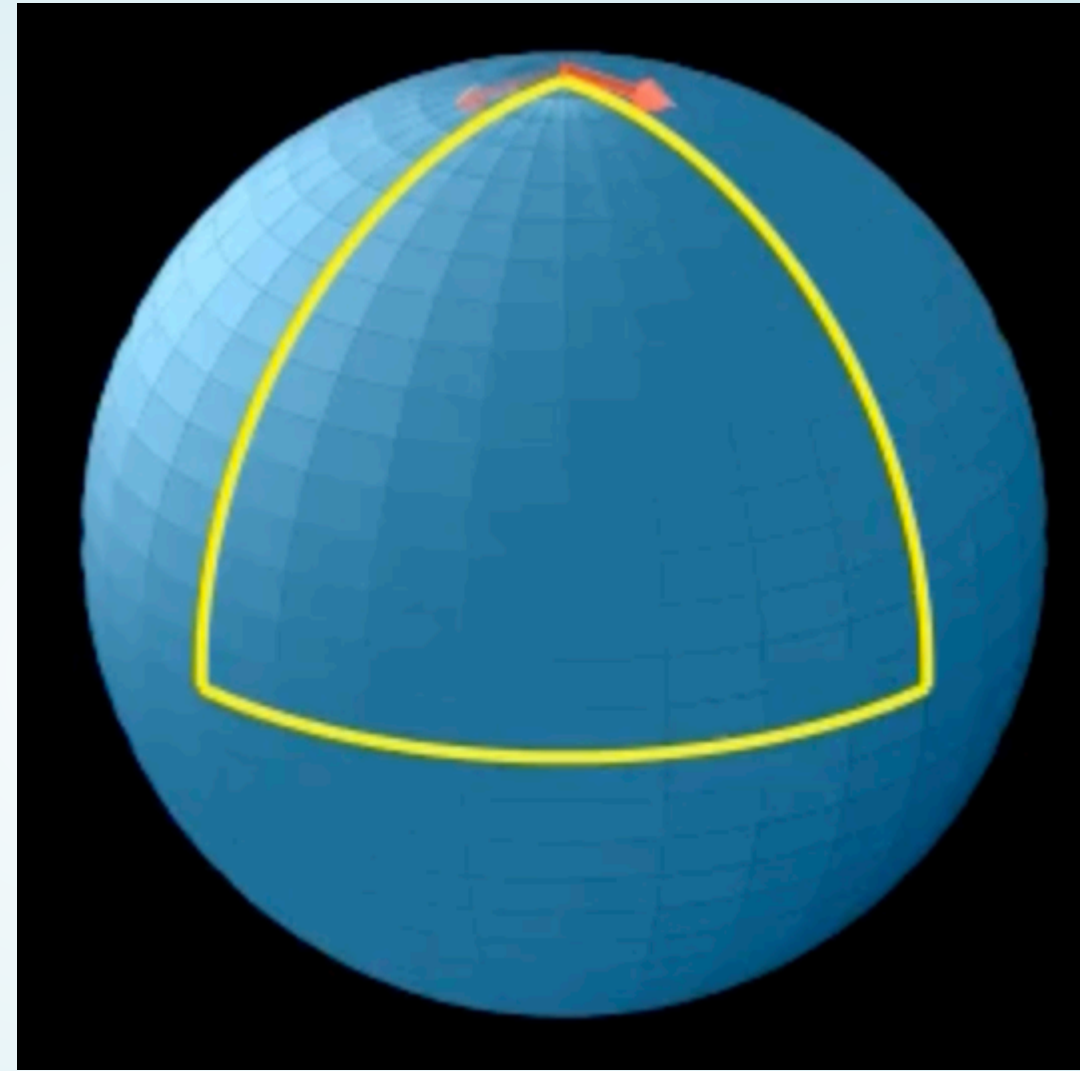
平坦な空間での平行移動

- 部屋の中で南の方角を指さして歩く
- ぐるっと一周して戻ってきても、指は元の向きのまま



球面上の平行移動

1. 北極点に立って南を指さす
2. 赤道まで歩く
3. 赤道に沿って90°東へ移動
4. 北極点に戻る



元の向きから90°ずれている！ — 同じ方向を向いていたはずなのに、一周して戻ったら向きが変わっている

曲がった空間では「まっすぐ」が 保てない

- ずっと同じ方向を向いていると思っても、歩く場所が曲がっていれば同じ方向を維持できない
- これこそが「**空間が曲がっている**」ということのもうひとつの意味

ブラックホールのような強い重力を持つ天体の周りでは、時空が同じように曲がっている

まとめ

1. 自由落下する飛行機の中が無重力になるように、**重力は打ち消せるように見える**
2. でも消せない本質的な重力の効果がある — **それが潮汐力**
3. これを数学的に記述したのが**リーマン曲率**
4. アインシュタインはこれを「**時空の曲がり**」と考
えて一般相対論を築いた
5. 平行移動のような簡単な現象でも曲がった空間で
は不思議なことが起こる

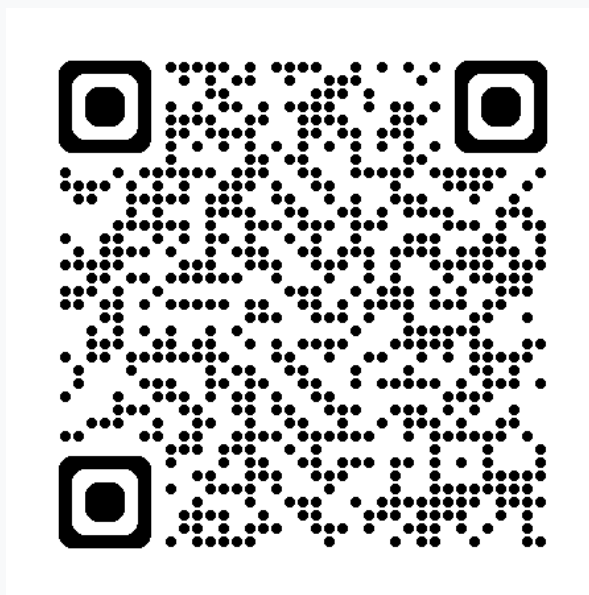
LT登壇者の募集

- 物理学集会ではLT登壇者を募集しています！
 - どんなジャンルでもOK！
- 興味のある方は物理学集会のDiscordサーバーまで！



VRCHAT博士集会のお知らせ (3/14 21時開催)

- Discordサーバーから参加登録できます！



VRChat博士集会
博士および博士候補者が集まり、語り合う集会です。

自分の研究 普段の生活 悩みや相談 キャリア

i 参加条件
日本語を母国語とする

- 博士号保持者
- 博士課程在学者
- 博士課程在学経験者 (単位取得退学など)
- 博士課程への進学を真剣に考えている大学生、大学院生、社会人