枚方公園青少年センター　夏期特別講座　（2018 年 7 月 29 日）

アインシュタインが 16 歳のときに考えたこと
— 相対性理論とブラックホール入門 —

真貝寿明 (しんかいひさあき，大阪工業大学)

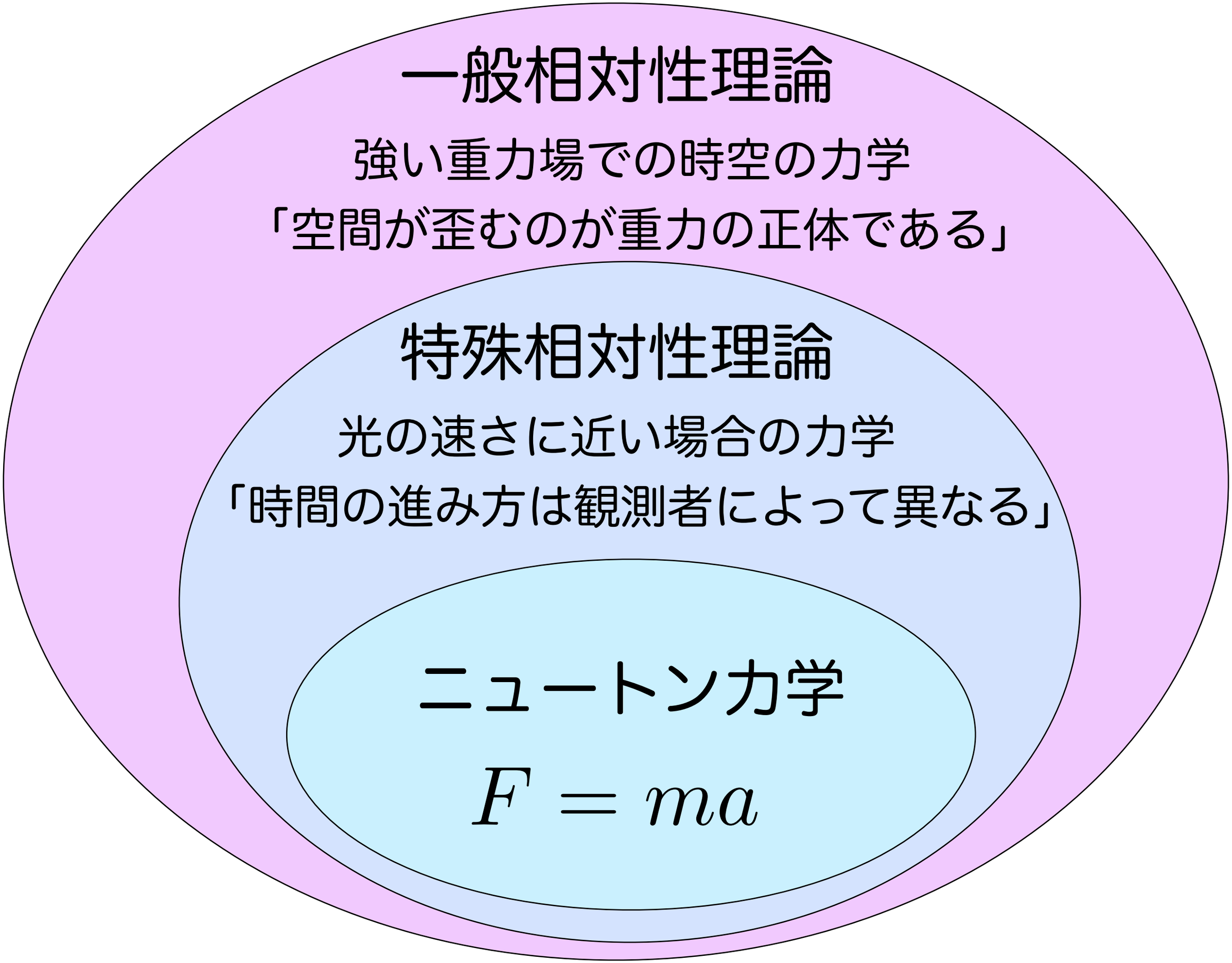
1時間目
特殊相対性理論（1905年）

アインシュタイン26歳

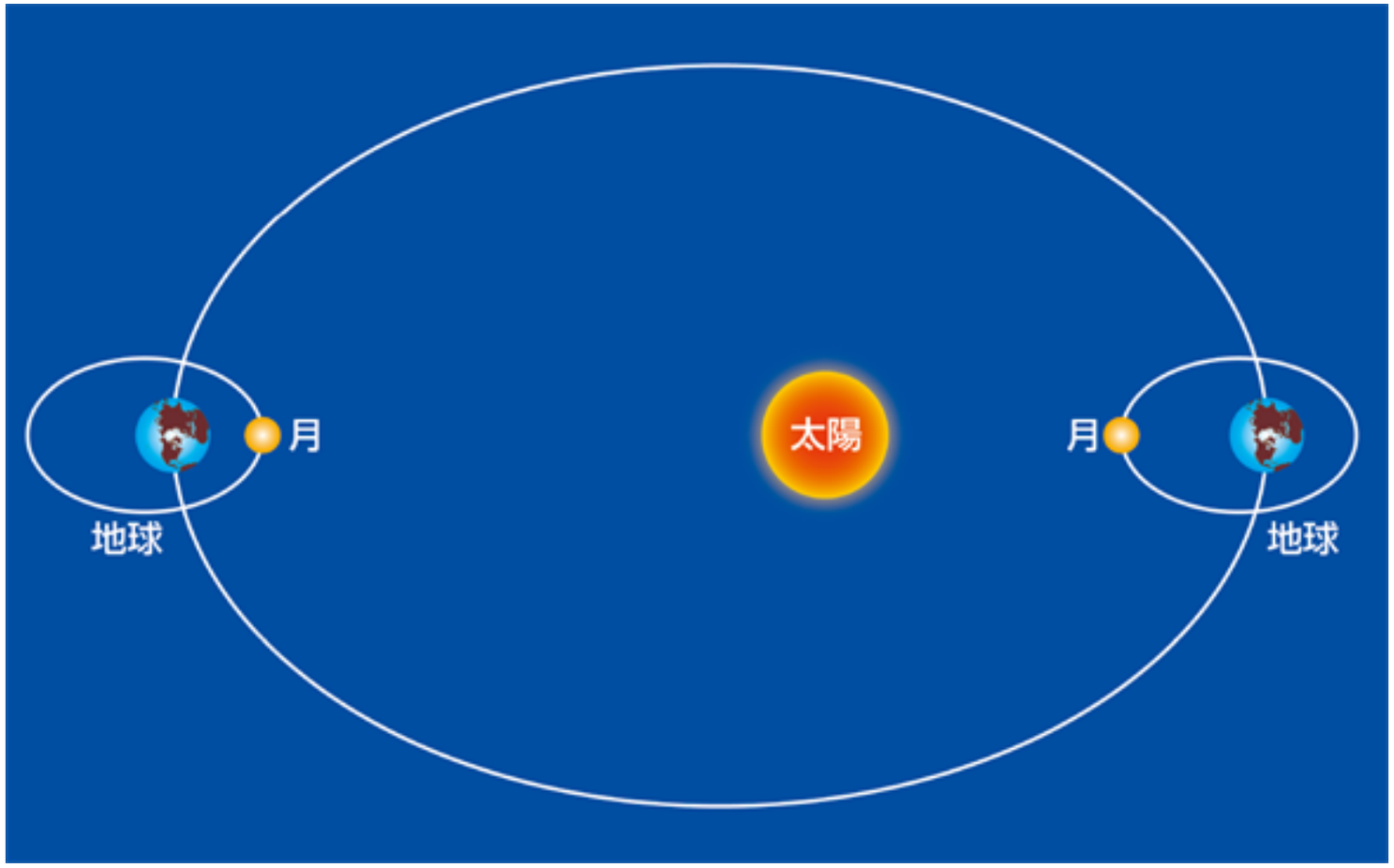
2時間目
一般相対性理論（1915年）

アインシュタイン36歳

http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/


一般相対性理論
強い重力場での時空の力学
「空間が歪むのが重力の正体である」
特殊相対性理論
光の速さに近い場合の力学
「時間の進み方は観測者によって異なる」
ニュートン力学
$F = ma$

重力の正体は？



ニュートン

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

万有引力

＝すべてのものは引力で引き合う

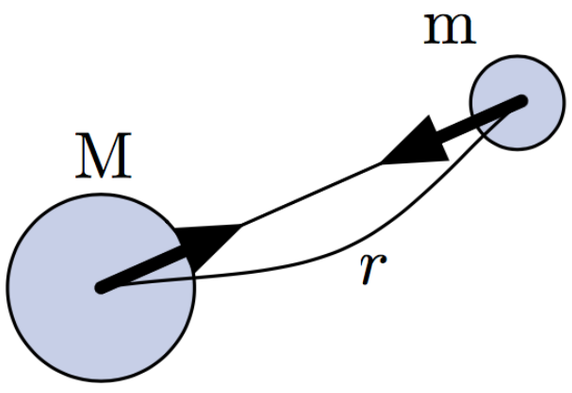


図 6: 万有引力の法則

重力の正体は？

http://hikingartist.com/

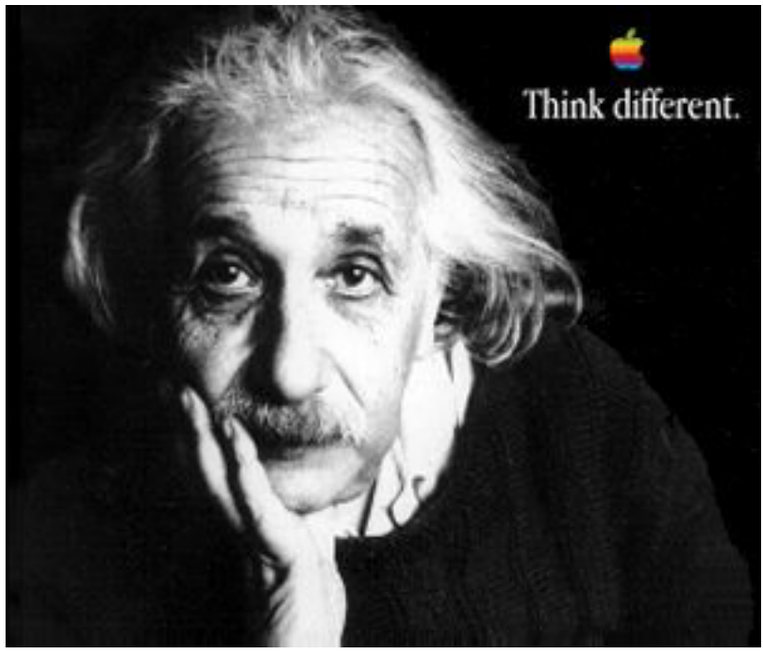
「万有引力があるからだ」（ニュートン，1687）

$$F = G\frac{Mm}{r^2} \qquad m\frac{d^2x}{dt^2} = F$$

「時空のゆがみだ」

（アインシュタイン，1915）

一般相対性理論

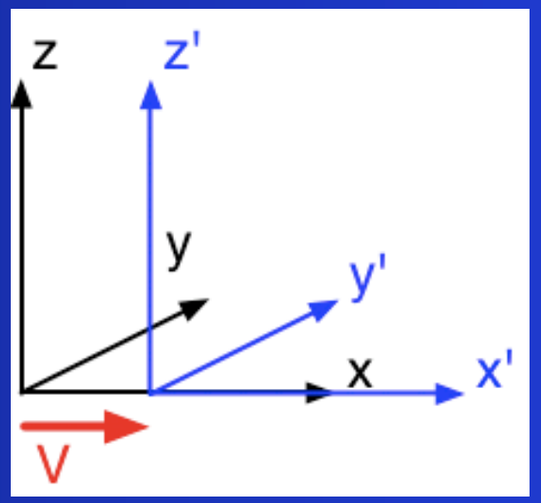


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$\frac{d^2\xi^\mu}{d\tau^2} = R^\mu{}_{\nu\rho\sigma}\frac{d\xi^\nu}{d\tau}\frac{d\xi^\rho}{d\tau}\xi^\sigma$$

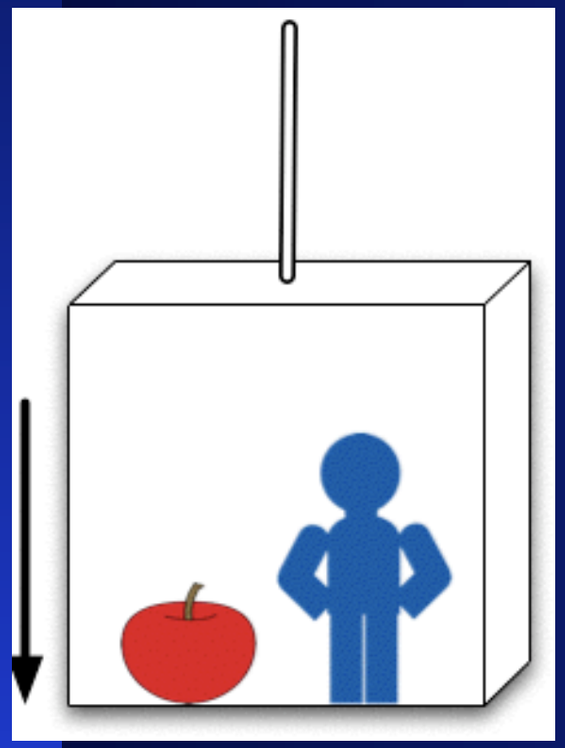
アインシュタイン
「人生で最高のひらめき」

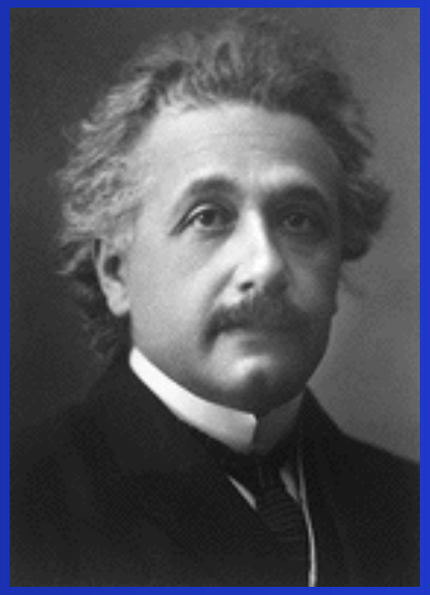
★ 特殊相対性理論は，加速運動する座標系を取り扱うことはできなかった.



★ 加速度とは何か？

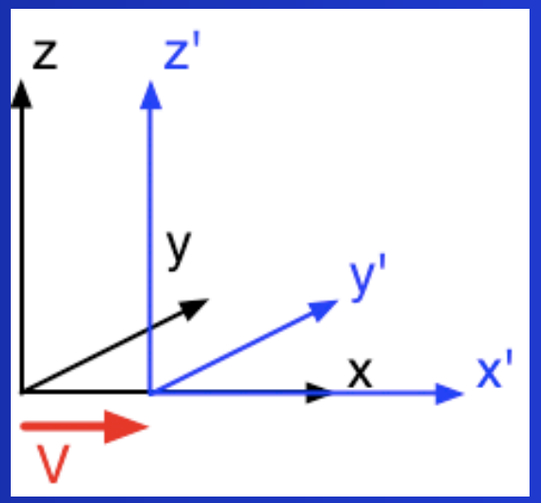
エレベータの思考実験





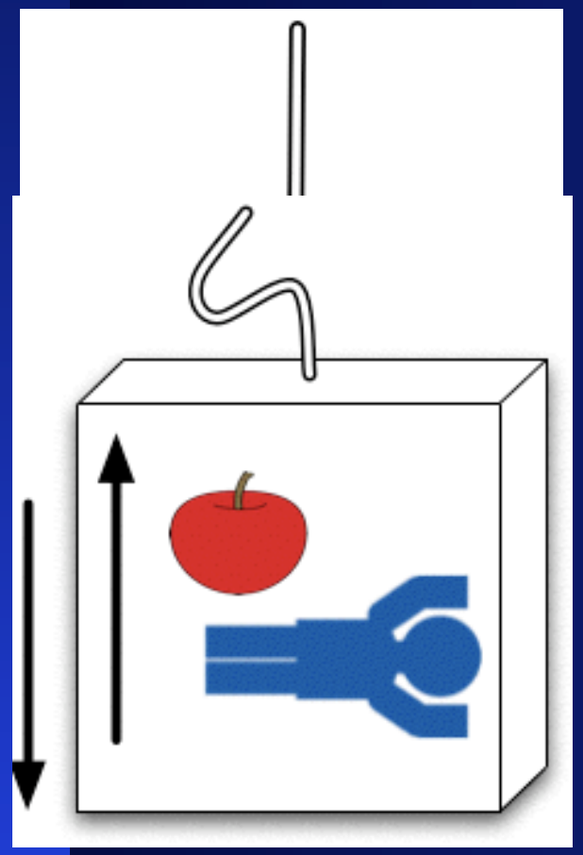
アインシュタイン
「人生で最高のひらめき」

★ 特殊相対性理論は，加速運動する座標系を取り扱うことはできなかった.



★ 加速度とは何か？

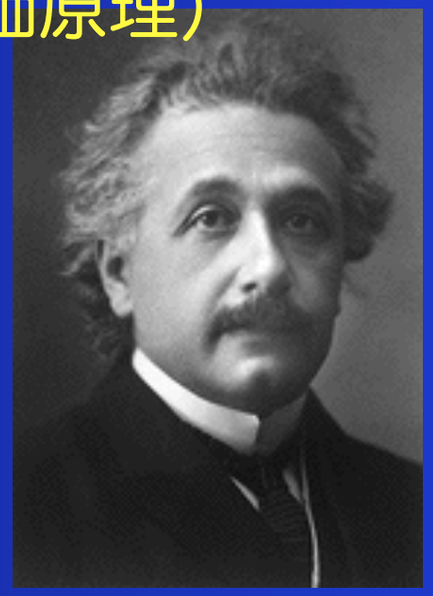
エレベータの思考実験



「重力加速度は，自由落下しているエレベータでは相殺されてしまう」

＝加速度は局所的に消去可能（等価原理）

「生涯で最もすばらしいアイデア」



自由落下で無重量体験

Zero Gravity

無重力体験　～アメリカ～

ボーイング727による**宇宙体験・無重力体験飛行**がアメリカ・ラスベガス、ケネディースペースセンターなどで楽しめます。

天井や壁を歩いてみたり、スーパーマンのように宙を飛んだり、水球になった水を飲んだり（？）．．などなど。楽しみ方は、自由！無重力状態でどんな事を試してみますか？

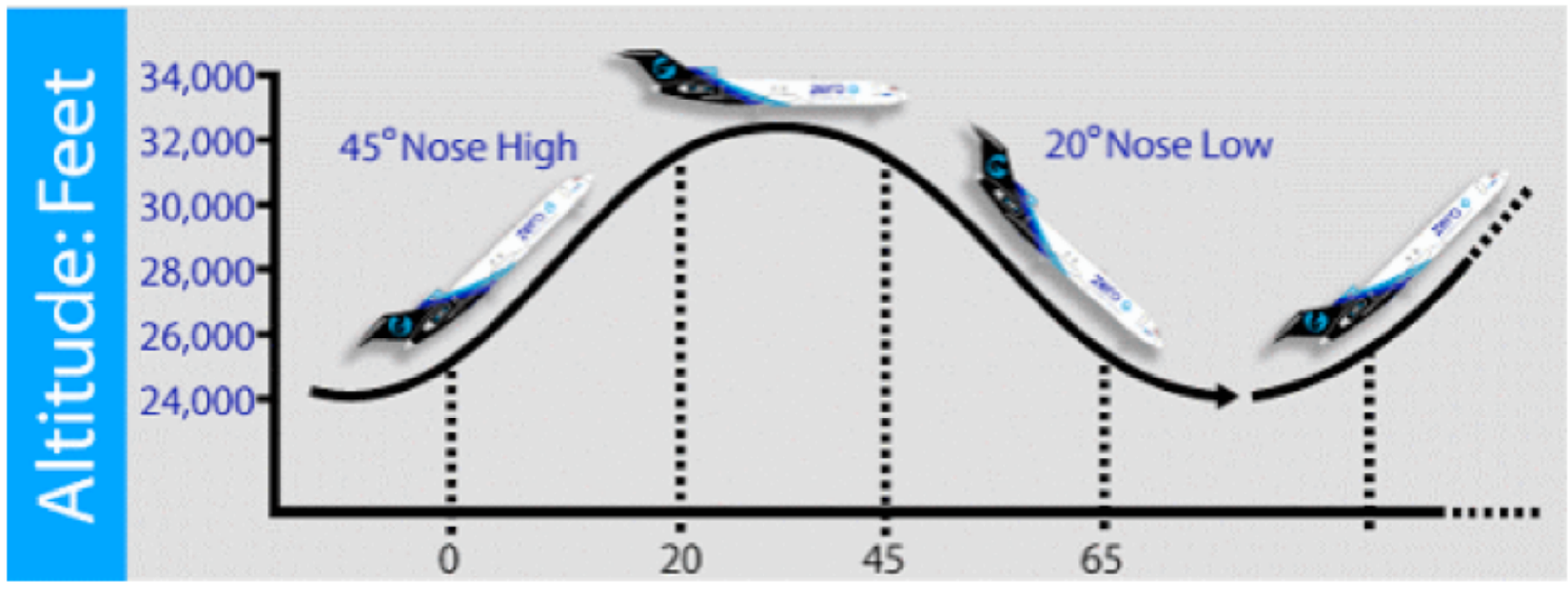
このプログラムでは、無重力体験のみでなく火星や月の重力も体験できま

無重力体験・概要

高度24,000ft（約7,315m）から45度の角度で34,000ft（約10360m）まで地上の1.8倍（1.8G）の重力を感じながら、一気に上昇し、その後下降します（パラボラテック飛行）。この時に無重力を25-30秒程度お楽しみいただけます。

30秒という時間は短いようですが、通常スカイダイビングでのフリーホールの時間（バンジージャンプの5回分より長い）時間とほぼ同じです。無重力の間は、スーパーマンになったように空を飛ぶなど思い思いにお楽しみ下さい。

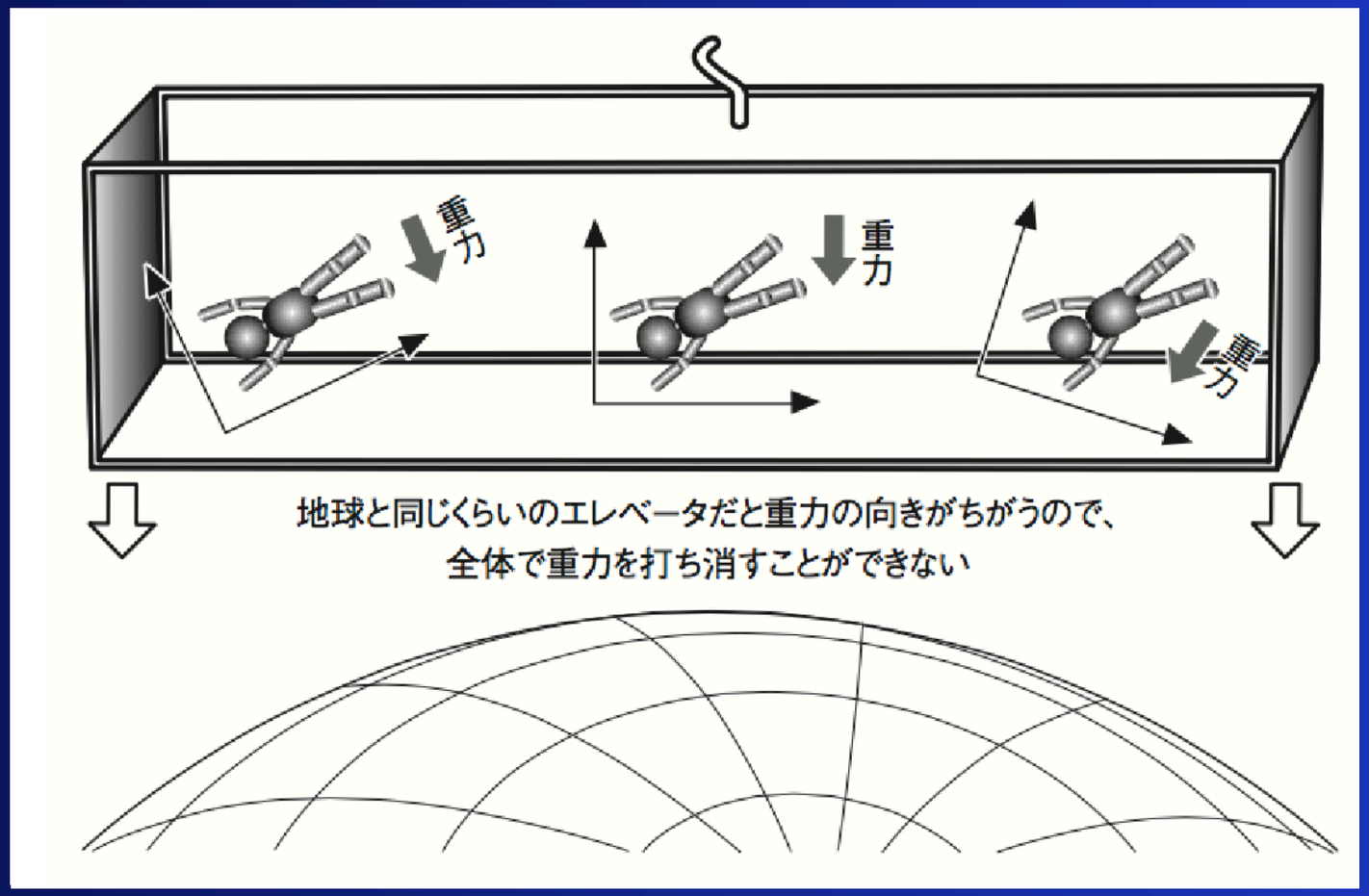
また、このプログラムでは、10回の無重力が予定されていますが、それ以外に3回の月（地球の1/6）や2回の火星（地球の1/3）の重力も同じフライトでお楽しみいただく予定です。



http://www.ctn-japan.com/tracon/space/zerog_us.html

一般相対性理論【重力の正体】

「重力加速度は，自由落下しているエレベータでは相殺する」
＝加速度は局所的に消去可能（等価原理）

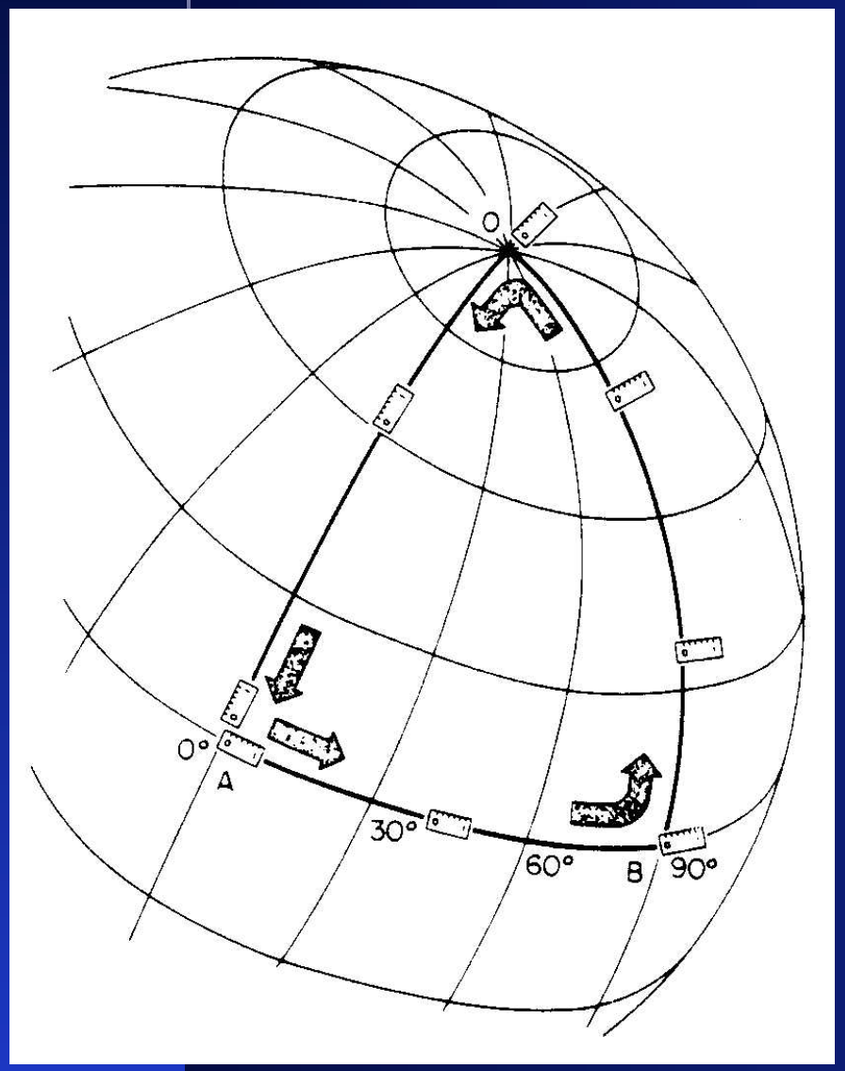


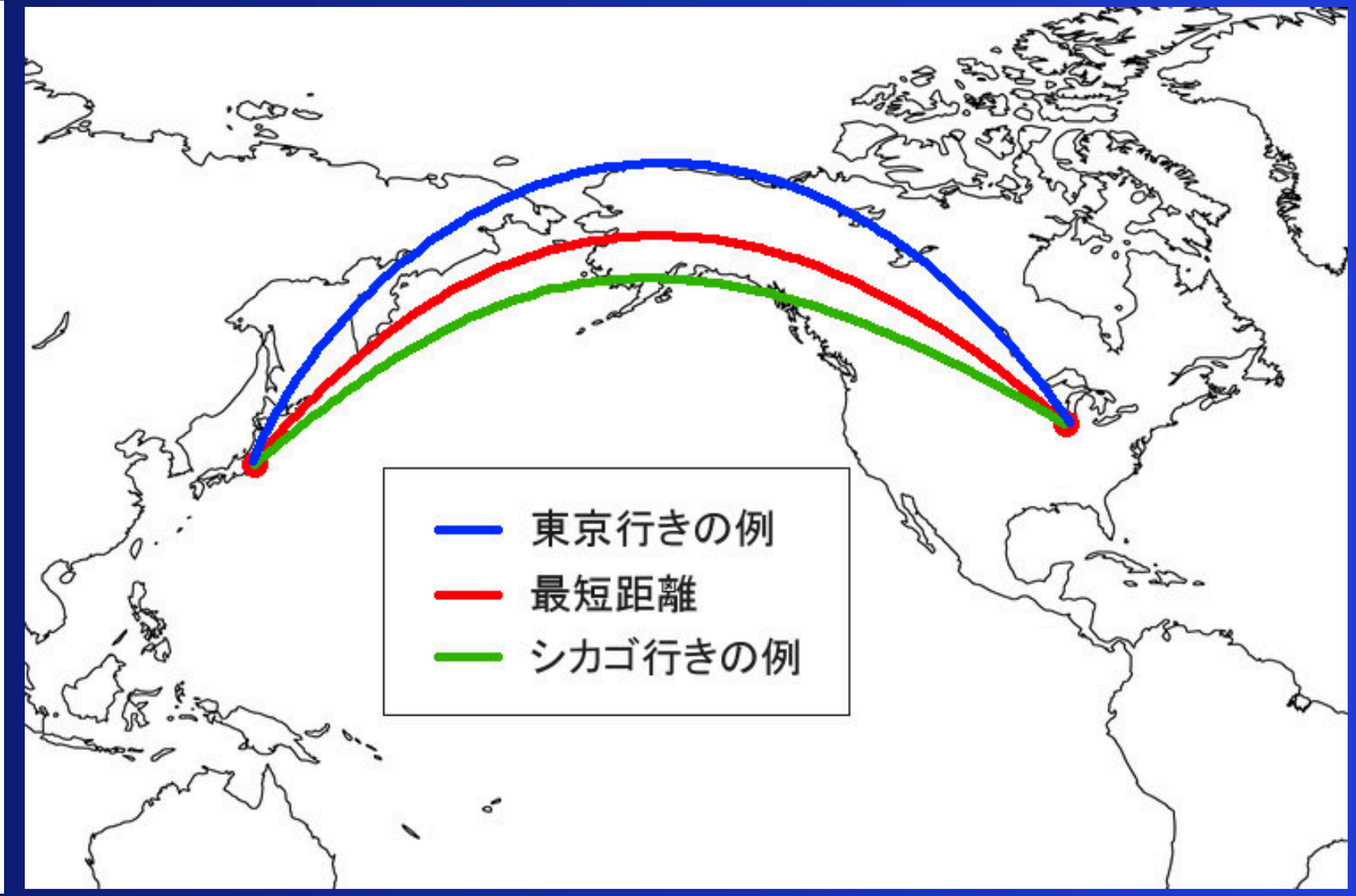
＝重力は，大域的には消去できない．
＝重力の正体は，時空のもつ曲がり具合である．

曲がった時空の幾何学＝「一般相対性理論」

曲がった空間？　リーマン幾何学

三角形の内角の和は180度ではない





最短距離は直線ではない

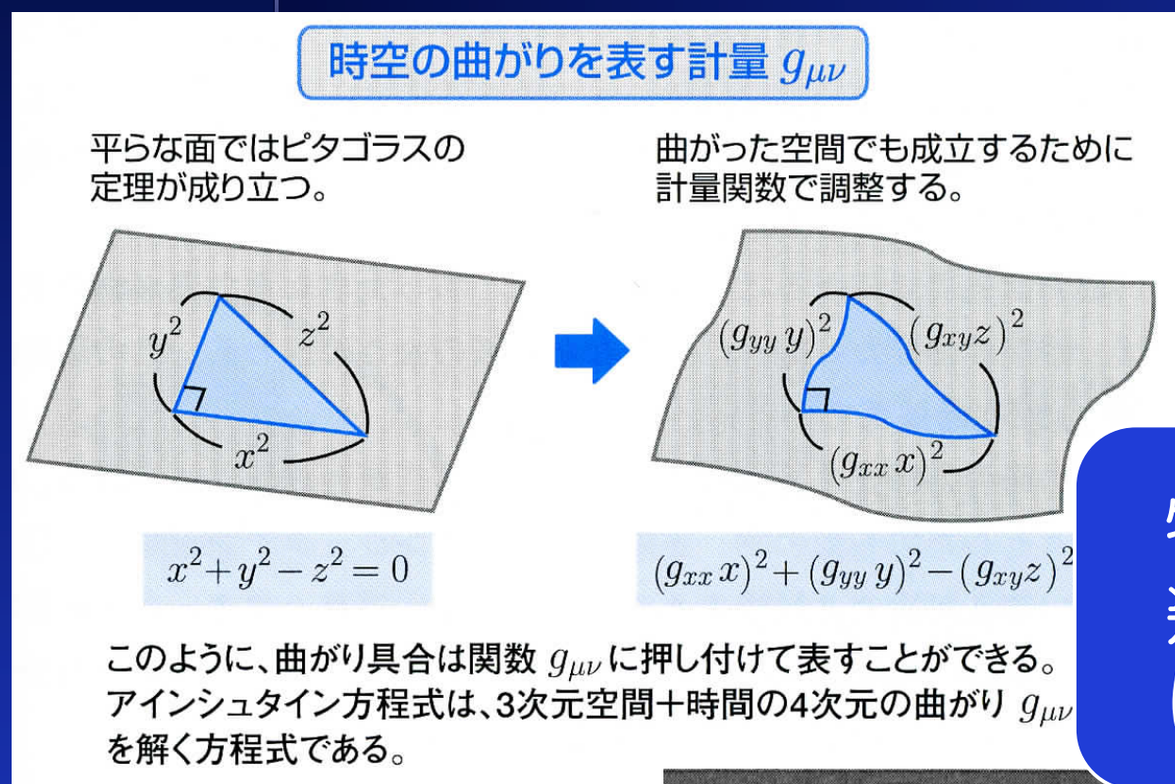
一般相対性理論【計量 metric】

曲がった時空の幾何学＝リーマン幾何学

４次元距離を一般化した「計量(metric)」.

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^{3}\sum_{\nu=0}^{3} g_{\mu\nu}(x)dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$$

$$\begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{zz} \\ & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$



物理学者は，リーマン幾何学に深入りしないほうがいいよ.

ime)では,

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -c^2dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \end{aligned}$$

Marcel Grossmann

重力場の方程式（アインシュタイン方程式, 1915 年）

重力の正体は，時空のゆがみである．その関係は，次の式で表される．

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R}_{\text{時空のゆがみ}} = \frac{8\pi G}{c^4} \underbrace{T_{\mu\nu}}_{\text{質量の分布}} \tag{2.2}$$

左辺はリーマン幾何学に基づいて時空がどのように曲がっているのかを表している．右辺は物体がどのように分布しているのかを表す量である．

一般相対性理論【アインシュタイン方程式】

重力場の方程式 (1915)

空間の曲がりがモノの運動を決める ⇔モノがあると空間が曲がる

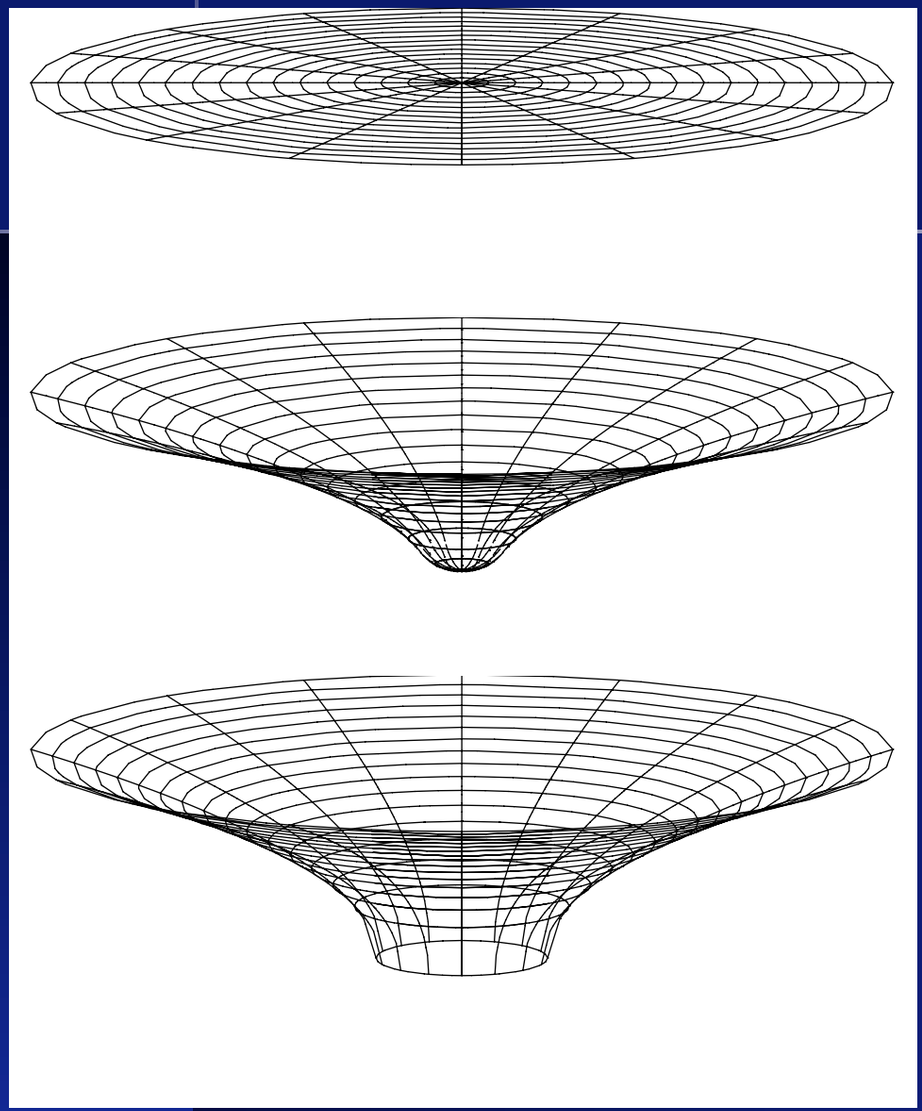
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

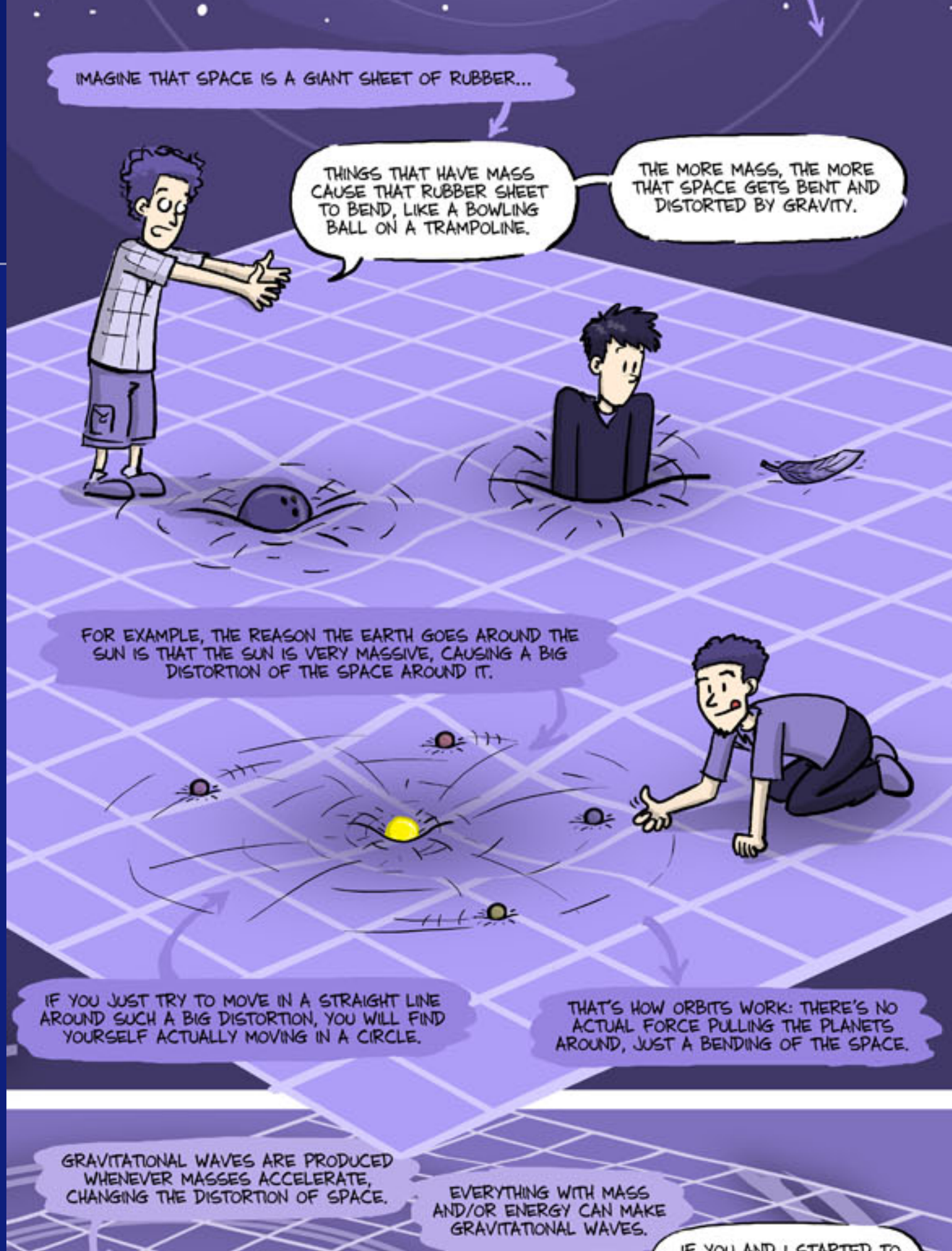
アインシュタイン曲率テンソル
＜空間の歪み＞

$$\begin{aligned}
\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu} &\equiv \frac{1}{2} g^{\alpha\beta}(\partial_\nu g_{\beta\mu} + \partial_\mu g_{\beta\nu} - \partial_\beta g_{\mu\nu}) \\
R^{\mu}{}_{\nu\alpha\beta} &\equiv \partial_\alpha \Gamma^{\mu}_{\nu\beta} - \partial_\beta \Gamma^{\mu}_{\nu\alpha} + \Gamma^{\mu}{}_{\sigma\alpha}\Gamma^{\sigma}{}_{\nu\beta} - \Gamma^{\mu}{}_{\sigma\beta}\Gamma^{\sigma}{}_{\nu\alpha} \\
R_{ab} \equiv R^{\mu}{}_{a\mu b} &\equiv \partial_\mu \Gamma^{\mu}_{ab} - \partial_b \Gamma^{\mu}_{a\mu} + \Gamma^{\mu}{}_{\nu\mu}\Gamma^{\nu}{}_{ab} - \Gamma^{\mu}{}_{\nu b}\Gamma^{\nu}{}_{a\mu} \\
R &= g^{ab} R_{ab}
\end{aligned}$$

エネルギー運動量テンソル
＜モノの分布＞

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p) u_\mu u_\nu + p g_{\mu\nu}$$




IMAGINE THAT SPACE IS A GIANT SHEET OF RUBBER...
THINGS THAT HAVE MASS CAUSE THAT RUBBER SHEET TO BEND, LIKE A BOWLING BALL ON A TRAMPOLINE.
THE MORE MASS, THE MORE THAT SPACE GETS BENT AND DISTORTED BY GRAVITY.
FOR EXAMPLE, THE REASON THE EARTH GOES AROUND THE SUN IS THAT THE SUN IS VERY MASSIVE, CAUSING A BIG DISTORTION OF THE SPACE AROUND IT.
IF YOU JUST TRY TO MOVE IN A STRAIGHT LINE AROUND SUCH A BIG DISTORTION, YOU WILL FIND YOURSELF ACTUALLY MOVING IN A CIRCLE.
THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS AROUND, JUST A BENDING OF THE SPACE.
GRAVITATIONAL WAVES ARE PRODUCED WHENEVER MASSES ACCELERATE, CHANGING THE DISTORTION OF SPACE.
EVERYTHING WITH MASS AND/OR ENERGY CAN MAKE GRAVITATIONAL WAVES.

一般相対性理論の予言（その１）

水星の近日点移動

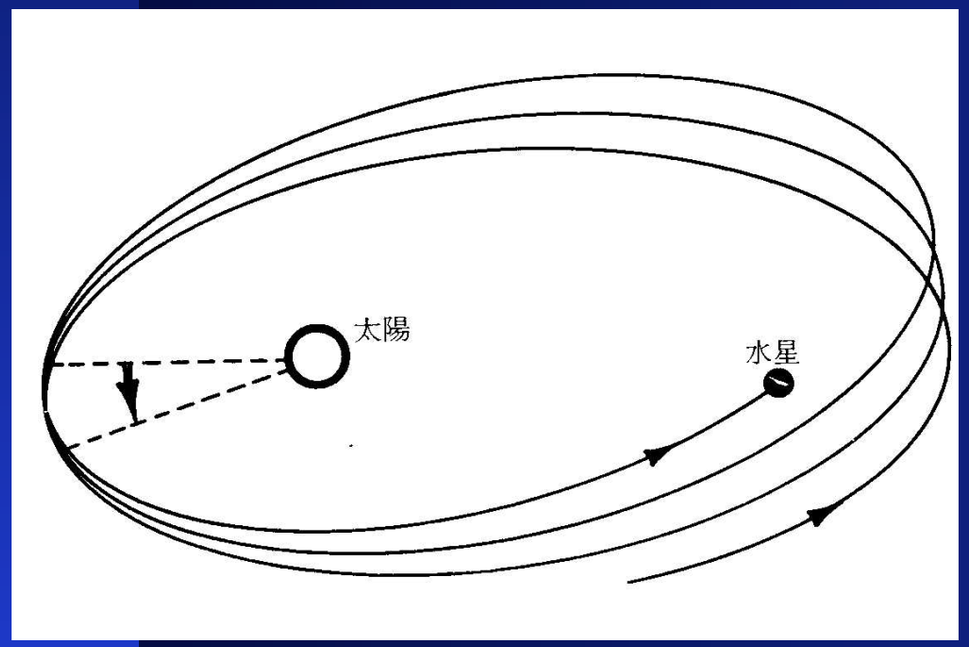
水星の近日点移動の問題（ルベリエ，1854）

100年で574秒角ずれる．2250世紀で完全な「ばら模様」．

→→金星の影響で277秒角，木星で153秒角，地球で90秒角

その他の惑星で10秒角分の説明が可能.

残りの43秒角は？？？



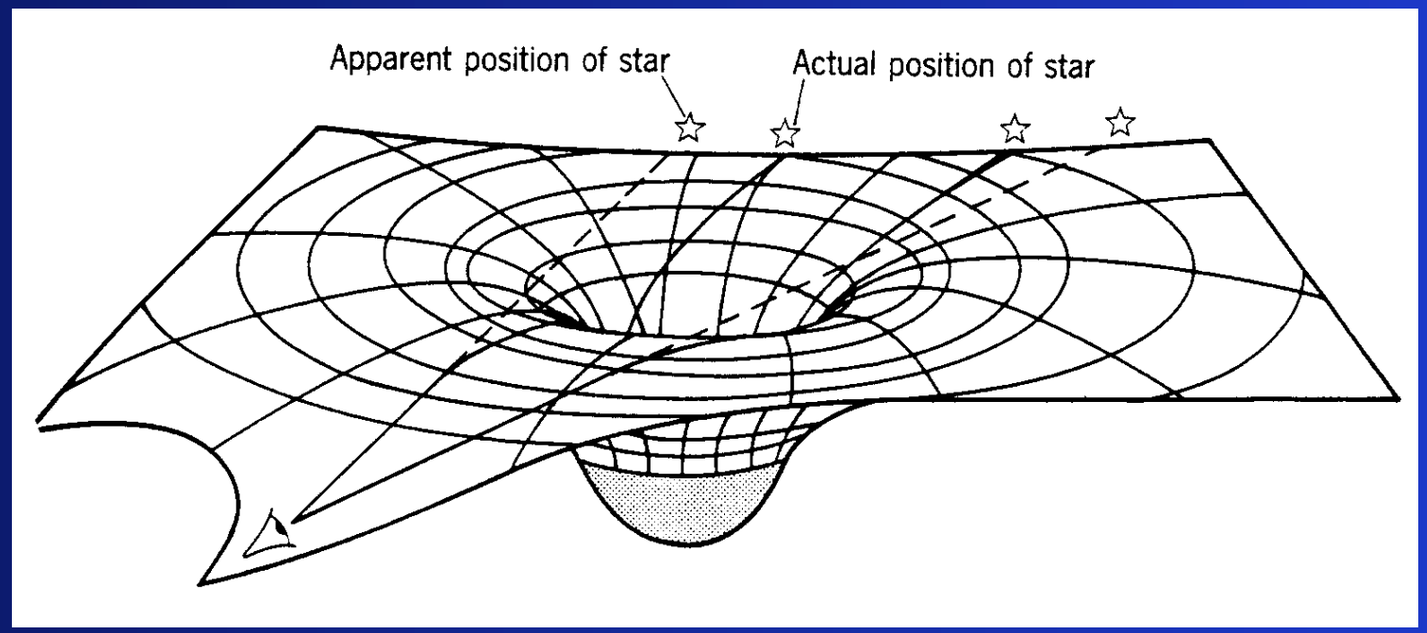
1915年，アインシュタインが，できたばかりの一般相対性理論を適用すると，「43秒角の歳差運動」が出てきた.

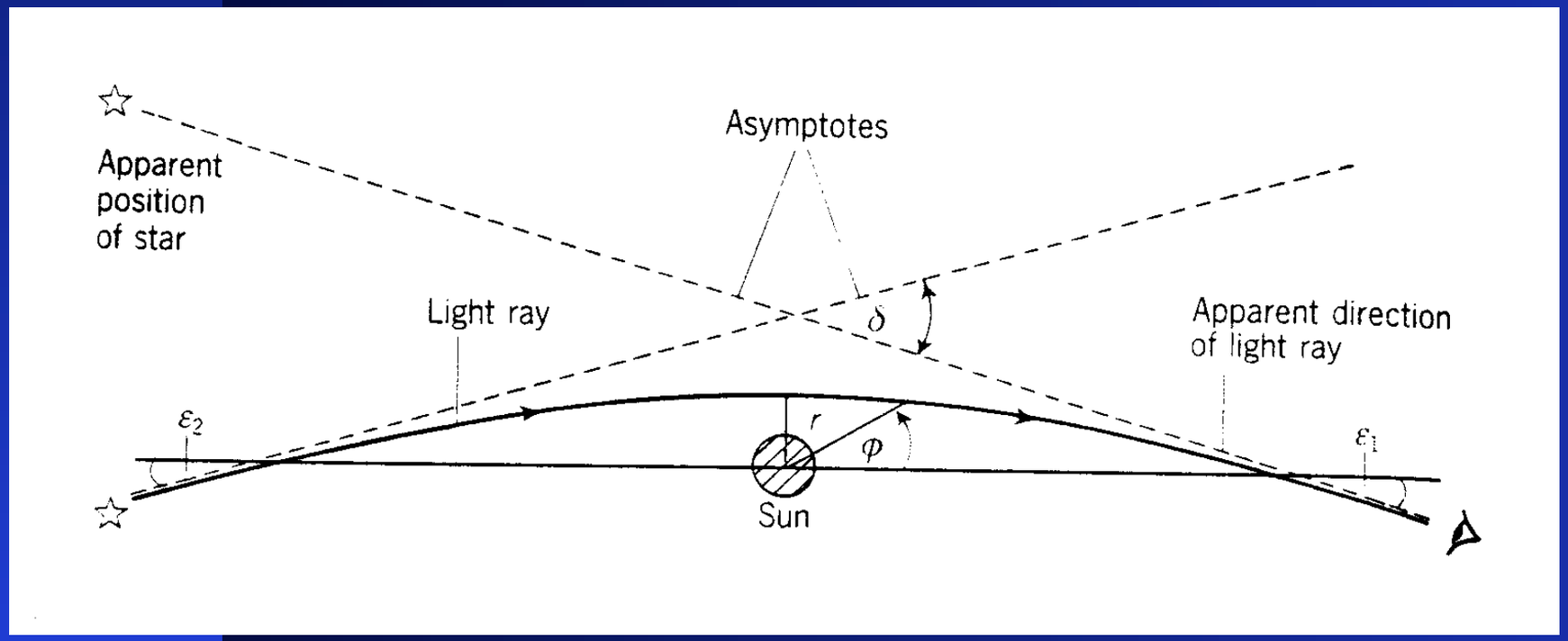
「２-３日間，興奮のため，我を忘れてしまった」

一般相対性理論は正しい

一般相対性理論の予言（その２）

重力レンズ効果





Taken from the 22 November 1919 edition of the Illustrated London News.

Coverage in the (more excitable) New York Times.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

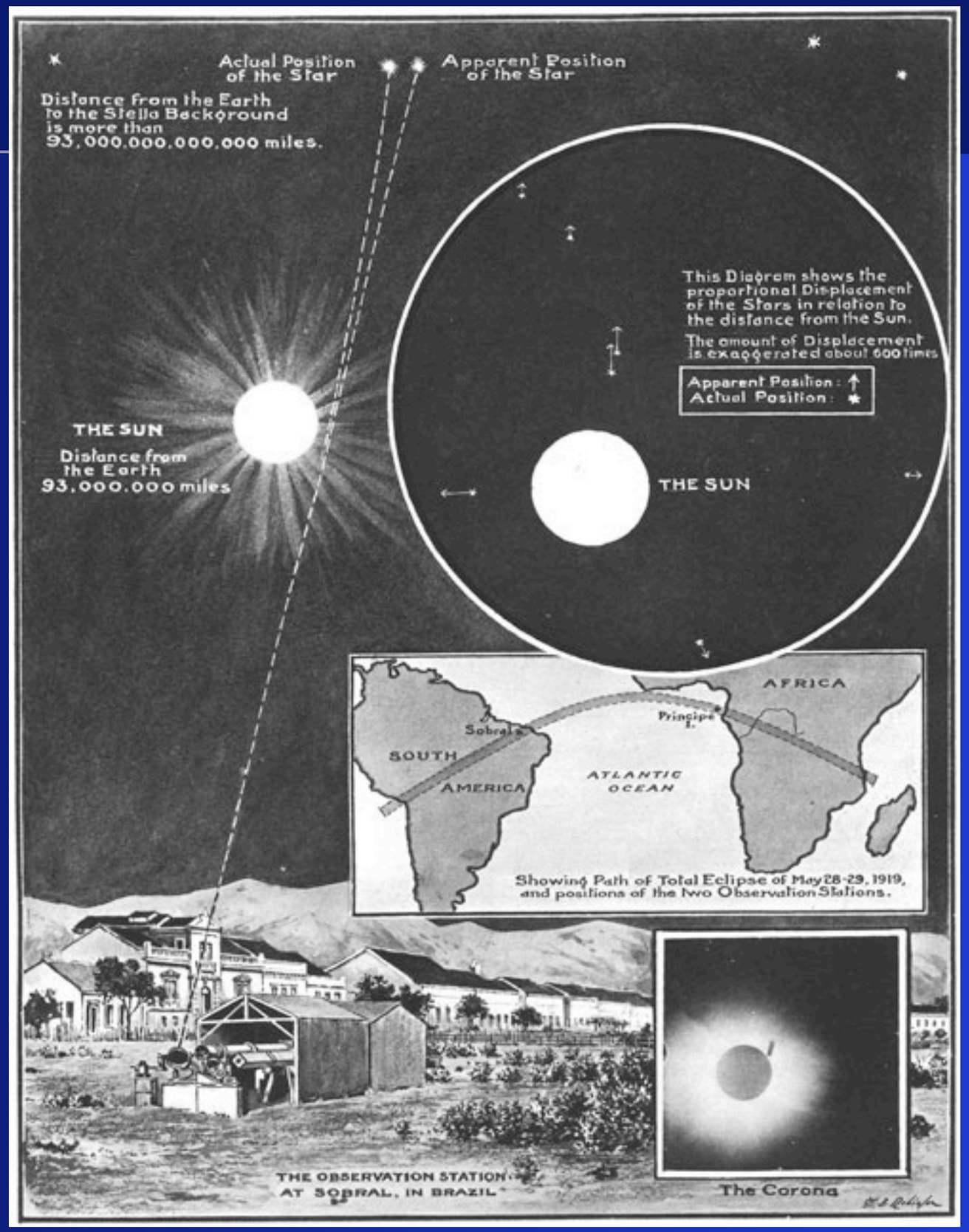
Men of Science More or Less Agog Over Results of Eclipse Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed or Were Calculated to be, but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could Comprehend It, Said Einstein When His Daring Publishers Accepted It.



エディントン
(1882–1944)

シルバースタイン（相対性理論の本を出した物理学者）
「太陽による光の曲がりの計算は正しかったね.
アインシュタインの理論は難しくて，世界で3人しか
理解していないと，言われているね」

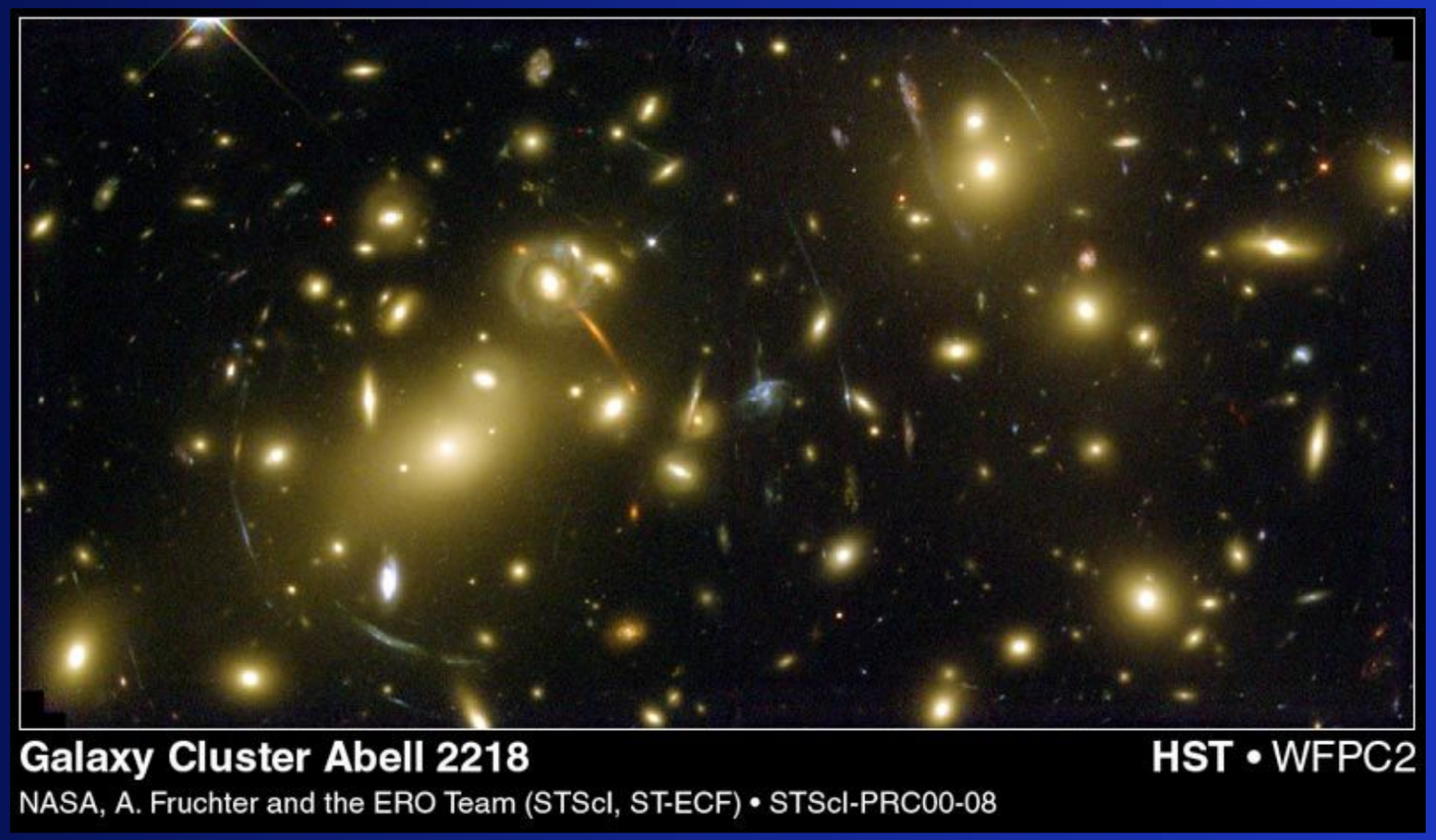
エディントン
「．．．．」

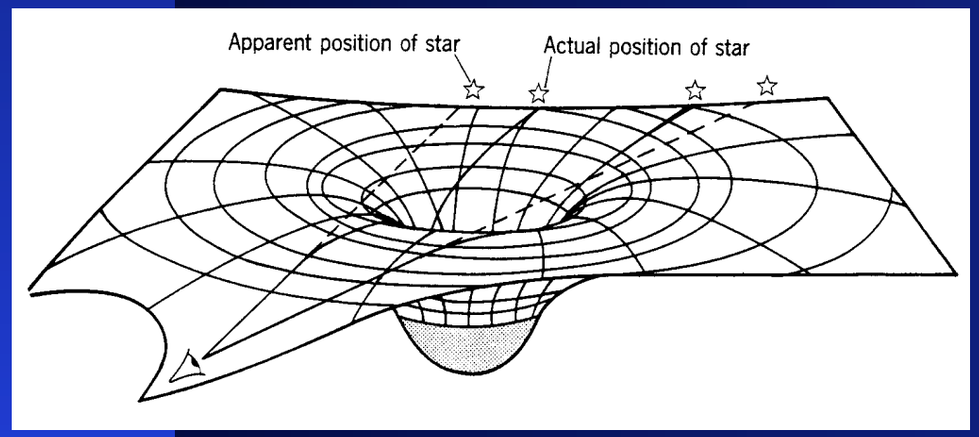
シルバースタイン
「まあ，謙遜するなよ」

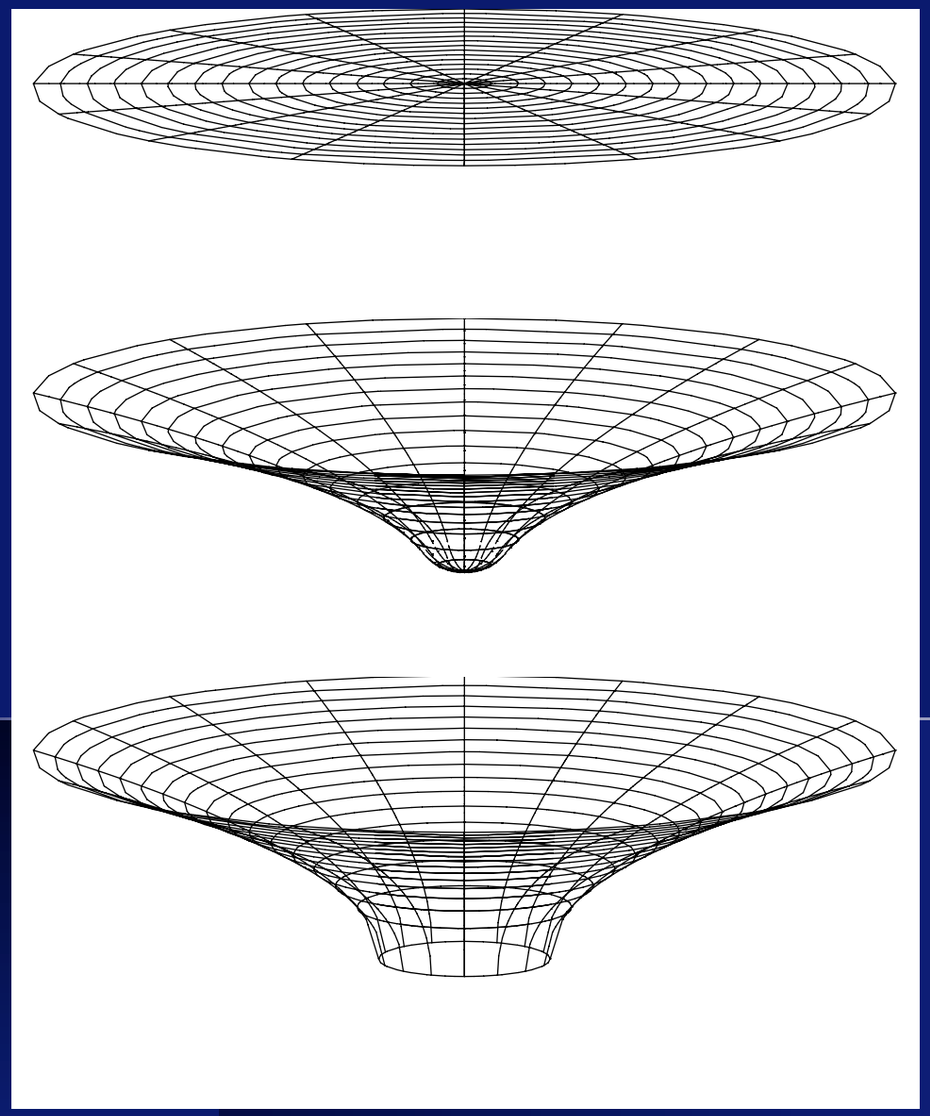
エディントン
「3人目は誰かと，考えていたところです」

一般相対性理論の予言（その２）

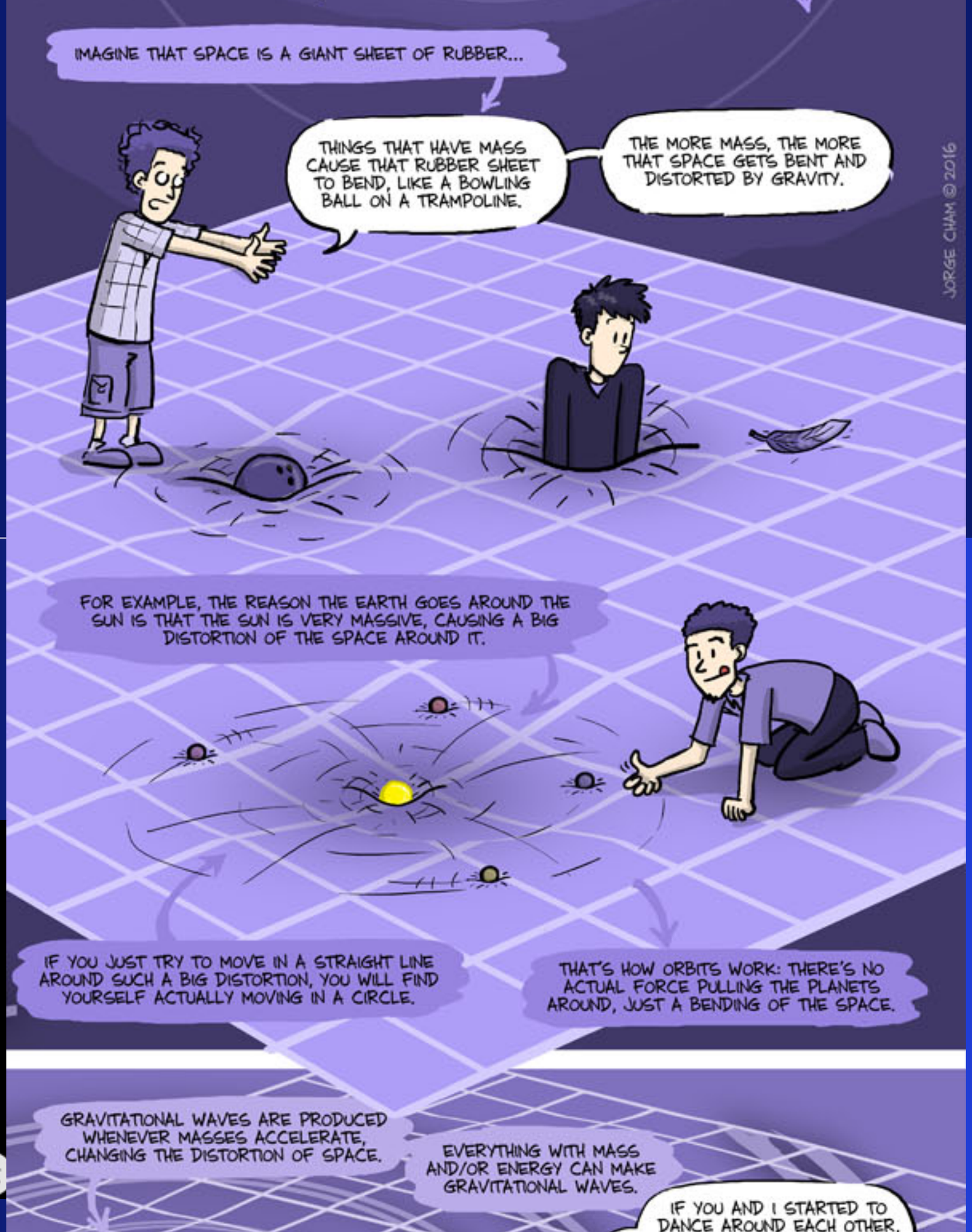
重力レンズ効果





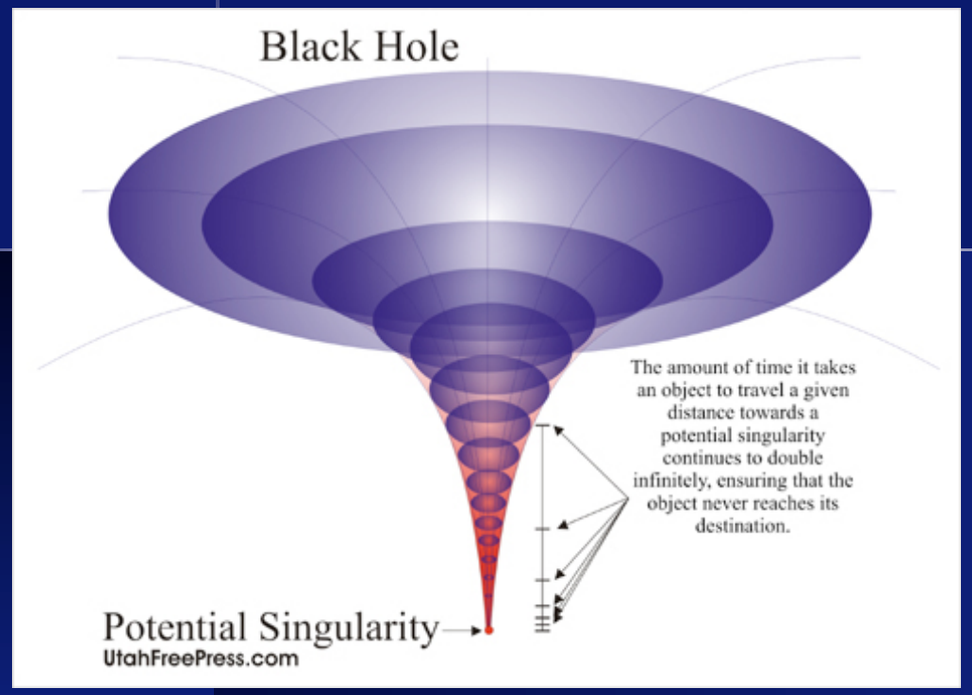


FailsShot


IMAGINE THAT SPACE IS A GIANT SHEET OF RUBBER...
THINGS THAT HAVE MASS CAUSE THAT RUBBER SHEET TO BEND, LIKE A BOWLING BALL ON A TRAMPOLINE.
THE MORE MASS, THE MORE THAT SPACE GETS BENT AND DISTORTED BY GRAVITY.
JORGE CHAM © 2016
FOR EXAMPLE, THE REASON THE EARTH GOES AROUND THE SUN IS THAT THE SUN IS VERY MASSIVE, CAUSING A BIG DISTORTION OF THE SPACE AROUND IT.
IF YOU JUST TRY TO MOVE IN A STRAIGHT LINE AROUND SUCH A BIG DISTORTION, YOU WILL FIND YOURSELF ACTUALLY MOVING IN A CIRCLE.
THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS AROUND, JUST A BENDING OF THE SPACE.
GRAVITATIONAL WAVES ARE PRODUCED WHENEVER MASSES ACCELERATE, CHANGING THE DISTORTION OF SPACE.
EVERYTHING WITH MASS AND/OR ENERGY CAN MAKE GRAVITATIONAL WAVES.
IF YOU AND I STARTED TO DANCE AROUND EACH OTHER,

一般相対性理論の予言（その３）

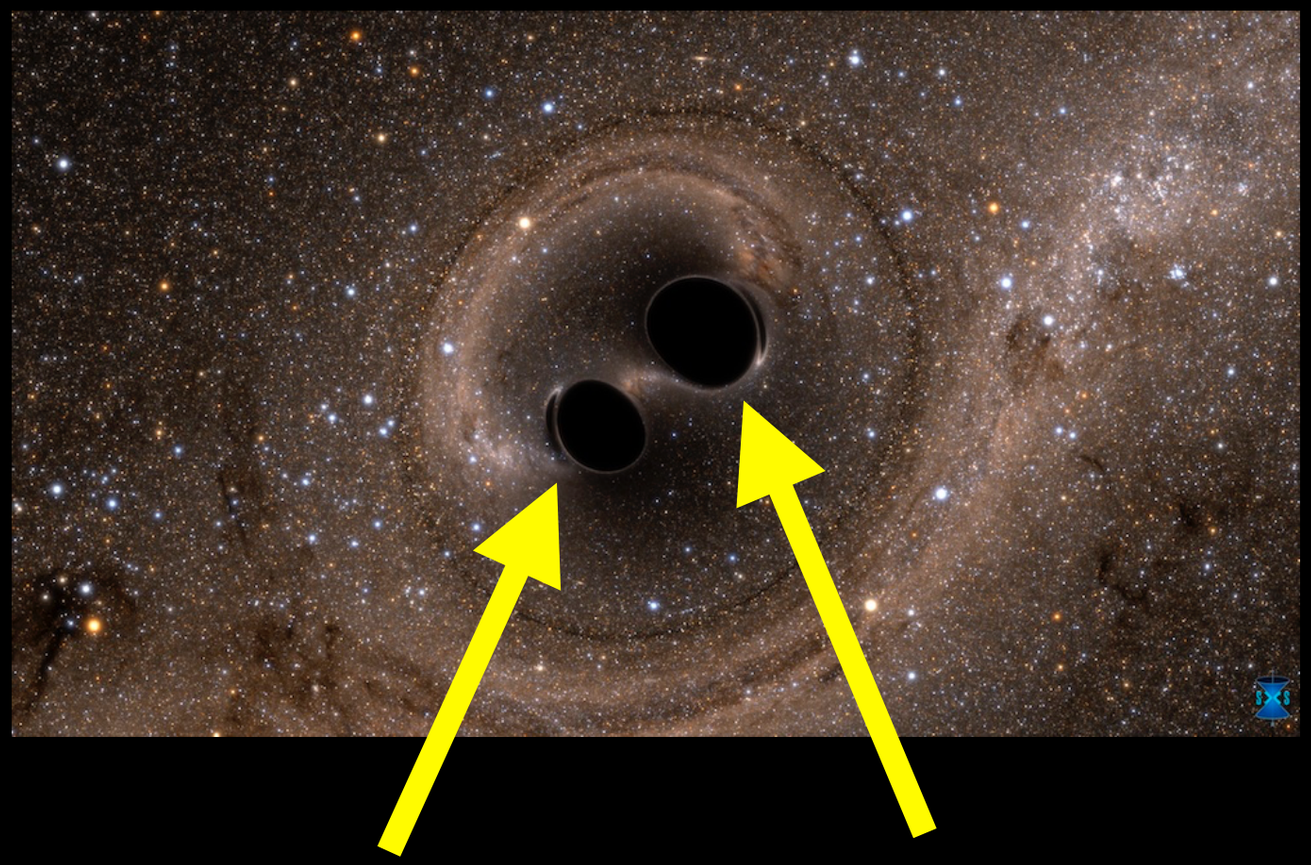
ブラックホール



ブラックホール ＝ 重すぎる天体

光さえも脱出できない天体

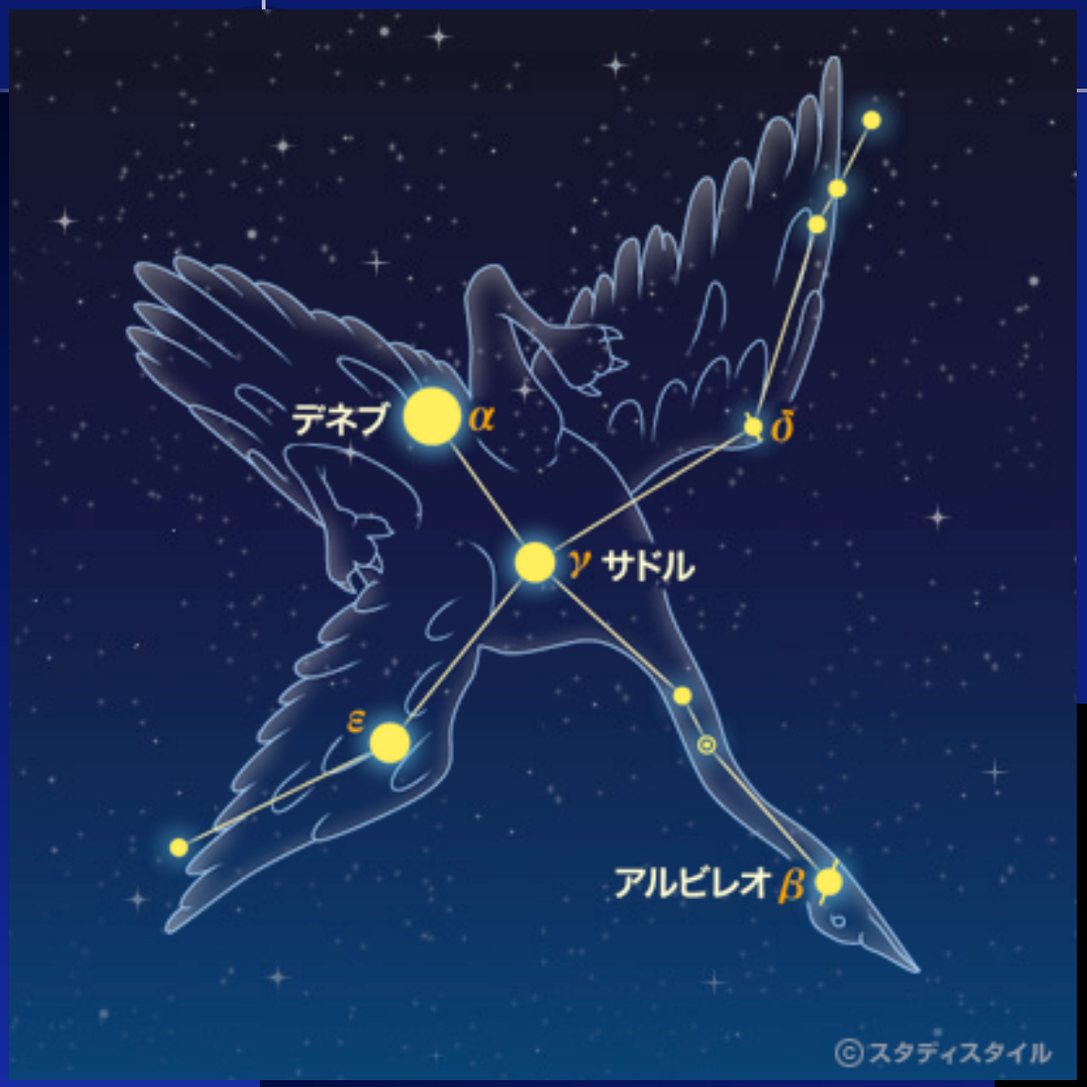
ブラックホール ＝ 重すぎる天体
光さえも脱出できない天体

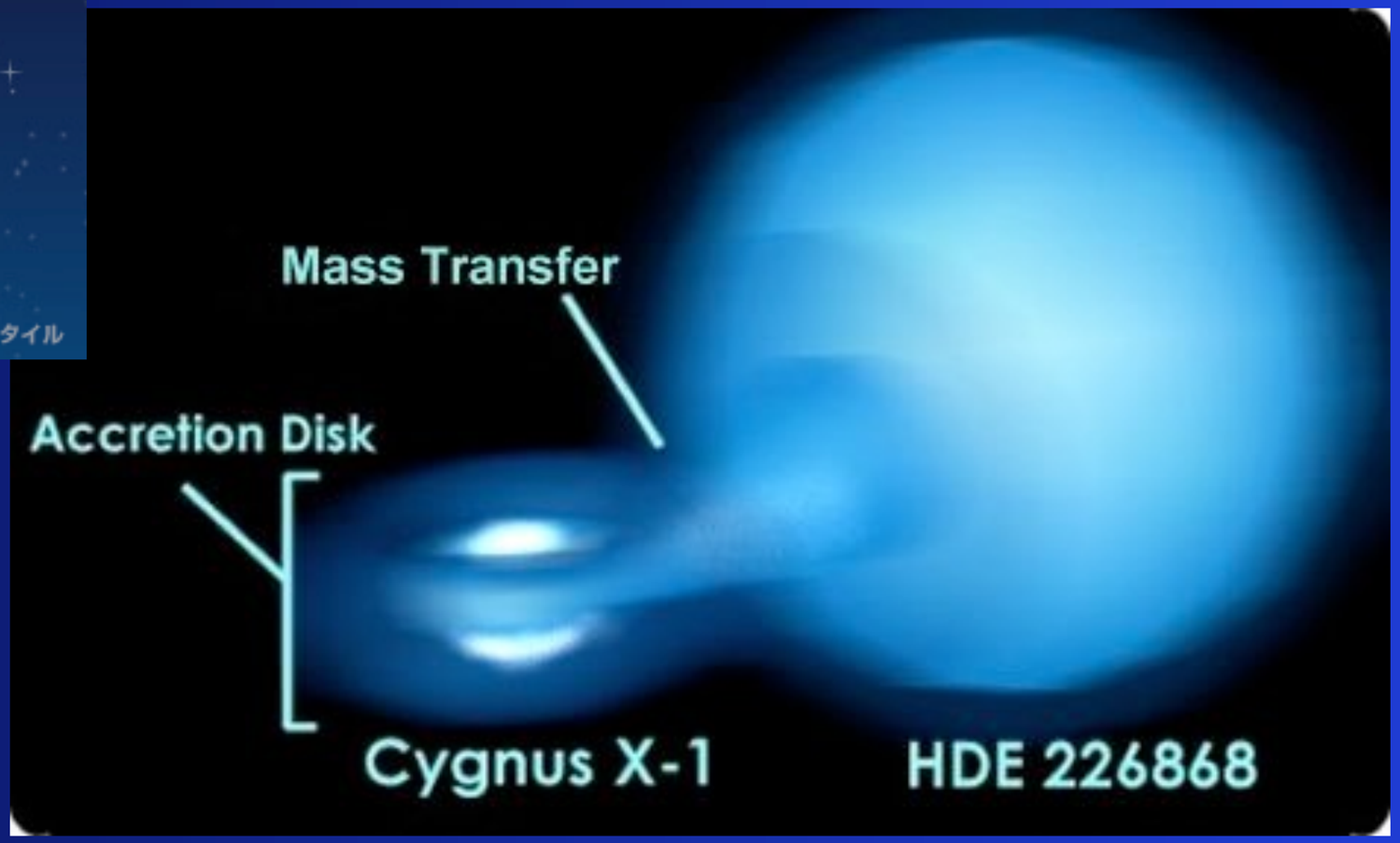


想像図

ブラックホールは見ることはできない．それでは，
ブラックホールがあることはどうしたらわかるだろうか．

ブラックホール候補: はくちょう座 X-1





ブラックホールは見ることはできない．それでは，
ブラックホールがあることはどうしたらわかるだろうか．

ブラックホールは見ることはできない．それでは，
ブラックホールがあることはどうしたらわかるだろうか．

重力レンズ

Gravitational Lensing

MATTHEW McCONAUGHEY
ANNE HATHAWAY
JESSICA CHASTAIN
MICHAEL AND CAINE
GO FURTHER.
FROM THE DIRECTOR OF THE DARK KNIGHT TRILOGY AND INCEPTION
INTERSTELLAR
IN THEATRES AND IMAX
EVERYWHERE
NOVEMBER 7
LEGENDARY
interstellarmovie.com
#interstellar

Making of **Interstellar (2014)**

0’57”

キップ・ソーン
Kip Thorne

映画『インターステラー』予告編3【HD】2014年11月22日公開　2’18”

https://www.youtube.com/watch?v=cclDeJuajgo

Interstellar (2014)

Executive Producer: Kip Thorne

https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo

Interstellar (2014)

Executive Producer: Kip Thorne

https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo

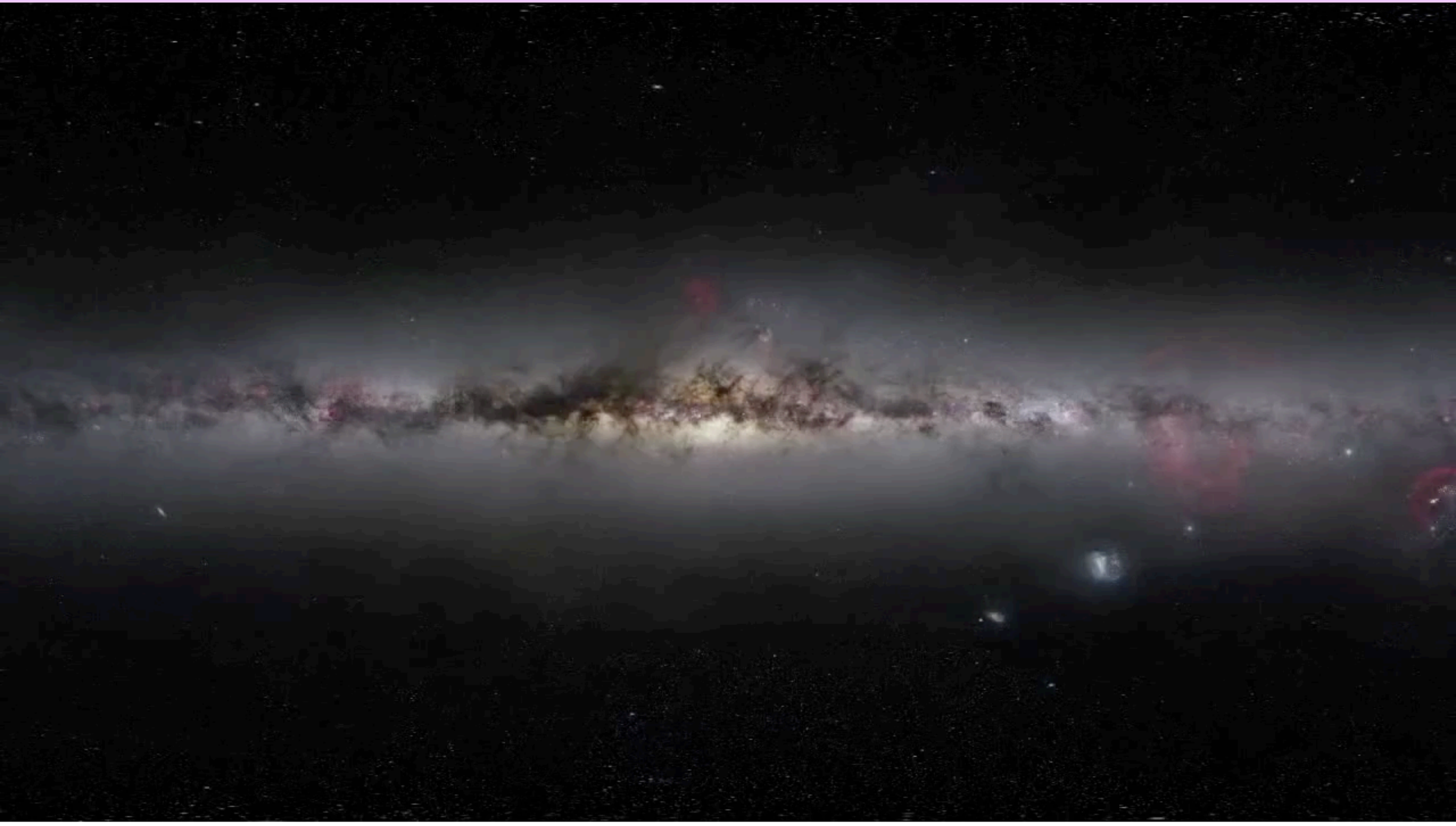
ブラックホールは見ることはできない．それでは，
ブラックホールがあることはどうしたらわかるだろうか．

ケプラー運動

Kepler motion

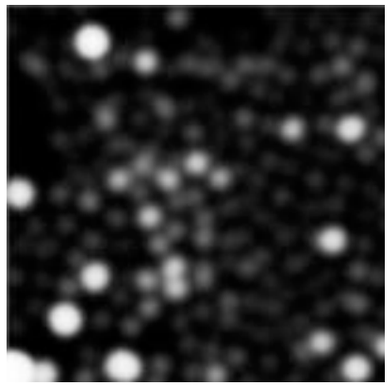
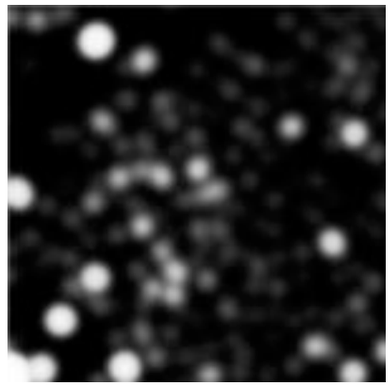
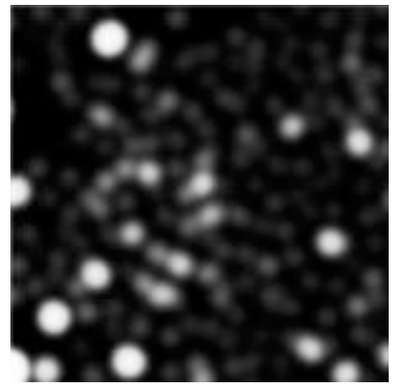
銀河中心にある超巨大ブラックホール

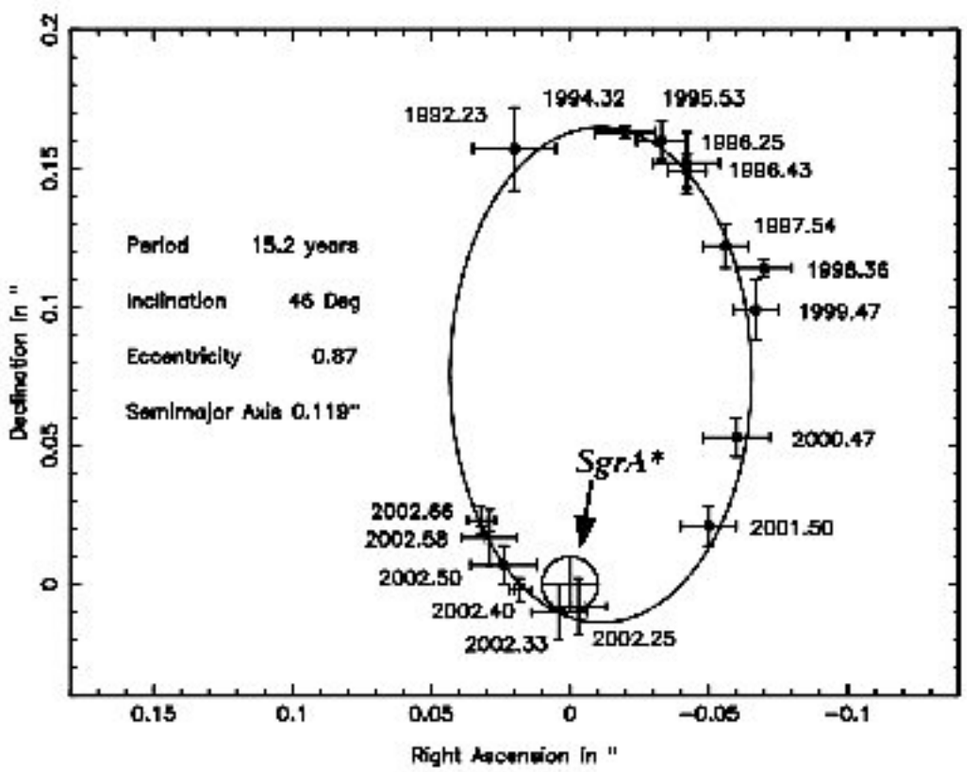
銀河中心へズームイン

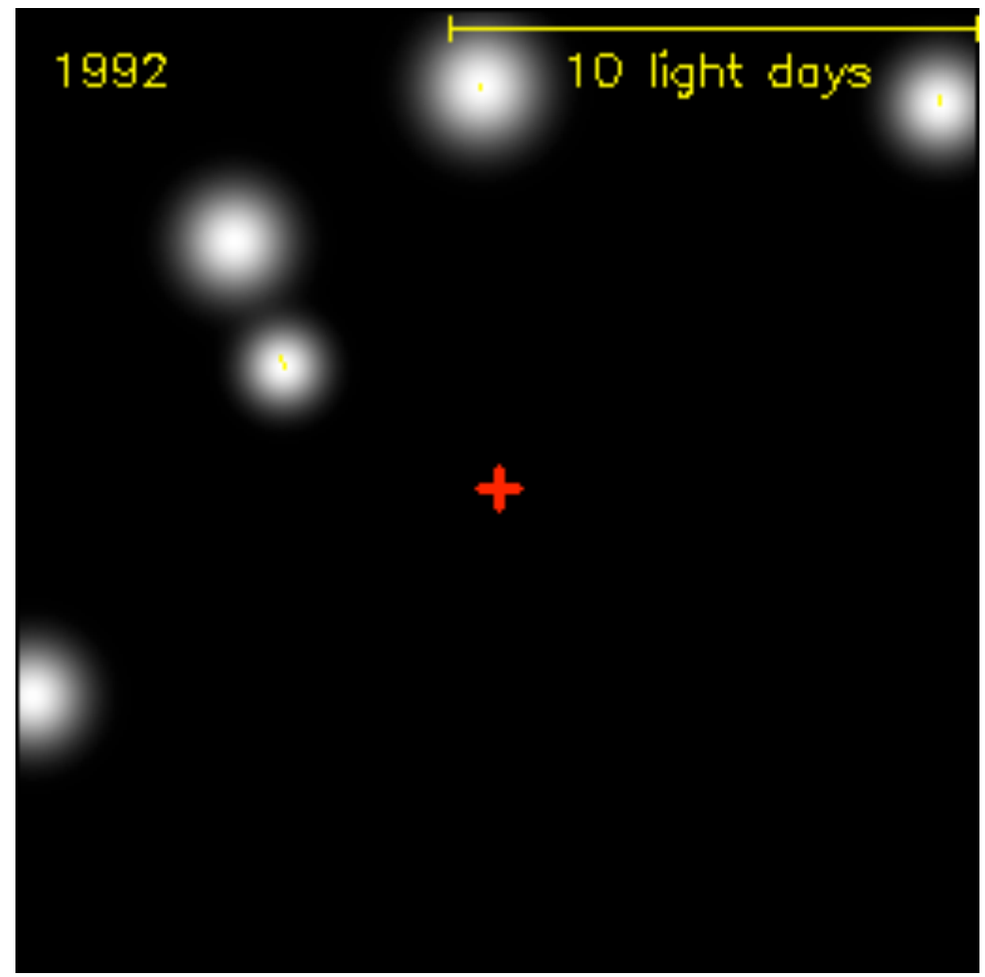


http://www.youtube.com/watch?v=XhHUNvEKUY8 (1:15)

銀河中心にある超巨大ブラックホール



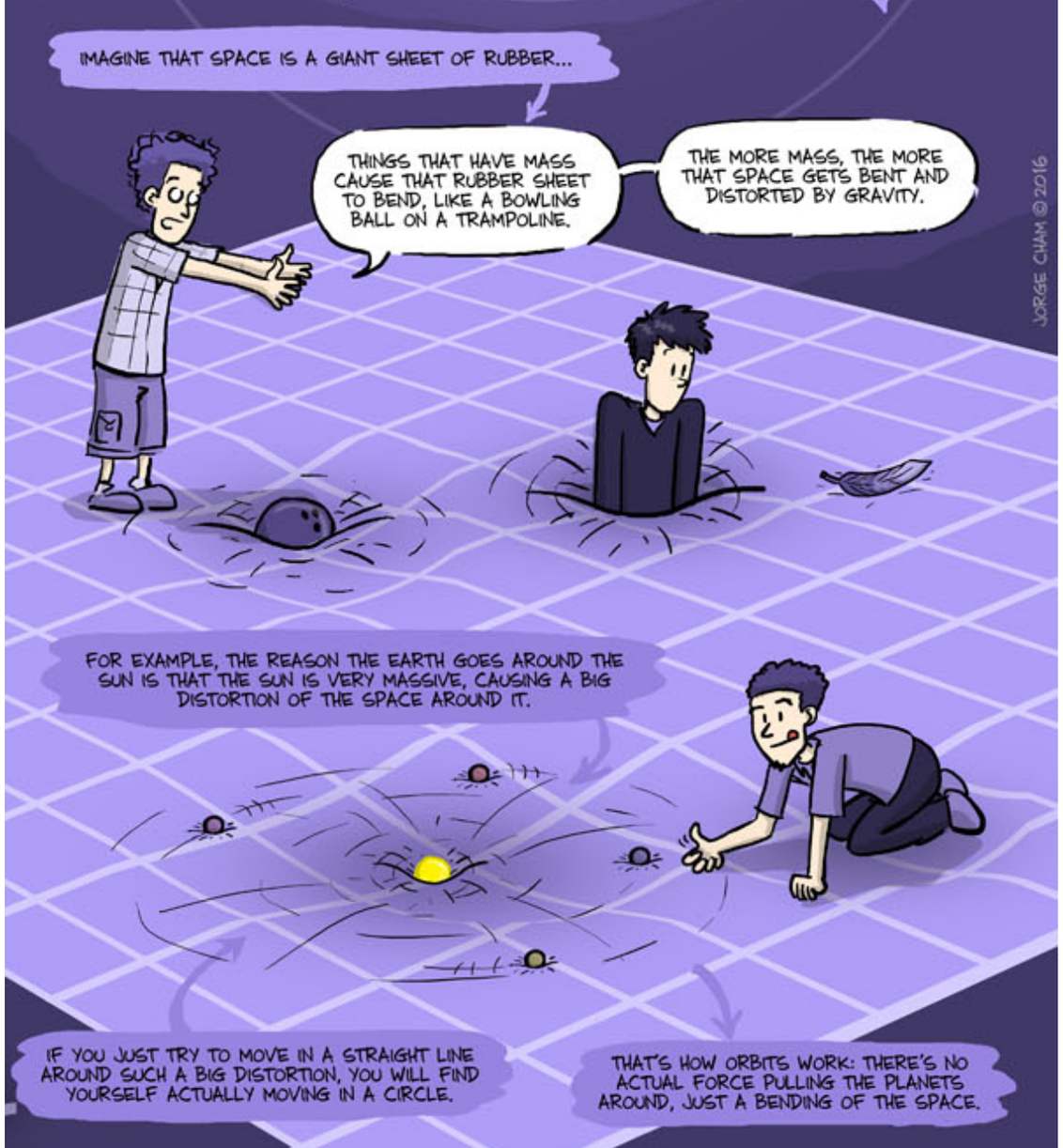


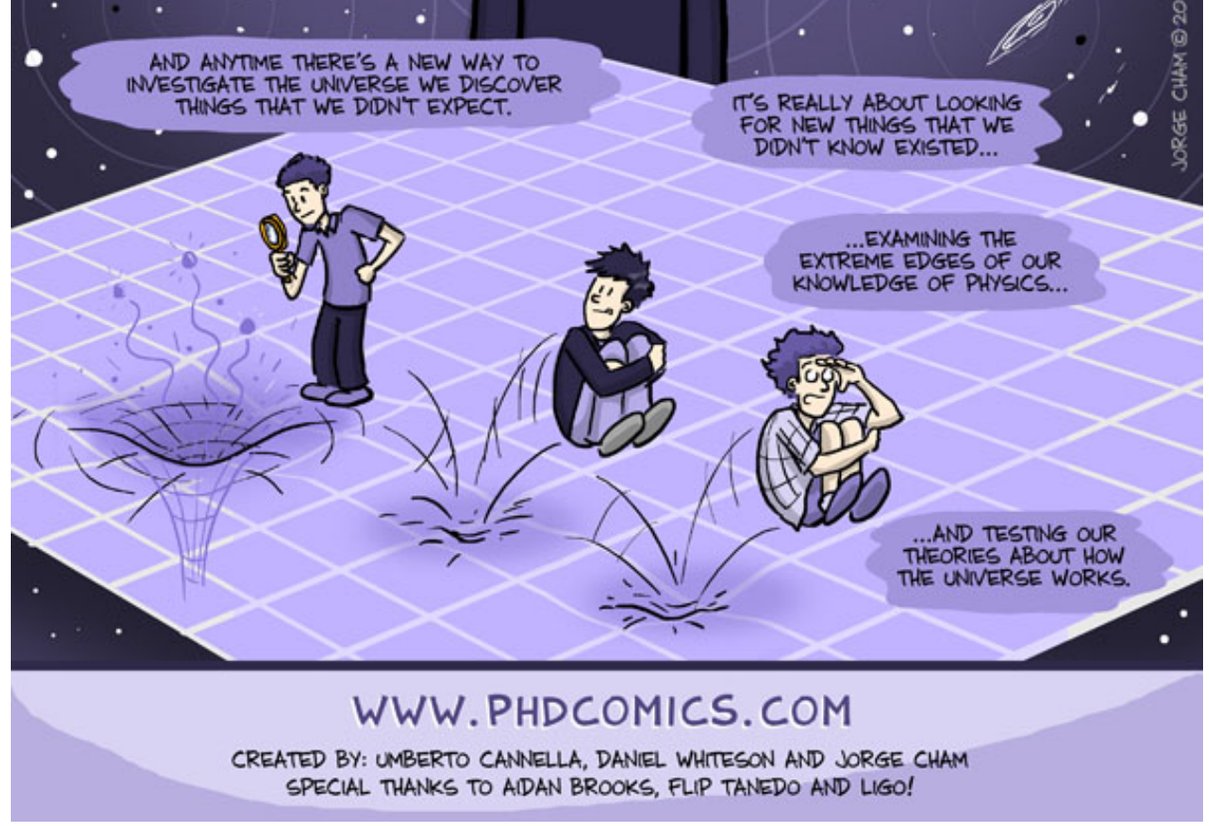
http://www.extinctionshift.com/SignificantFindings08.htm
http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#

ブラックホールは見ることはできない．それでは，
ブラックホールがあることはどうしたらわかるだろうか．

重力波

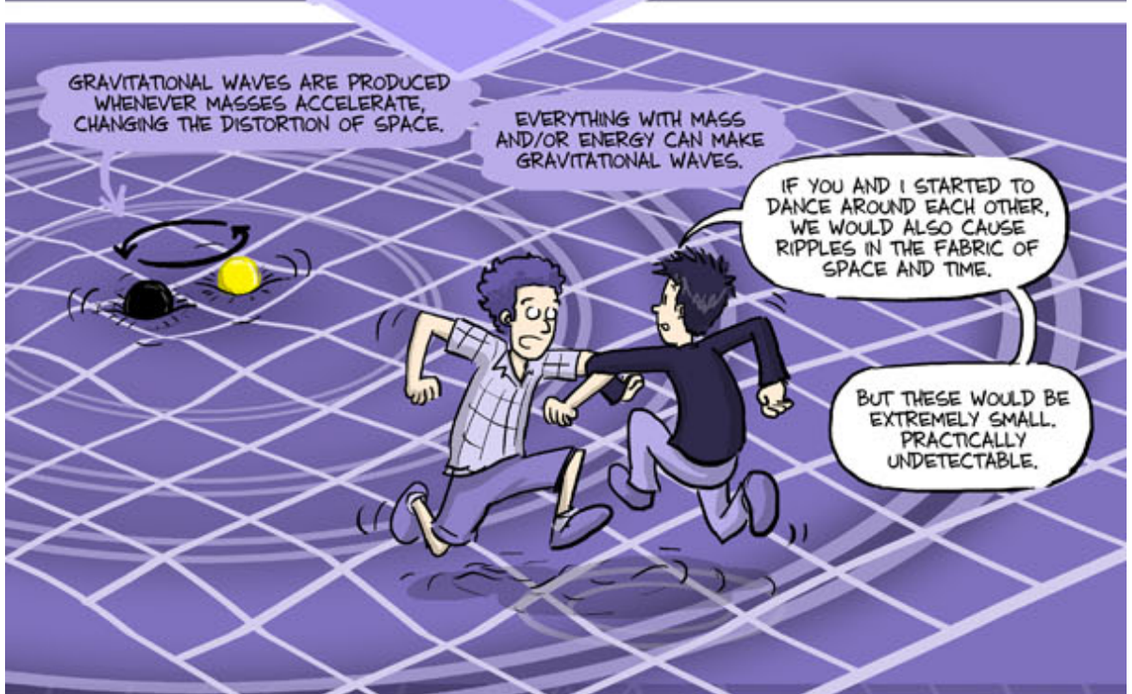
Gravitational Wave

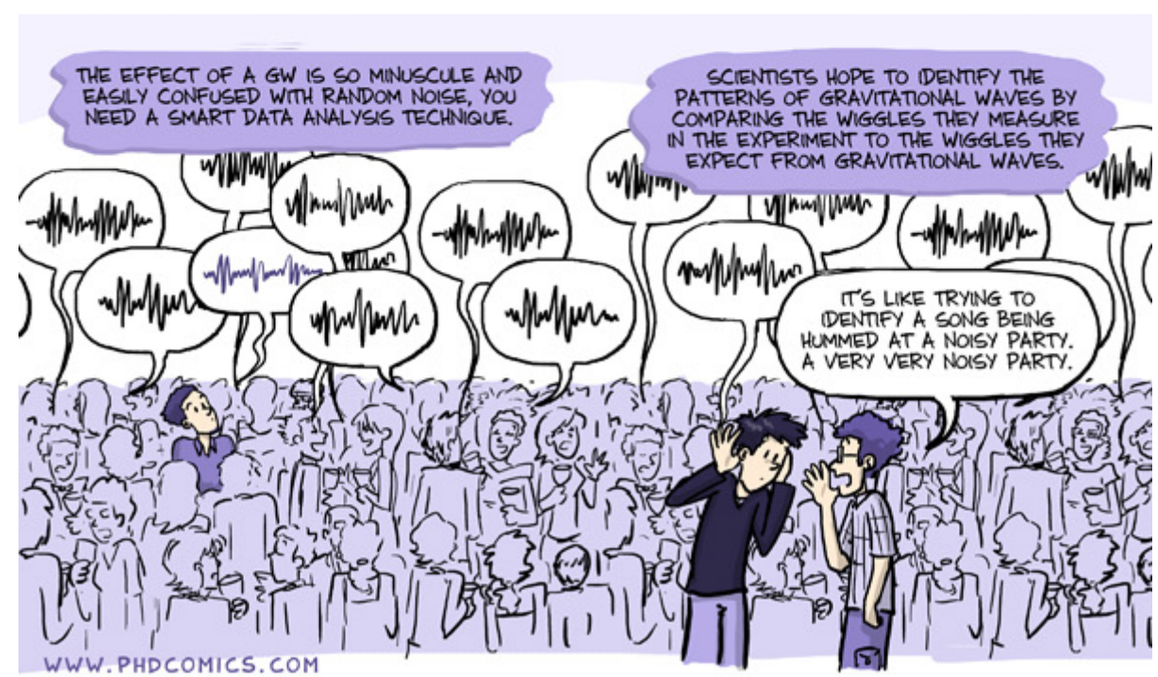




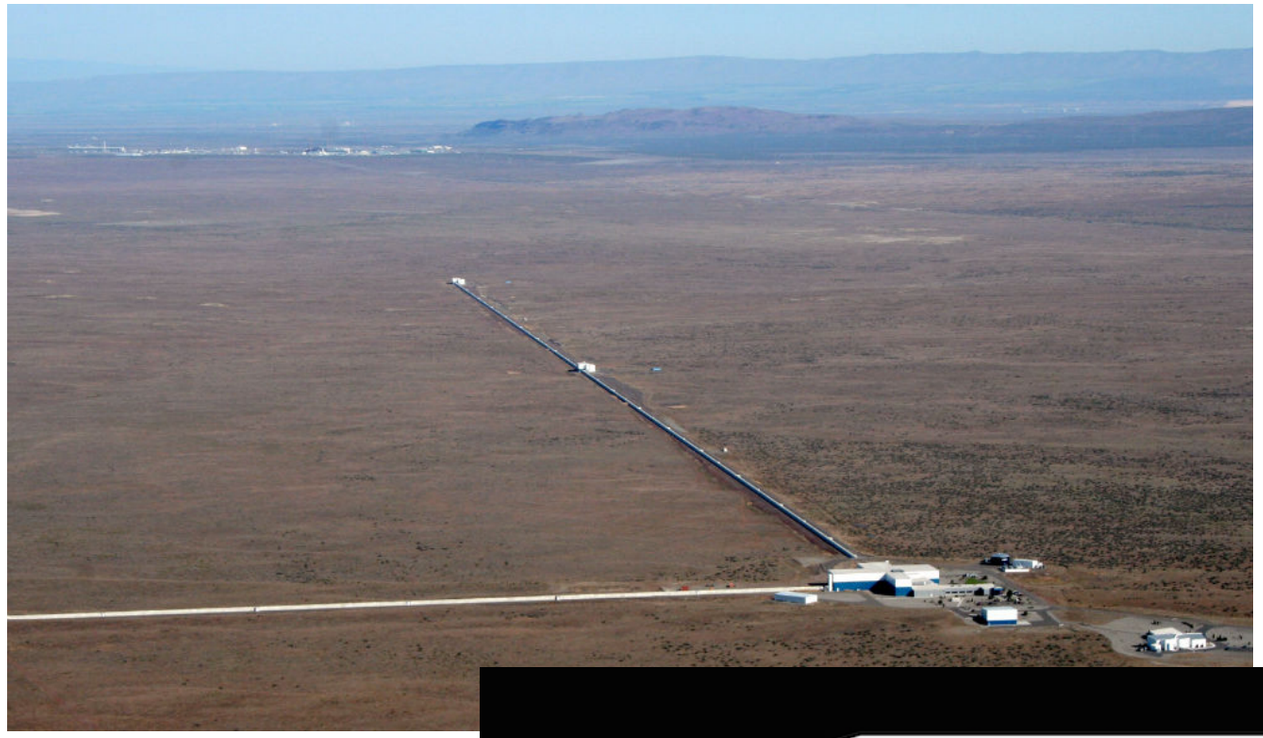
www.phdcomics.com

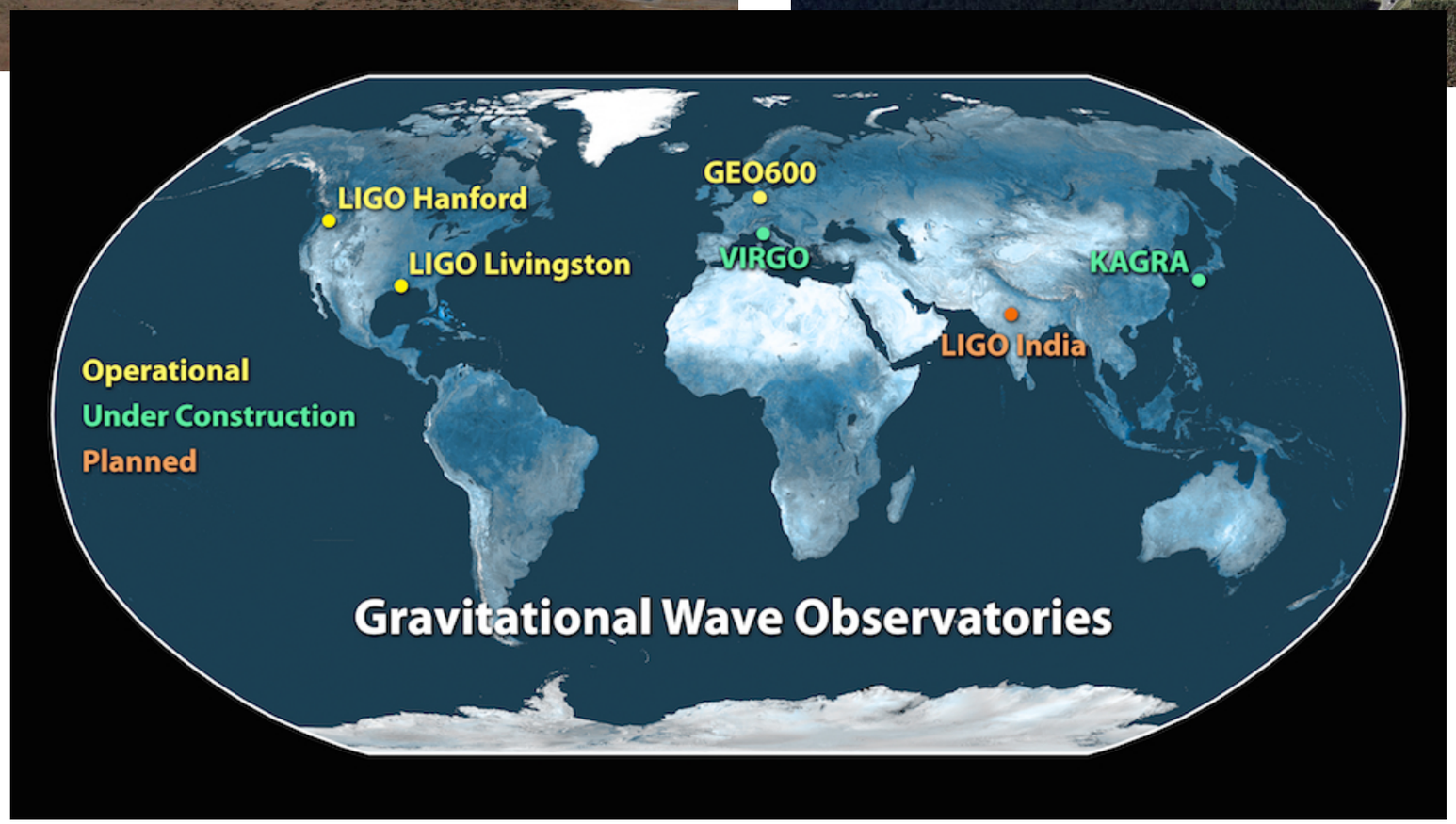
"gravitational waves explained"



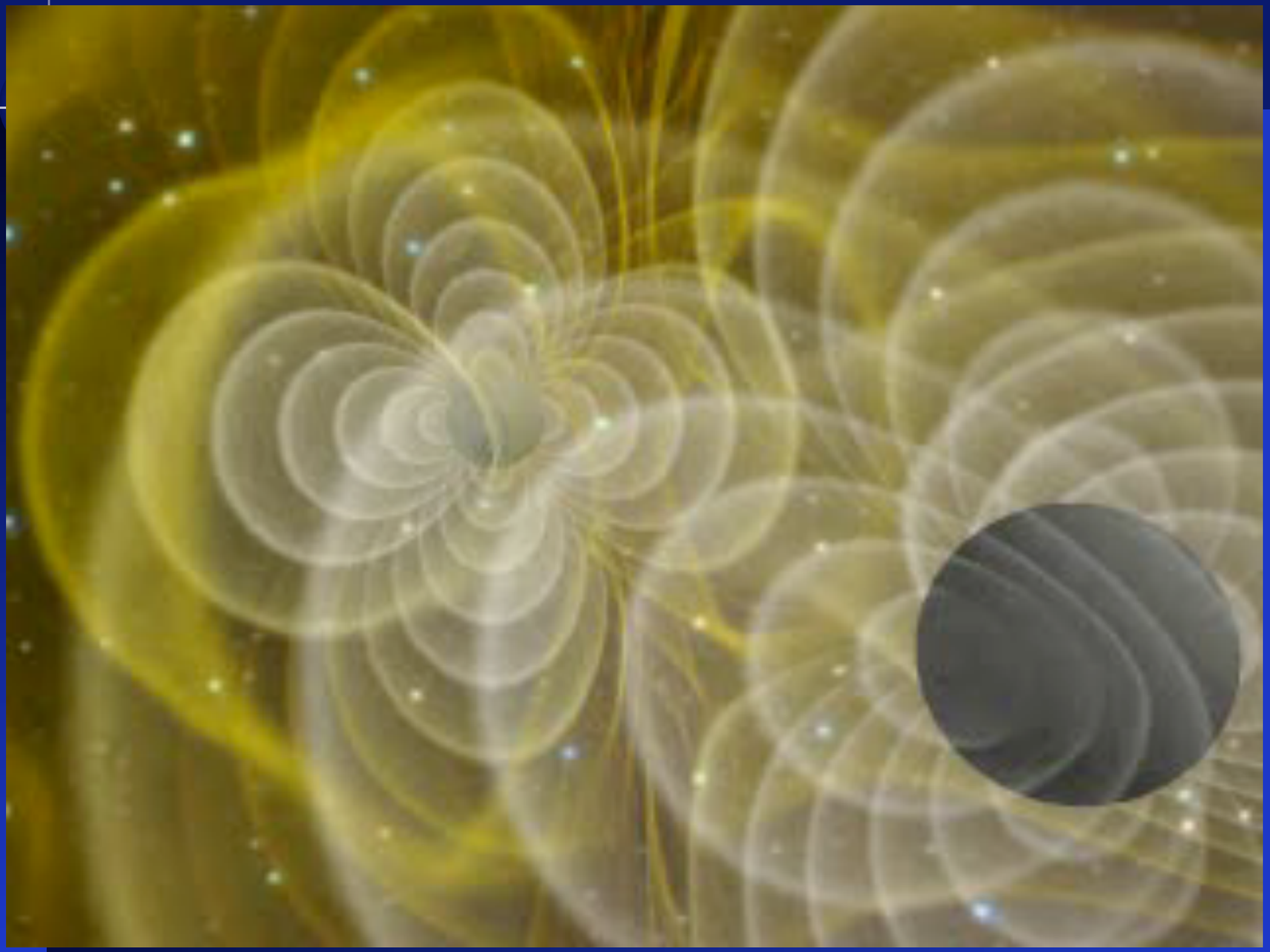


LIGO (Laser Interferemeter Gravitational-Wave Observatory)

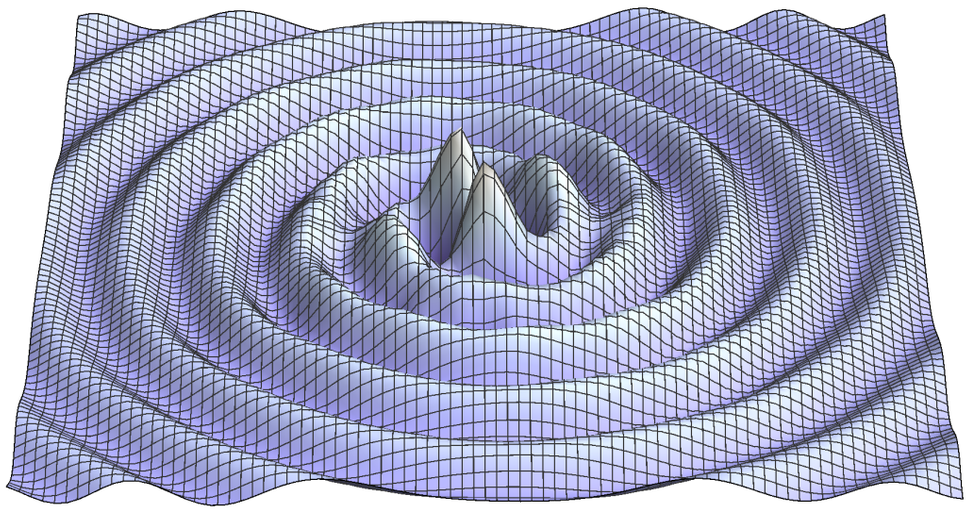




Collision of BH-BH binary



NCSA-AEI group (1998)

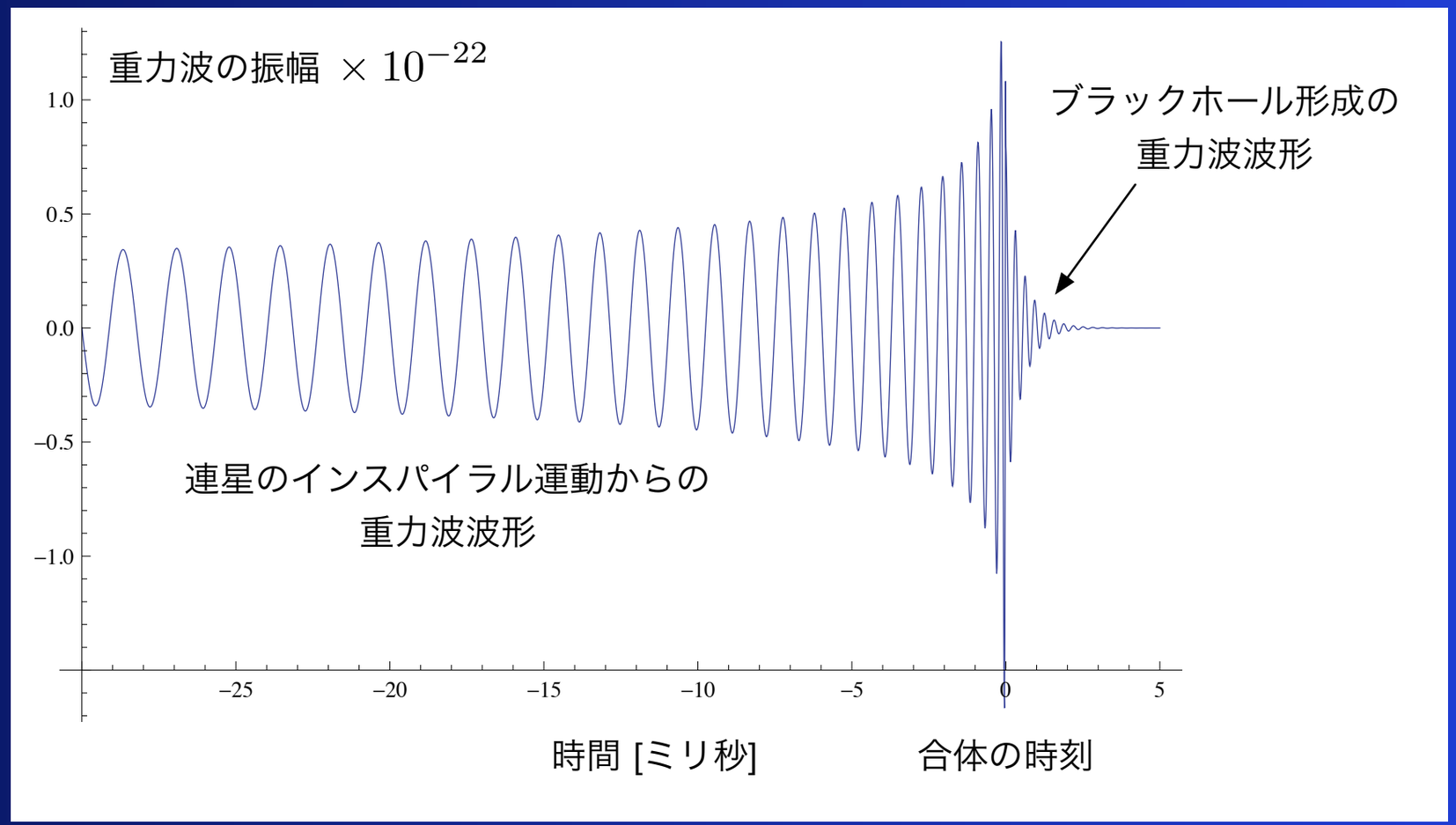


重力波の存在が間接的に確かめられた.

重力波の直接観測をしたい！

連星中性子星

連星ブラックホール



David Reitze, LIGO Director

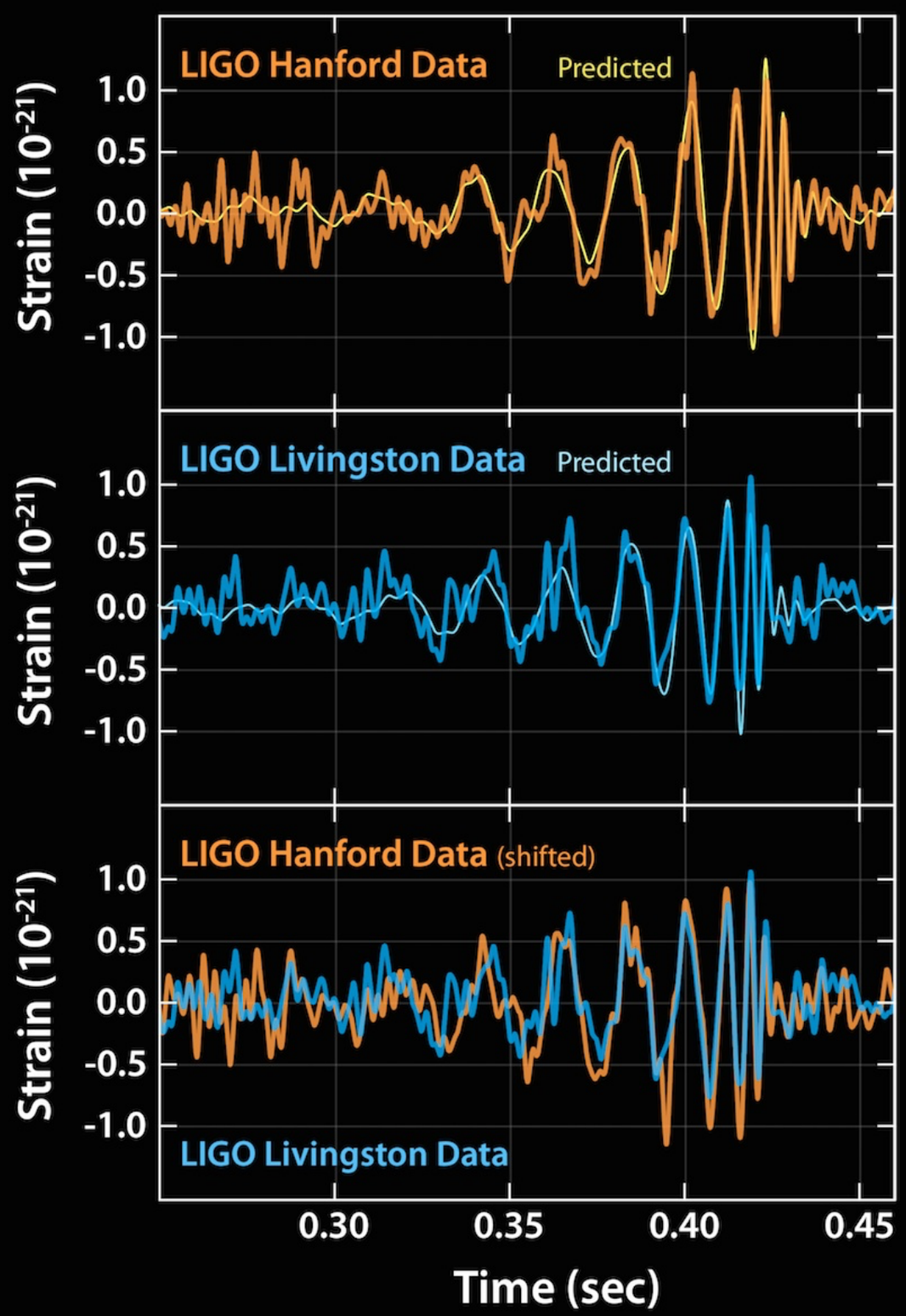
Feb 11, 2016

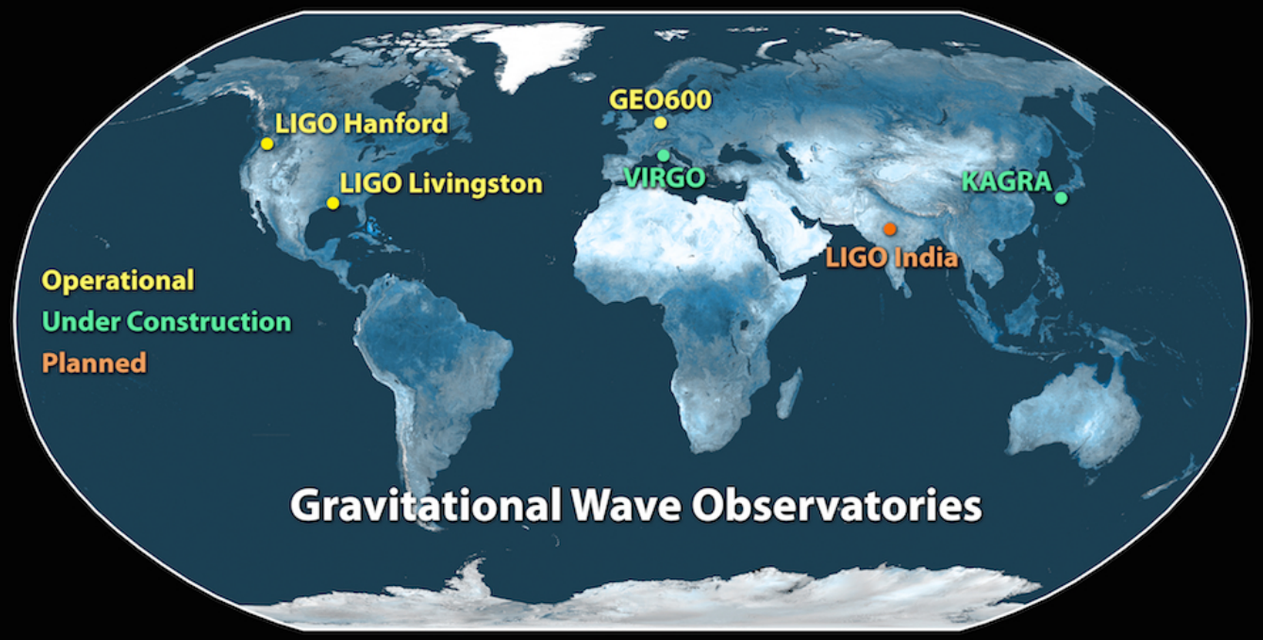
“We had detected gravitational waves.　We did it. ”

“我々は，重力波を検出した.　やり遂げたのだ. ”

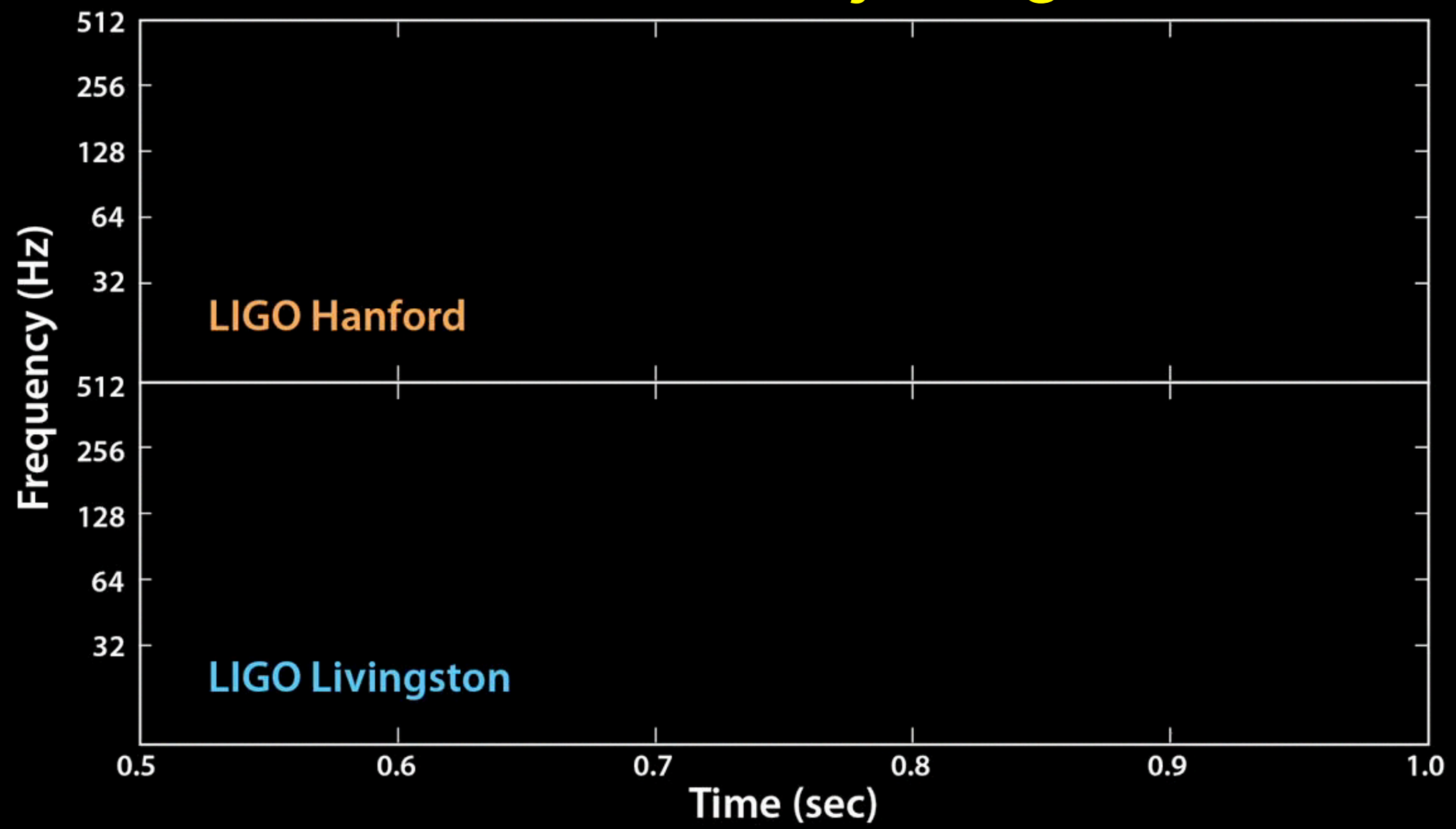
https://www.youtube.com/watch?v=aEPIwEJmZyE

Sep 14, 2015


LIGO Hanford Data
Predicted
LIGO Livingston Data
Predicted
LIGO Hanford Data (shifted)
LIGO Livingston Data
Strain (10^{-21})
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
0.30
0.35
0.40
0.45
Time (sec)


LIGO Hanford
GEO600
LIGO Livingston
VIRGO
KAGRA
LIGO India
Operational
Under Construction
Planned
Gravitational Wave Observatories

Hear the sound of BH-BH collision, 12 billions yrs ago



始め2回は実周波数，後の2回は聞えやすいように+400Hz

https://mediaassets.caltech.edu/gwave

ブラックホール 解明に期待

る精度を目指す。実現すれば七億光年の範囲にある連星からの重力波を捉えられる。一年で十回ほどキャッチできる計算だという。

重力波の大きな特徴はブラックホールからも放出されること。連星が合体してブラックホールが生まれる瞬間を観測できると期待される。時間と空間をねじ曲げてすべてをのみ込むブラックホールは、光も電波も出さないため直接には観測できなかった。その謎に迫る強力な手段になる。

また、弱まらずに遠くまで届くので、遠い星の観測や誕生直後の宇宙の姿を知るのにも役立つと期待されている。

大阪工業大の真貝寿明教授（理論物理学）は「重力波を天文学に使うには、発生した場所を割り出す必要がある。それには望遠鏡が四カ所必要だ。KAGRAを含めた世界的なネットワークが重要」と話す。

Tokyo Shimbun 2016/2/12

重力波 初の直接観測

「研究者勇気づけた」

大阪市大院・神田教授 学生らに解説

米国を中心とした国際研究チームが「重力波」を初めて直接観測したとの発表を受け、重力波の研究が専門の神田展行・大阪市立大大学院教授(51)は12日、発表内容についての説明会を大阪市住吉区の同大杉本キャンパスで開いた。成果を詳しく理解してもらう狙い。学生ら約100人が参加し、真剣な表情で聴き入った。【畠山哲郎】

神田教授は、岐阜県飛騨市の大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」のプロジェクトでもデータ管理グループのリーダーを務める。説明会では観測されたデータの見方などを解説し「我々にとっても勇気づけられるものだった」と語った。発表を受けて、研究室の学生が締め切り間際の論文を慌てて書き換えたエピソードを披露すると、会場は笑いに包まれた。

同大大学院理学研究科2年の和知慎吾さん(23)は「重力波だけでなく、ブラックホールも直接観測したことになると分かり、ためになった」と話していた。

重力波は、質量を持った物体が動いた時に周囲の時空にゆがみが生じ、そのゆがみが光速でさざ波のように宇宙空間に伝わる現象。物理学者のアインシュタインが「一般相対性理論」で存在を予言し、世界中の研究者が観測に挑戦していた。

重力波観測について解説する大阪市立大学大学院理学研究科の神田展行教授＝大阪市住吉区で、川平愛撮影

大阪工大 真貝教授「予想通りで驚いた」

大阪工業大情報科学部の真貝寿明教授（一般相対性理論）は「祝・重力波の直接検出」と題して、研究室のウェブページに一般向けの緊急解説記事を掲載した。昨年には一般向けの解説書「ブラックホール・膨張宇宙・重力波　一般相対性理論の100年と展開」を出版している。「こんなにも予想通りのものが見つかるのかと驚いた。素晴らしい発見だ」と感想を語った。

今後の研究については「日本でもKAGRAを使い、改めて重力波を確認したり、海外のチームと協力して重力波がどこから来たものなのかを調べたりしていくことが重要だ」と話した。【畠山哲郎】

Mainichi Shimbun 2016/2/13

GW exists !

GW was detected !

BHs exist !

BH binaries exist !

GR is right !

ブラックホールは見ることはできない．それでは，
ブラックホールがあることはどうしたらわかるだろうか．

重力レンズ
ケプラー運動
重力波

アインシュタインが提唱して100年，
ようやく相対性理論が天文学に使われるようになりました．