

ブラックホールの世界

松本 桂

(大阪教育大学 天文学研究室)

ブラックホールの世界 ダイジェスト版・目次

理論編

- 1915～1916年：一般相対性理論とシュバルツシルト解
- 1930年代以降：恒星の重力崩壊の理論的研究
- 1960年代以降：ブラックホールの理論的研究の進展

観測編

- 1960年代：ブラックホールらしき天体の相次ぐ発見
 - クエーサーの発見(超大質量ブラックホール)
 - X線連星の発見(恒星質量ブラックホール)
- ～2000年：ブラックホールの状況証拠の蓄積
 - M106 中心部の高速回転
 - M87 中心部の高速回転と相対論的ジェット
 - 天の川銀河の中心部の恒星の高速運動
- 21世紀：直接的なブラックホールの観測事例
 - 初の重力波事象 GW150914 の検出
 - GW190521 の検出(中間質量ブラックホールへの成長途上?)
 - M87* および Sgr A* のブラックホールシャドウの撮影(?)

ブラックホールとは(理論編)

- 重力が強すぎてなにも抜け出せない領域
 - この世の最大速度 = 光の速度(秒速30万km)をもってしても脱出できない
 - ということは、あらゆる情報は出てこない
 - 中がどうなっているか外から知ることはできない
- 質量を持ち重力を及ぼすので、天体とみなせる
 - 質量の割に小さいため重力の井戸がとんでもなく深い
 - そのため、周りに物質があると普通の天体よりかえって強力なエネルギー源になる
 - 本体は見えないが、周囲では様々な活動現象が生じる

重力

- あらゆる物に備わる引っ張るのが専門の力(万有引力)
- 私たちは地球の重力によって常に引っ張られている
 - 上へジャンプしても地面へ戻ってくる
 - もし重力がなければ宇宙まで飛んで行ってしまふ



重力(万有引力)の法則(1687年)

- アイザック・ニュートンは惑星の運動の法則(ケプラーの3法則)を一般化して重力の法則を完成させた
- 重力の作用はほぼ完璧に説明できたが、なぜ物体間に重力が働くのか、その原理は神の御業とした



星表面での脱出速度 (escape velocity)

- ある星の重力を振り切って宇宙へ飛んでゆることができる速度
 - それ以下の速度だと、いずれ星へ引き戻される
- 脱出条件は運動エネルギー \geq 位置エネルギー
- 運動エネルギーと星の表面での位置エネルギーが釣り合う速度

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{R} \quad \text{したがって} \quad v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

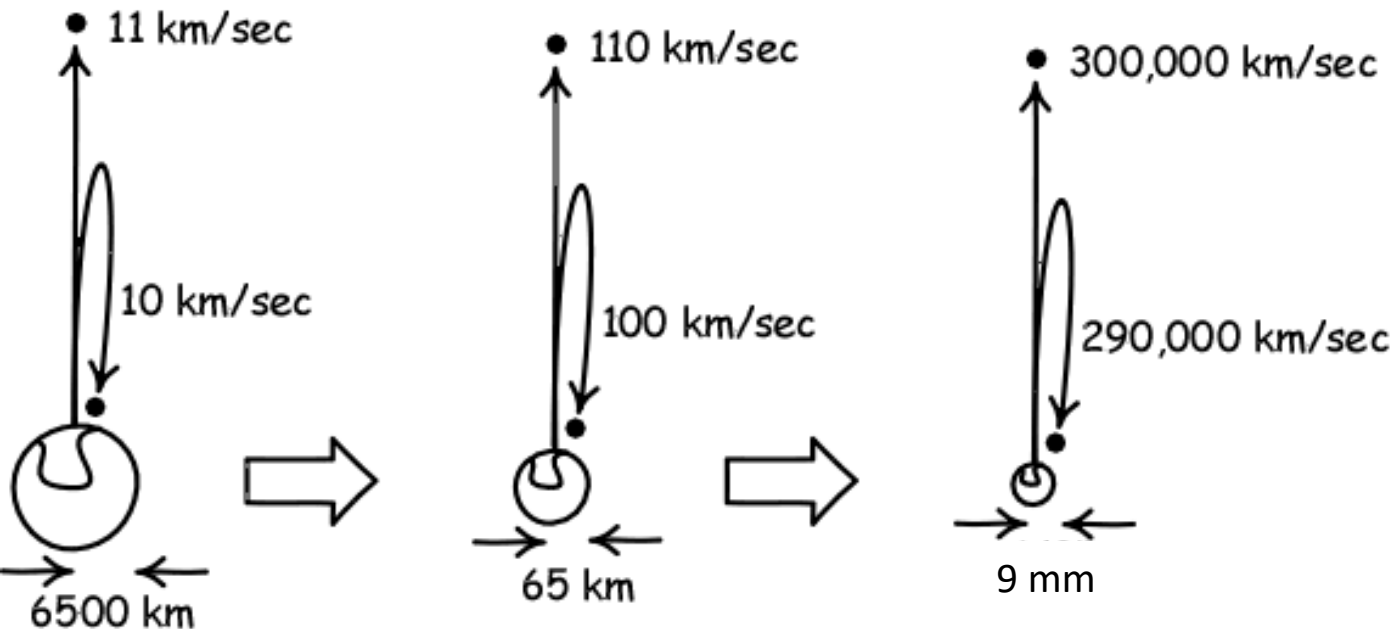
- 脱出速度 v_{esc} は、星の質量 M に比例し、半径 R に反比例する
- ここで脱出速度が光速に等しくなる星の半径を考えると、

$$R_c = \frac{2GM}{c^2}$$

- 質量 M の星の半径が R_c より小さい場合、脱出速度が光速より大きくなってしまふ \rightarrow なにも出られない

いろいろな天体の脱出速度と、 脱出速度が光速を越える「暗黒天体」となる半径

天体	脱出速度 $v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$	脱出速度が光速になる半径 $r_c = \frac{2GM}{c^2}$
地球	11.2 km/秒 (4万km/時)	9 mm
木星	59.5 km/秒	3 m
太陽	617.5 km/秒	3 km
ブラックホール	>300000 km/秒	質量に比例



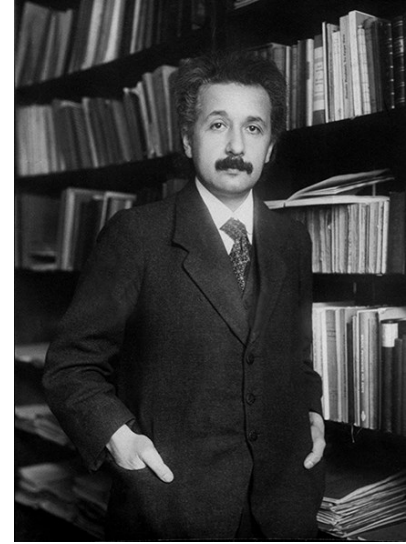
地球を半径9mm以下まで圧縮すると、脱出速度が光速を超える

ニュートン力学の範疇でもこのような暗黒天体は考察されていた

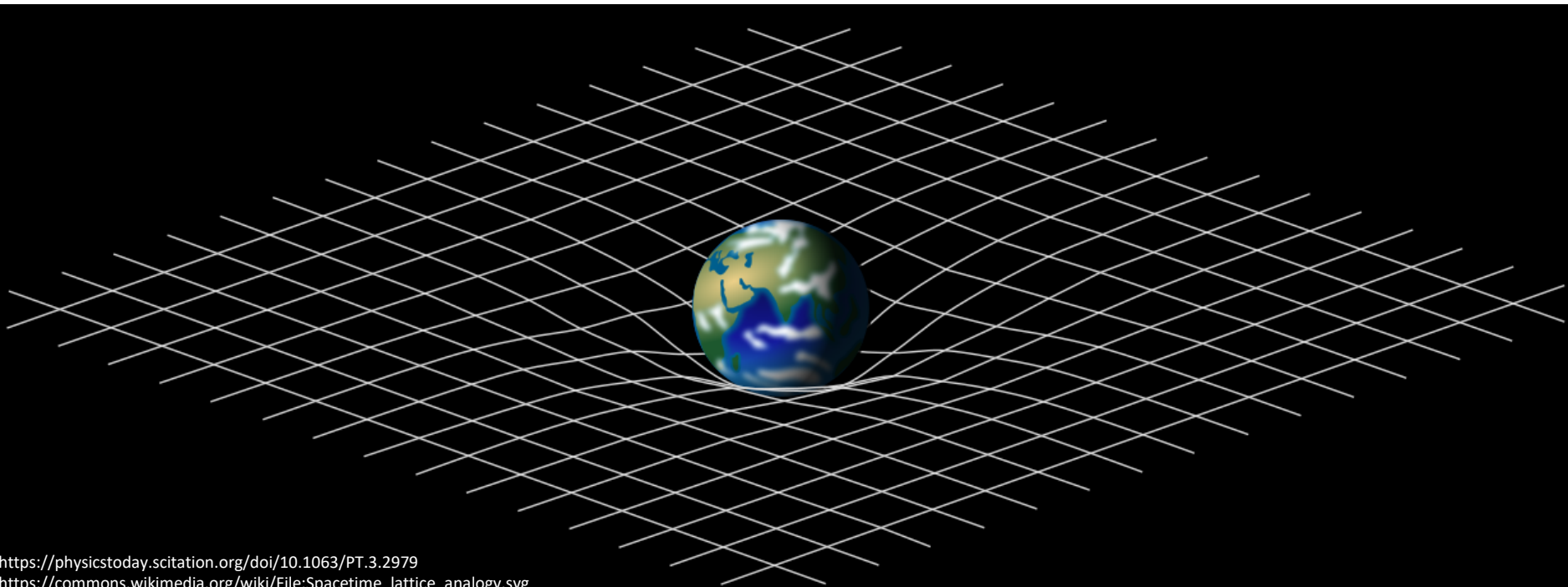
ただし最終的に戻ってくる(重力を振り切れていない)ならば、一時的に飛び出すことは可能

一般相対性理論(1915年)

- アルベルト・アインシュタインは、重力の正体を時空の歪みで説明する理論を完成させた
- 物体が存在すると、その周囲の時空が歪む
- 時空が歪むと、付近の物体は曲がった時空に沿って運動し、そこに重力が作用しているように観測される

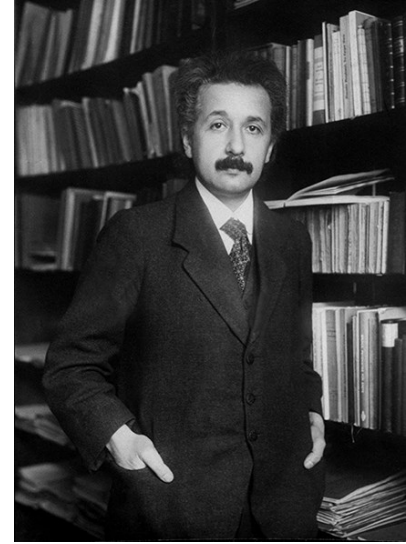


Einstein in 1916

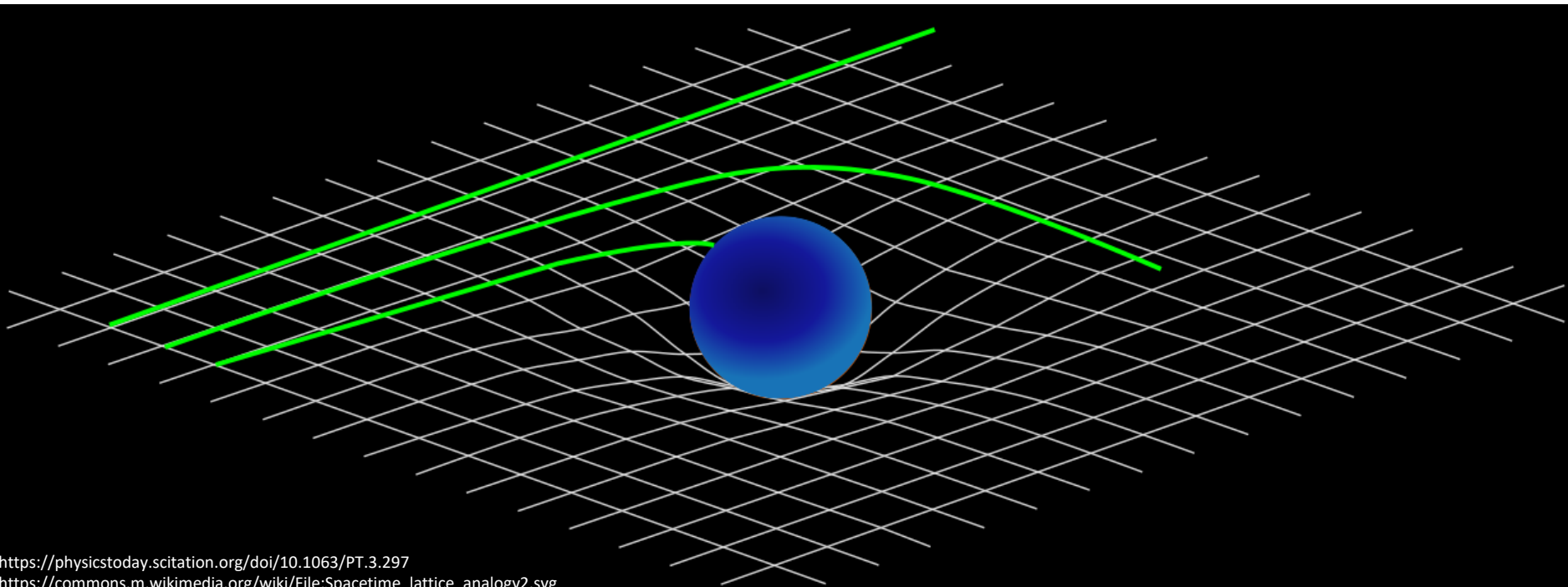


一般相対性理論(1915年)

- アルベルト・アインシュタインは、重力の正体を時空の歪みで説明する理論を完成させた
- 物体が存在すると、その周囲の時空が歪む
- 時空が歪むと、付近の物体は曲がった時空に沿って運動し、そこに重力が作用しているように観測される

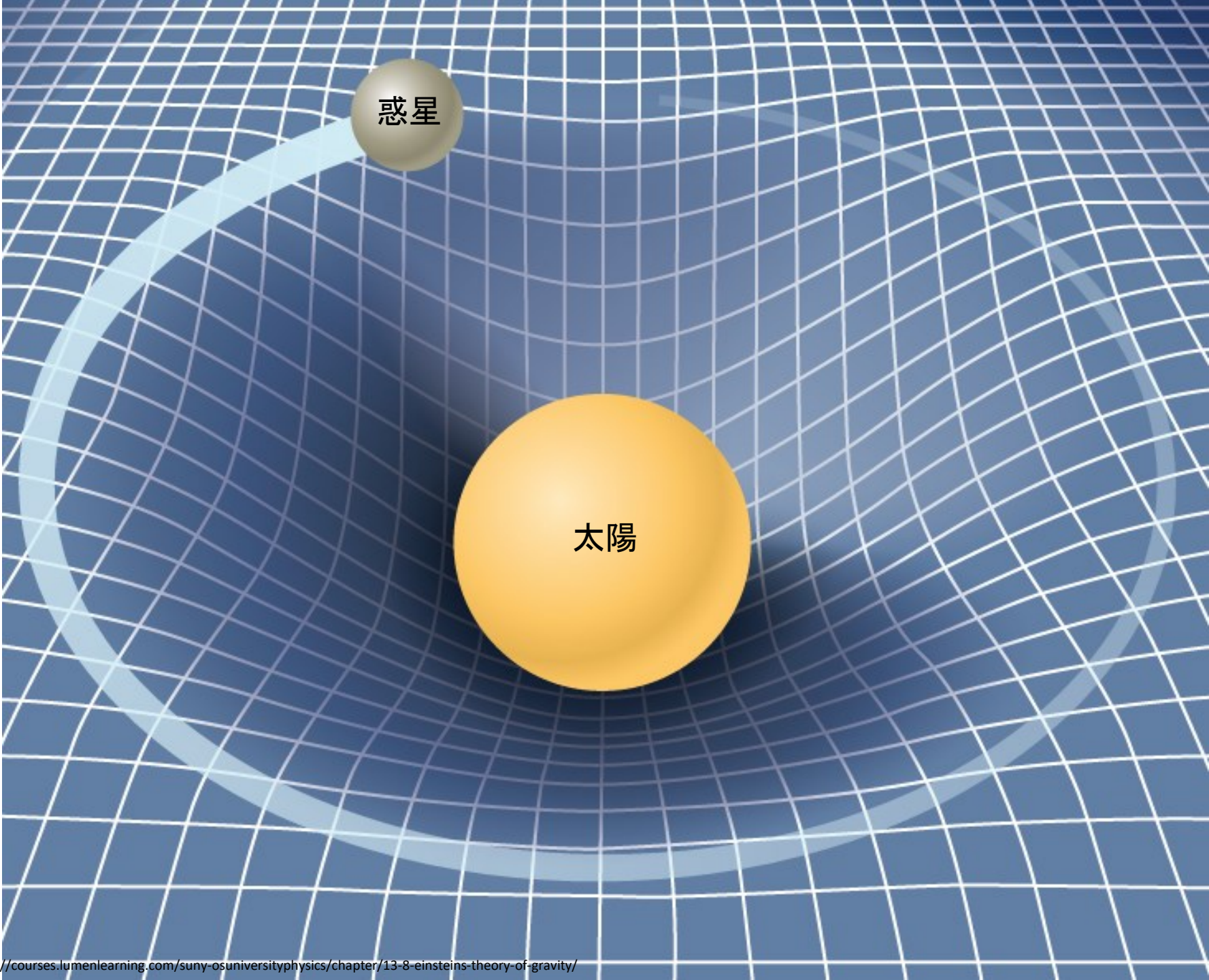


Einstein in 1916



惑星

太陽

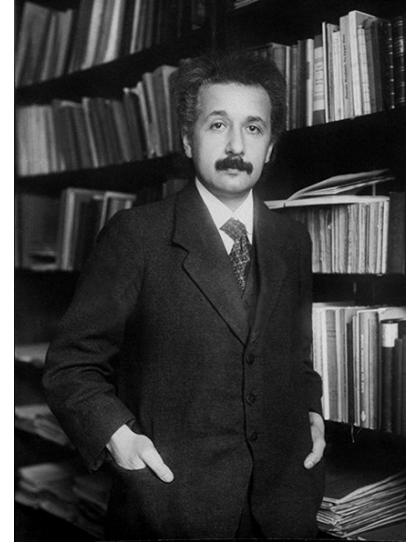


一般相対性理論のアインシュタイン方程式

- 「物体の存在」と「時空の歪み」を関係付ける重力方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の歪み具合 (係数) 物体やエネルギーの分布



Einstein in 1916

- 一般相対性理論による重力の説明
 - 物体やエネルギーが存在すると、その周囲の時間と空間(時空)が歪む
 - 時空が歪むと、そこに重力(万有引力)が存在するように観測される
 - 重力の正体を時空の歪みで説明する
- “一般相対性理論とは、空間が物体に運動の仕方を教え、物体が空間に曲がり方を教える理論である”(ジョン・ホイーラー)

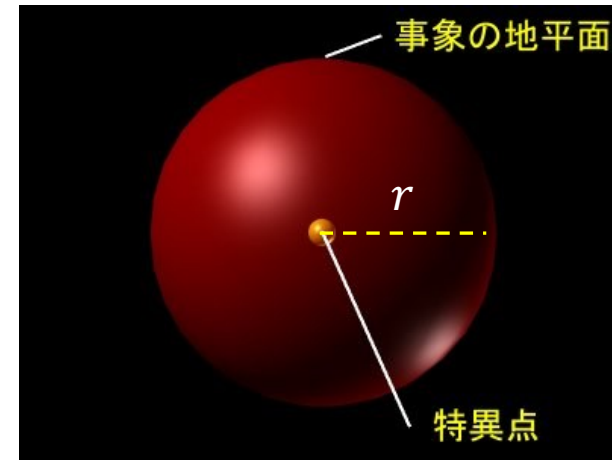
シュバルツシルト解 (1916年)

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

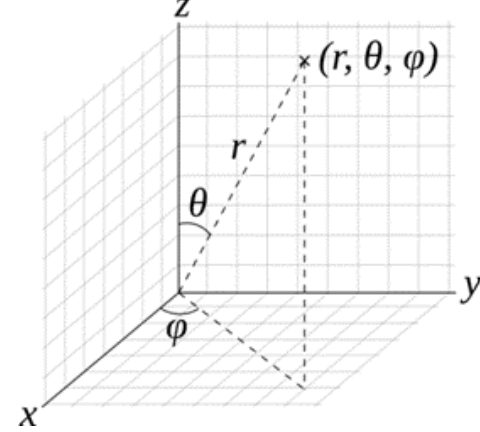


Karl Schwarzschild

- カール・シュバルツシルトによって得られたアインシュタイン方程式の史上最初の解
 - 簡単化のため、質点を除き真空、球対象、静的な時空を仮定したときの解
- 特定の2つの半径(中心からの距離 r)において、0除算(特異点)が発生する
- 第1項: $r = 0$ における特異点
 - 時空の曲率が無限に大きくなる(時空特異点)
- 第2項: $r = 2GM/c^2$ における特異面
 - 情報の伝達が一方向となる球面(事象の地平面)
 - シュバルツシルト半径と呼ばれる



シュバルツシルト解に現れる特定の半径
(中心からの距離 r)における二つの0除算



$$ds^2 =$$

$$- \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2$$

時間 t の項

$r = 0$ で特異点
(時空特異点)

$$+ \frac{1}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} dr^2$$

距離 r の項(円筒座標系の一部)

$r = 2GM/c^2$ で特異点
(事象の地平面)

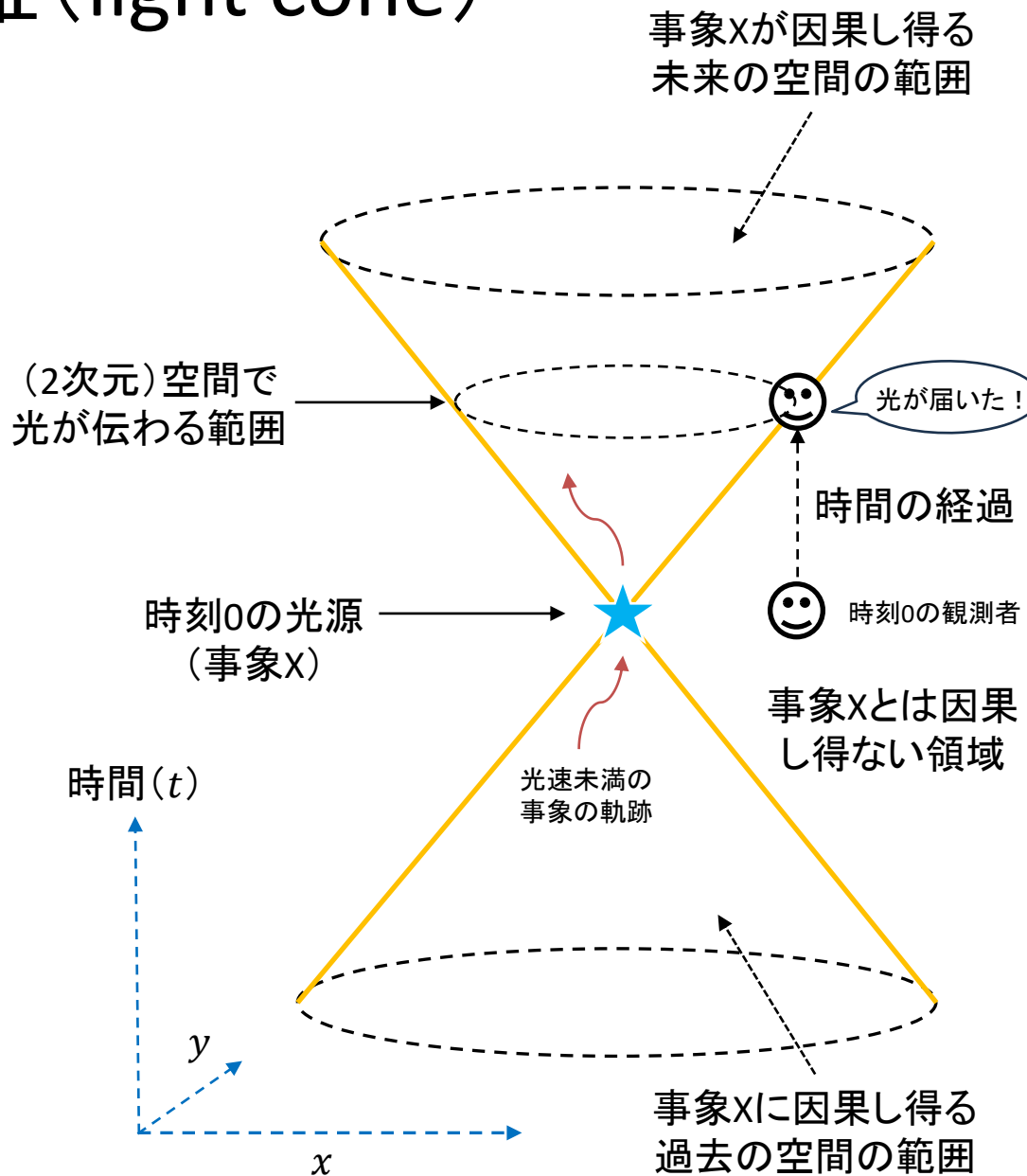
シュバルツシルト半径

$$+ r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

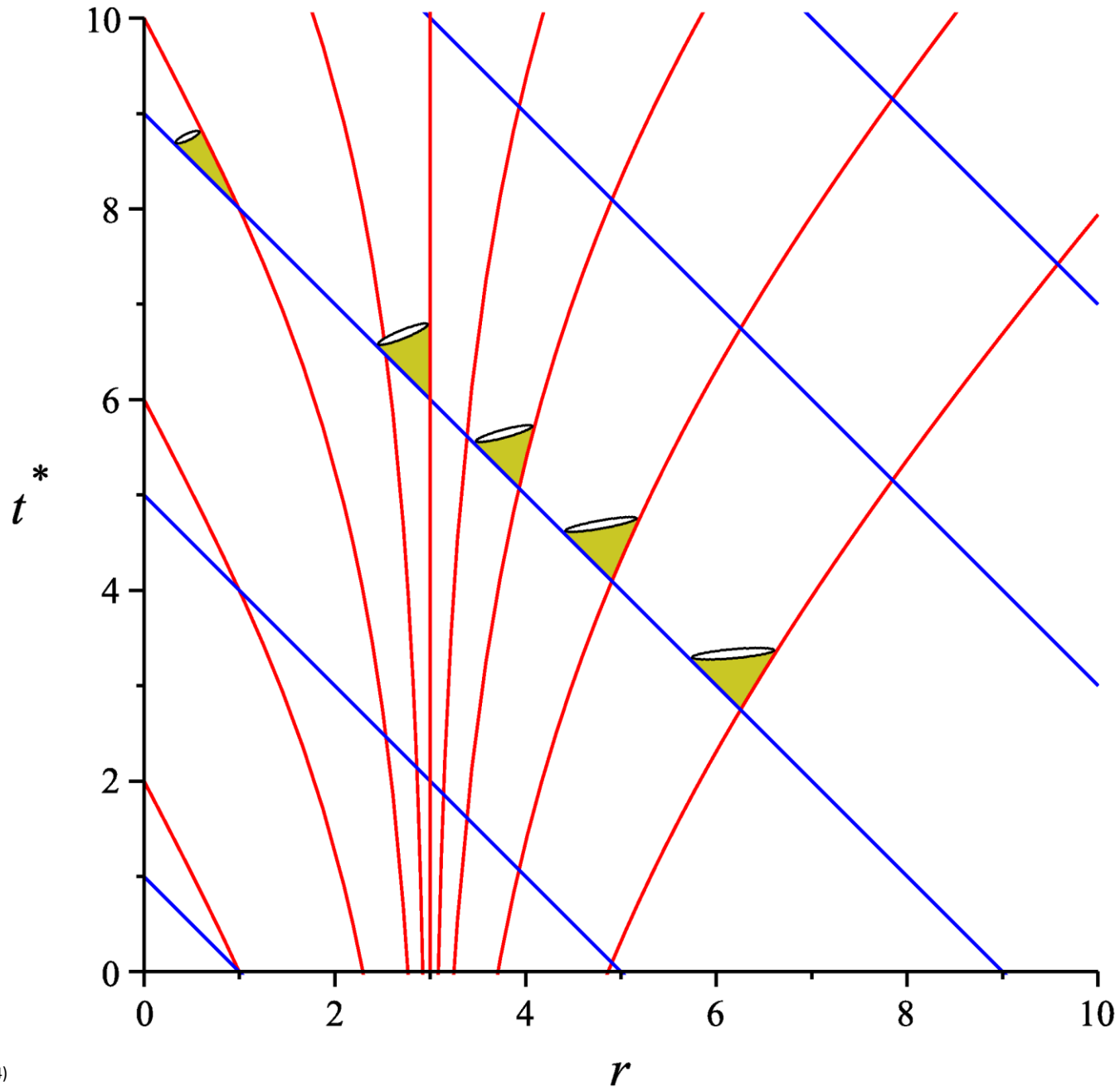
緯度 θ と経度 ϕ の項(円筒座標系の一部)

光円錐 (light cone)

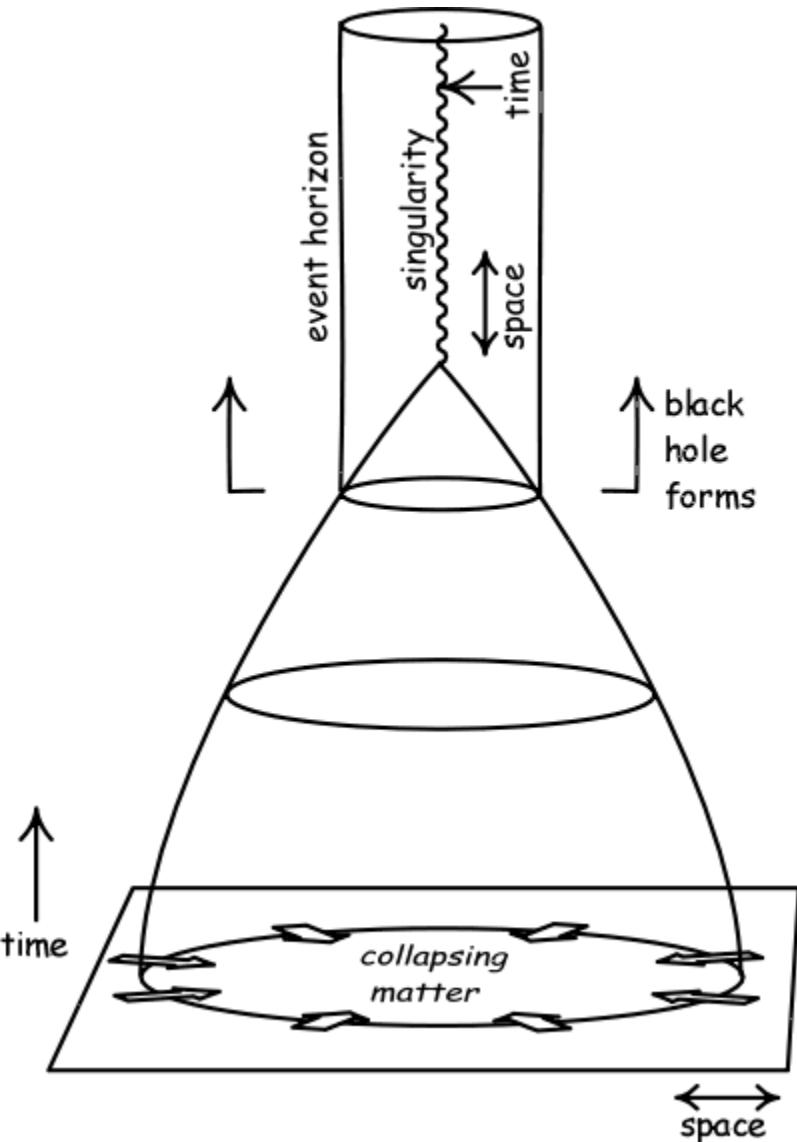
- 光が放出された後、時間とともに広がってゆく様子を示す模式図
 - 空間3次元に時間1次元を加えた4次元の座標軸は描けないので便宜的に空間は2次元だけ考える
- 座標の原点の事象Xから放出された光は、未来の方向へ一定の速さ(光速)で広がる(斜め45度の線)
- 光速(この世の制限速度)により、事象Xと因果関係を持ち得る未来と過去の空間の範囲が決まる



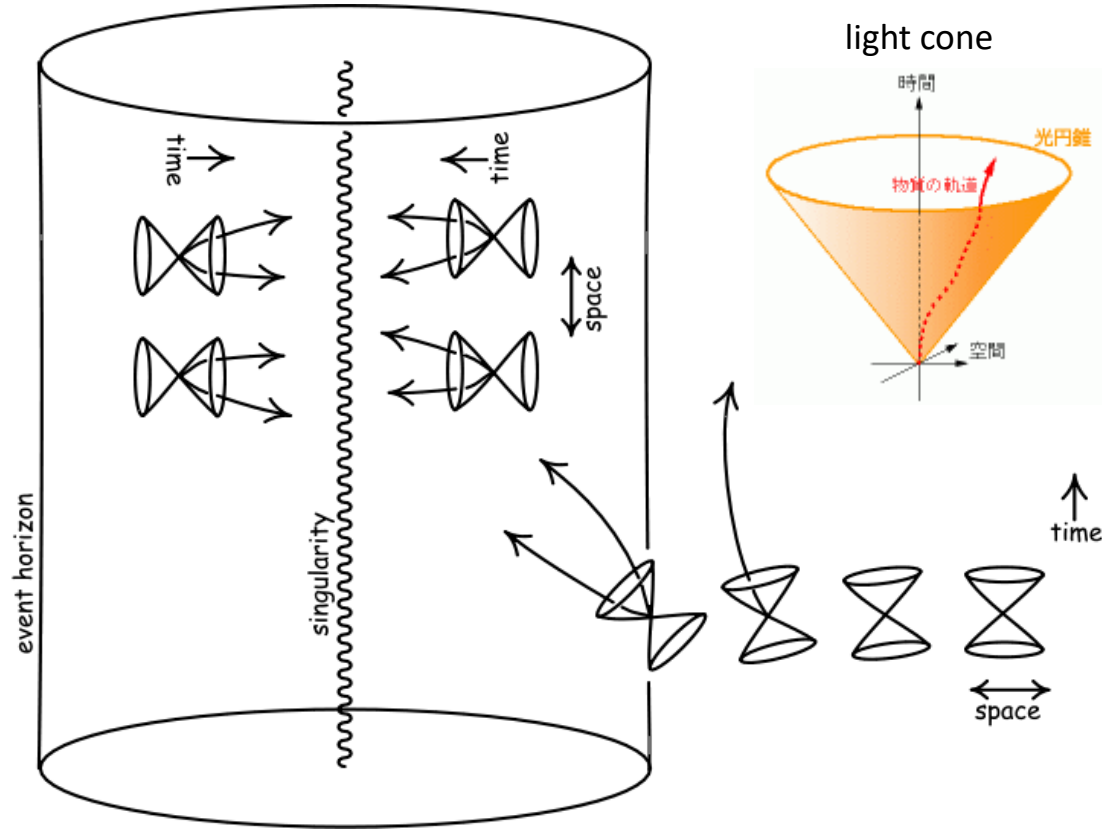
Space-time diagram in advanced Eddington-Finkelstein coordinates



重力源の近くでは光円錐の傾きが変化する



ペンローズによる、どのようにブラックホールができるのかの図



一般相対論によるブラックホールの解釈では、事象の地平線の内側では特異点から離れる方向の空間が存在しなくなる(一瞬でも外向きに空間を進むことができない)ため、一方的に特異点へ向かって進むしかない。

一般相対性理論による「暗黒天体」

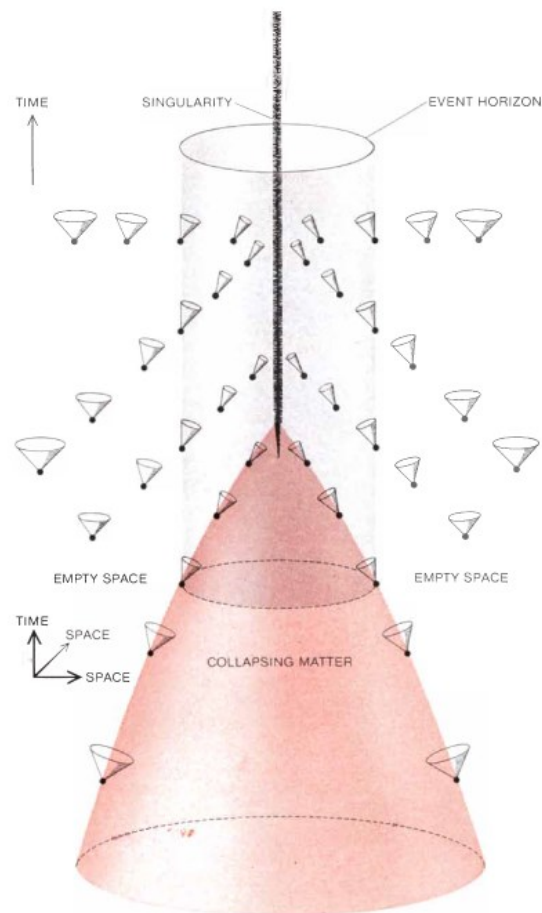
- ニュートン力学に基づく「脱出速度が光速を超える暗黒天体」は、一時的であれば脱出が可能
- 一般相対性理論に基づく「ブラックホール」では、一瞬たりとも脱出不能
 - 強大な重力により時空が歪む
 - シュバルツシルト半径の内側では中心の特異点から離れる方向の空間が存在しなくなる
 - これが「重力が強すぎてなにも抜け出せない領域」の本当の意味

重さの割にとんでもなく小さな天体

- ブラックホールの大きさ = シュバルツシルト半径 $2GM/c^2$
 - 質量 M に比例する (かつ質量 M だけに依存)
 - 偶然だが脱出速度が光速になる半径の計算式と全く同じ
- 地球 (質量 6×10^{24} kg の物体) のシュバルツシルト半径は 9mm (ビー玉くらいの大きさ)
- 太陽 (質量 2×10^{30} kg = $1 M_{\odot}$) だと半径 3km
 - ちなみに $10^{30} = 100$ 穰 = 1 兆 \times 1 兆 \times 100 万
- ブラックホールの質量は太陽質量単位で表す
 - $10 M_{\odot}$ なら半径は 30km
 - 400万 M_{\odot} なら半径は 1200万 km

現実の宇宙には存在しないだろう論

- 現実の物体で、シュバルツシルト半径以下まで質量が詰め込まれる状況は、常識的にはまず考えられない
- シュバルツシルト解は解法の簡単化のため理想的すぎる状況を仮定している
- 現実にはこのような天体は存在しないだろうとの考え方が1960年代頃までは主流だった
- 1938年にオッペンハイマーは重い星が重力崩壊するとシュバルツシルト解の状態が実現する可能性に行き着いた
- 1965年にペンローズは、一般相対論に従えば重力崩壊する物質は必然的に特異点になることを数学的に証明した（特異点定理）

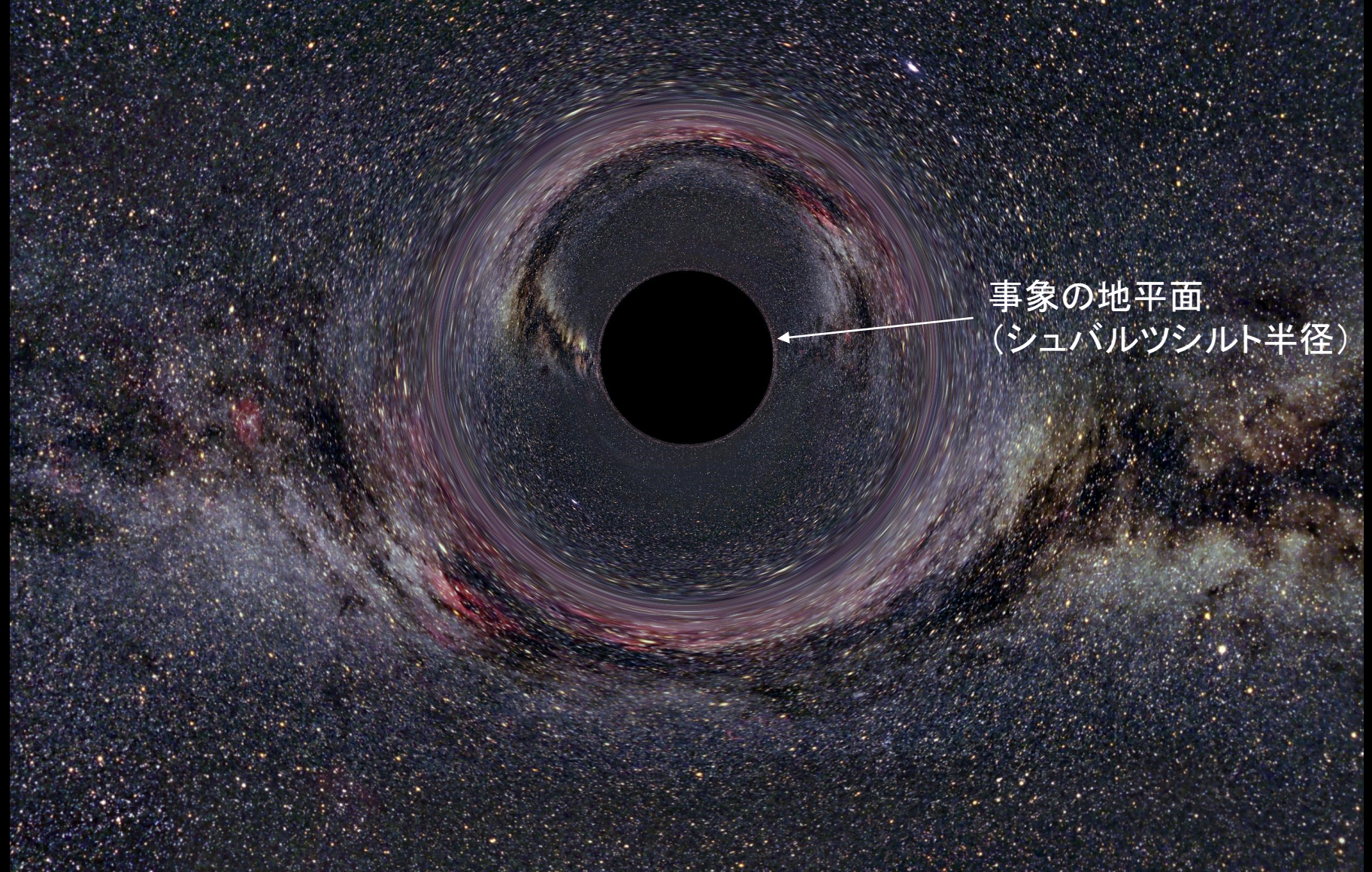


SPHERICAL GRAVITATIONAL COLLAPSE of a star can be depicted in a space-time diagram in which two of the three space dimensions are plotted horizontally and the time dimension is plotted upward. The star collapses until its gravitational field becomes so strong that light cannot escape, creating an event horizon. The matter of the star collapses down to a "singularity" of zero volume and infinite density where the present laws of physics break down. The propagation of light signals from various points is indicated by light cones. The light from points closer to the strongly attracting singularity is displaced more toward the singularity than light from points farther away. Even though the light cones are depicted tilted near the singularity, the special theory of relativity still holds for the local frames of reference of the light cones and the speed of light is still the limiting velocity. Compare this space-time representation of the behavior of light near the event horizon with the purely spatial representation on the opposite page. The spatial representation may be taken to be a horizontal section through the above space-time picture.

どうにかして星をぎゅうぎゅうに圧縮できるとする



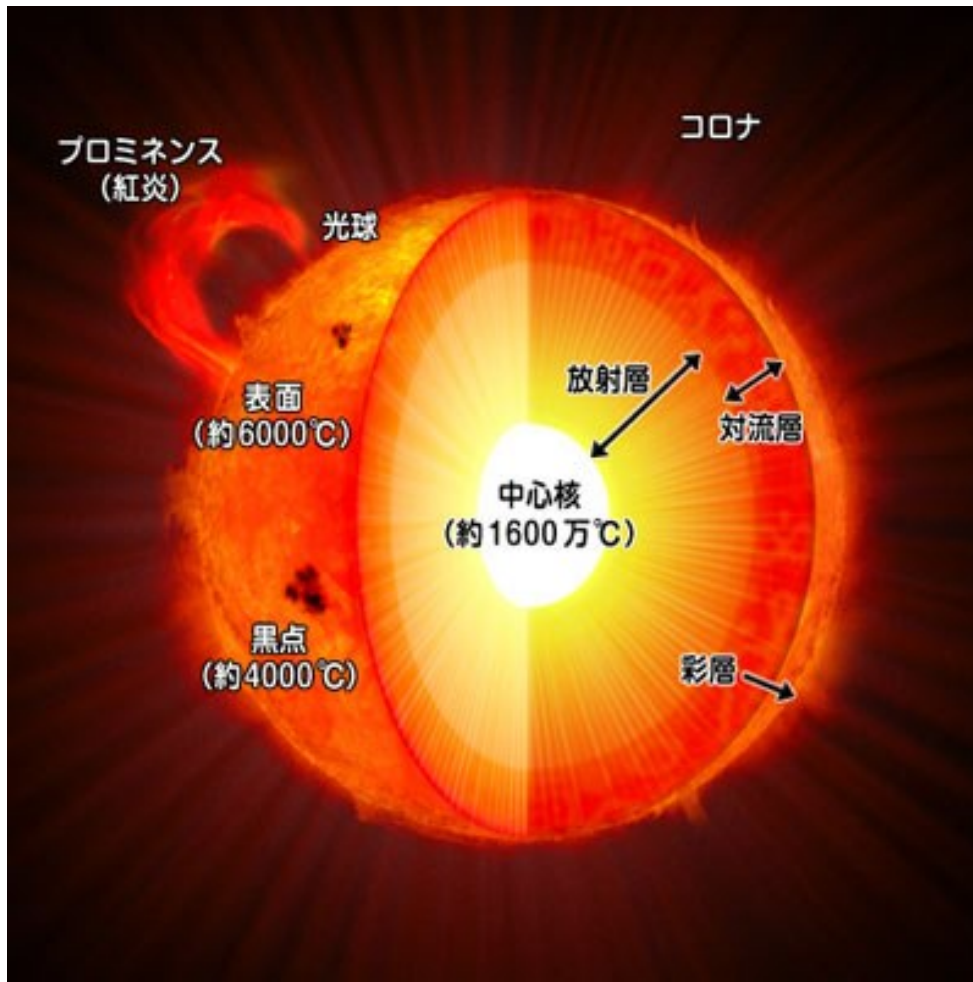
その星のシュバルツシルト半径以下まで収縮すると**ブラックホール**



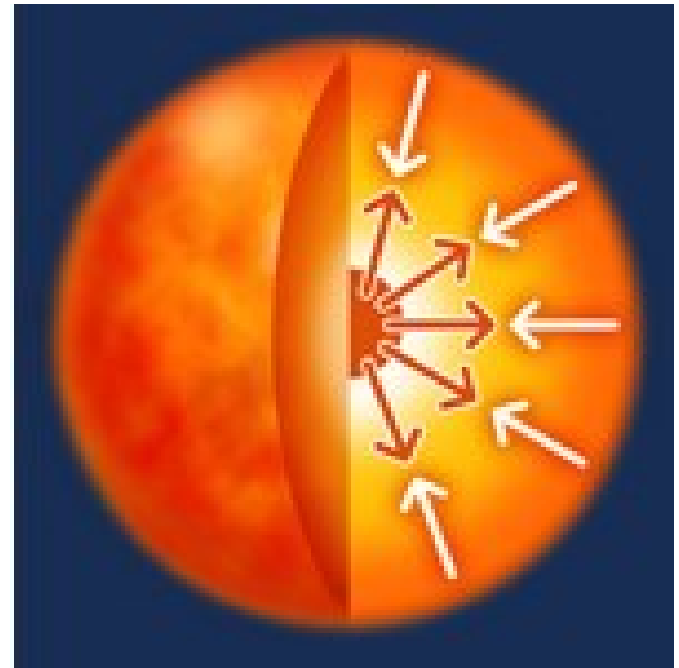
事象の地平面
(シュバルツシルト半径)

星(恒星)とは

- 中心部での核融合反応でエネルギーを生成し、その圧力で自重を支えているガス体 (そのままだと自重でつぶれる)
- 星間ガスが重力で集積し、中心部で核融合反応が開始することが恒星の誕生
- 核融合の燃料が枯渇するまでの時間が恒星の寿命



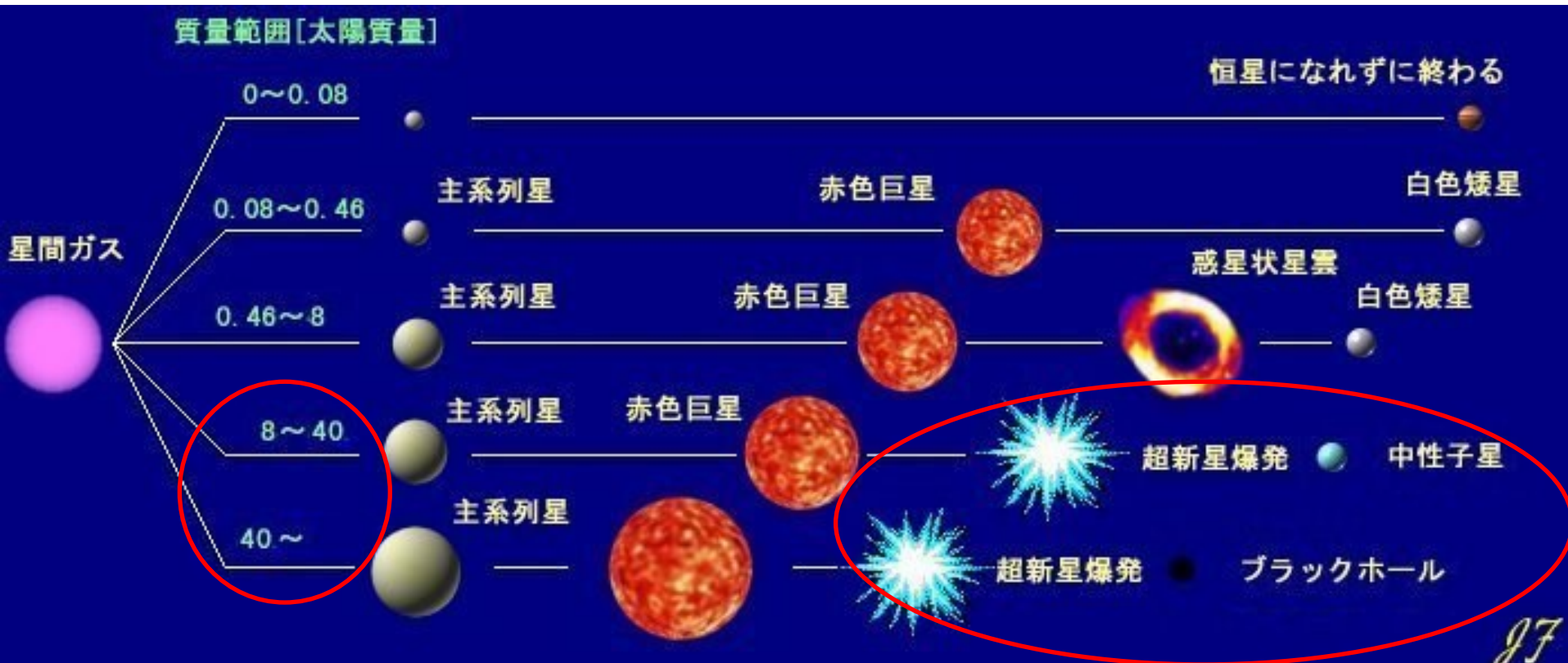
自分の重さを中心核で作られる
外向きの圧力で支えている



外向きの圧力を作ることができなくなると自重でつぶれる(重力崩壊)

大質量星の死

- 太陽質量の「8倍以上」の重い恒星の場合
 - 重力崩壊の結果、星のコアが圧縮され、電子捕獲で生じた中性子の縮退圧で自重を支える中性子星が形成される
 - 落下してくる星をはねかえし超新星爆発となり星を四散させる

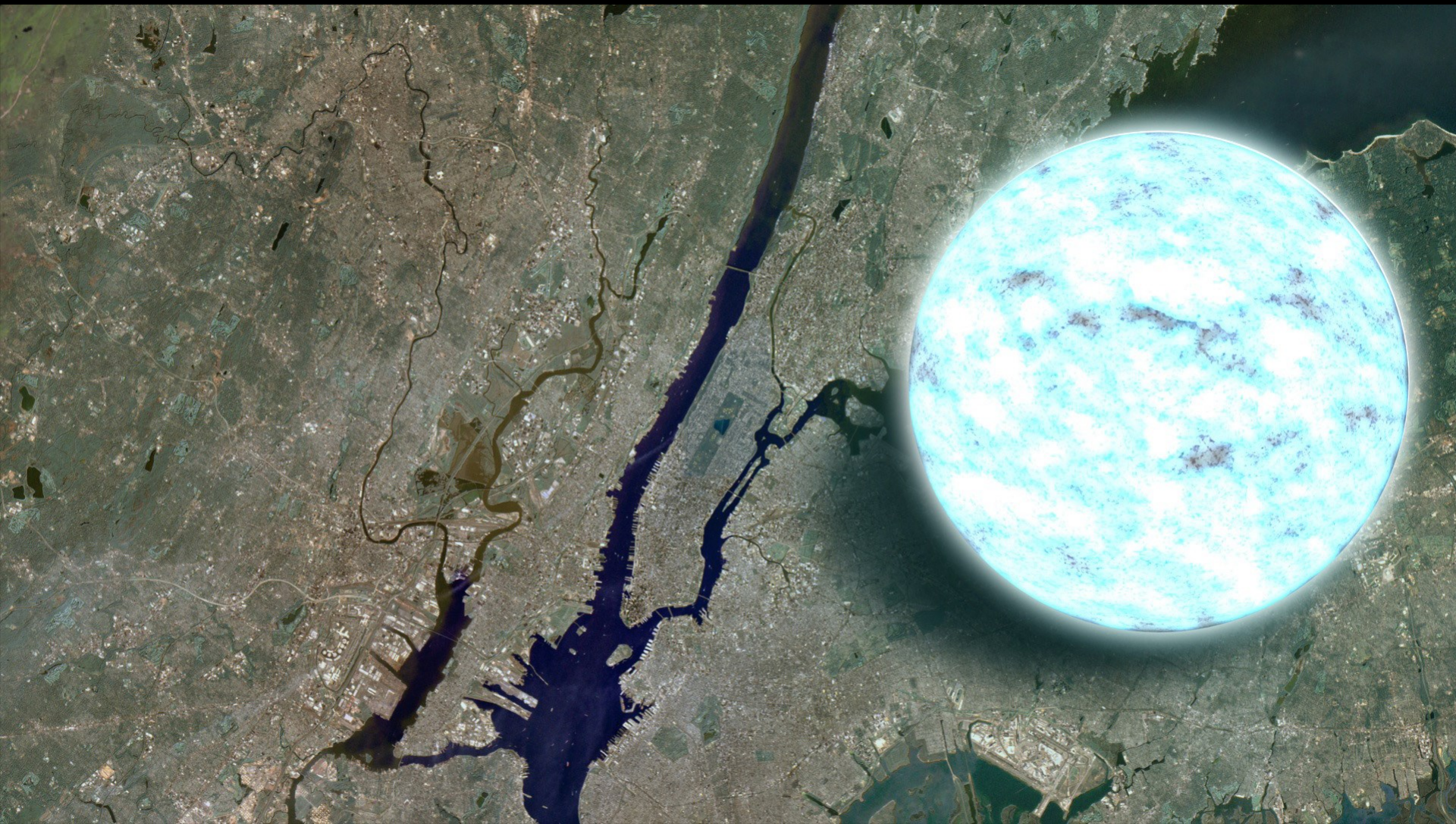


超新星爆発 (supernova explosion)



SN 2011fe
in M101

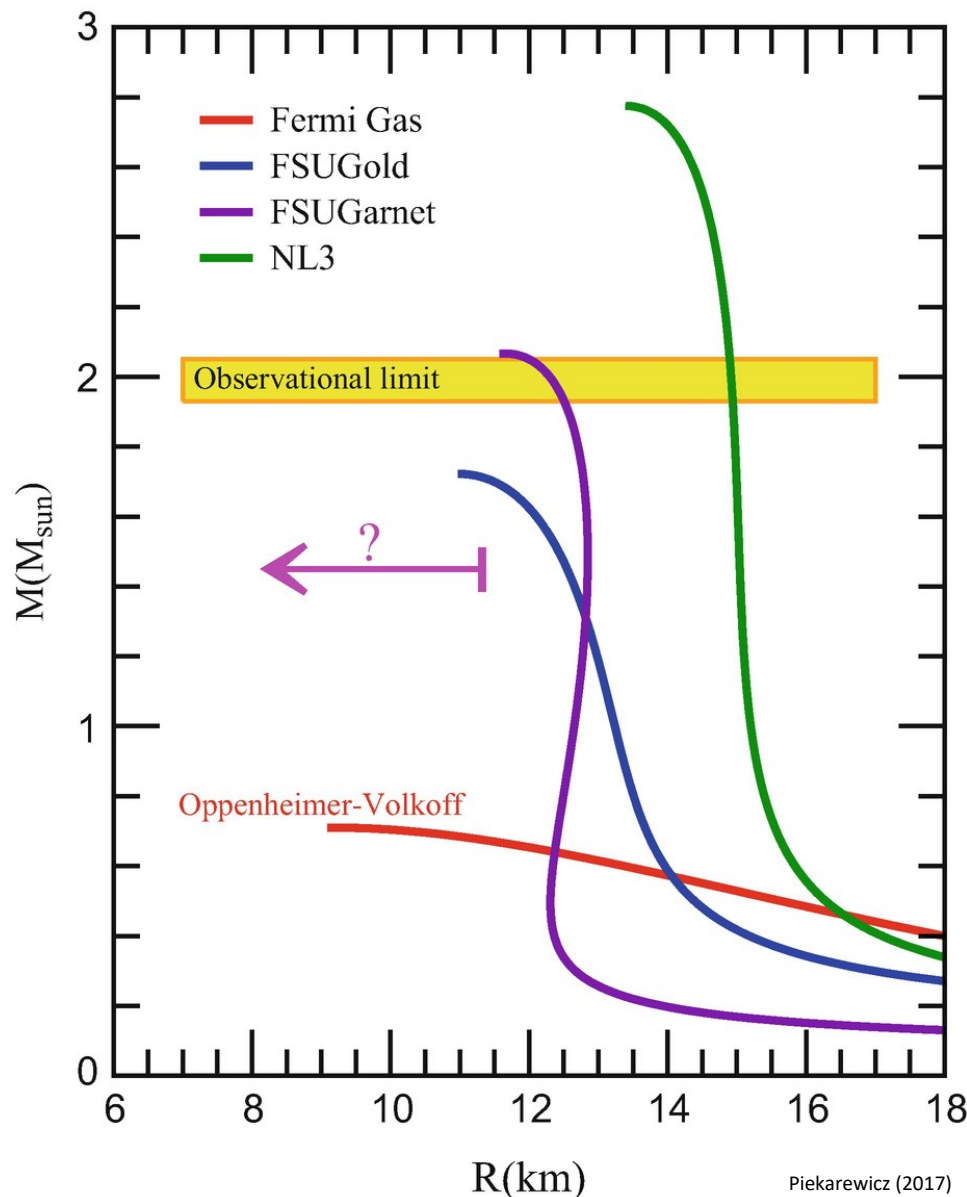
中性子星の大きさは直径20~30km
1~2太陽質量程度
1cm³あたり約1億トン
中性子の縮退圧で自重を支えている天体



中性子星の上限質量

(トールマン・オッペンハイマー・ヴォルコフ限界)

- 中性子の縮耐圧で支えられる質量には限界がある
- いまだはっきりしていないが、およそ3太陽質量より重い中性子星は存在できないと考えられている
- 現在の物理学では、この限界を超える質量の重力崩壊を止める手段はみつかっていない
- 一般相対性理論にもとづけば、質量は中心に集中し、事象の地平面と $r = 0$ の時空特異点を形成する



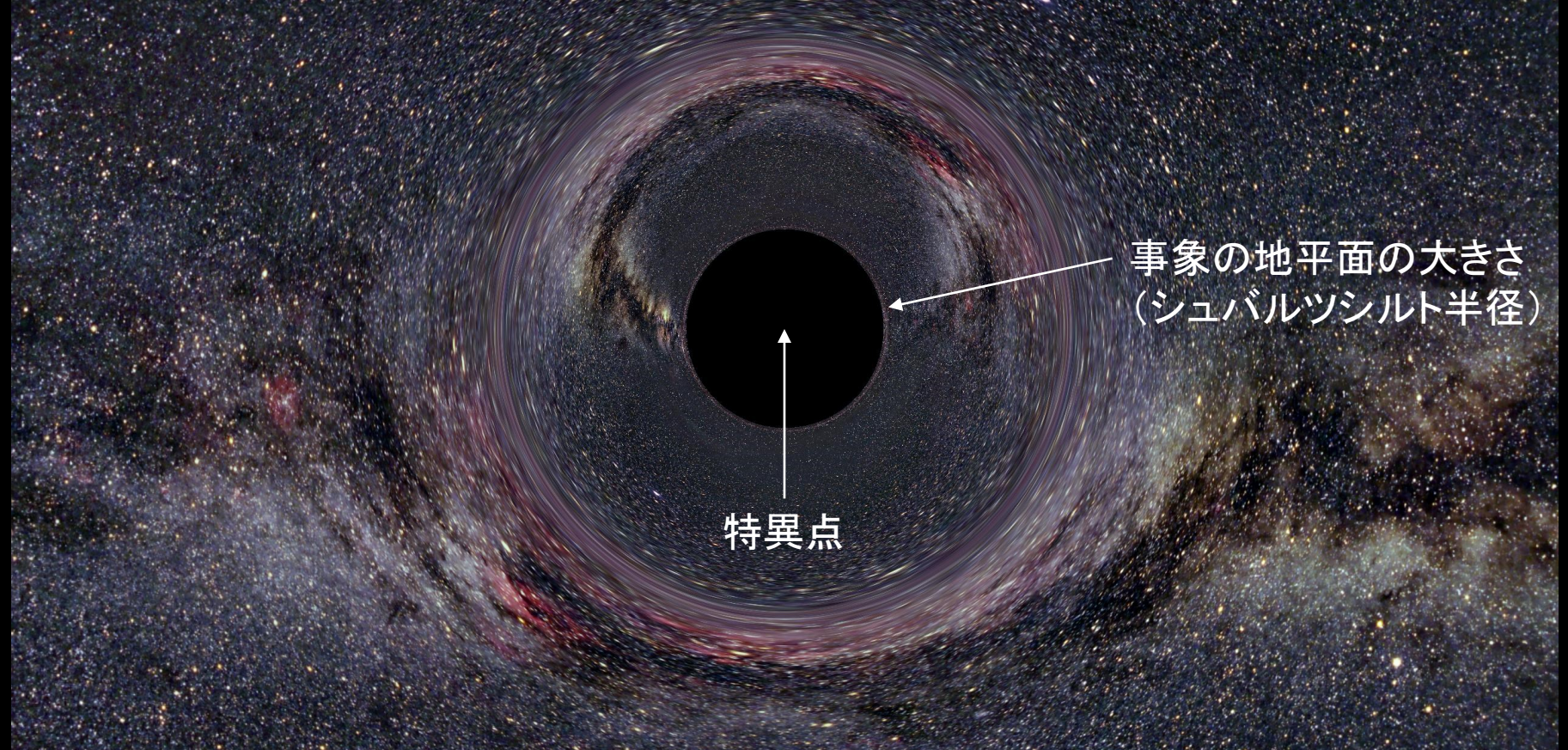
収縮を止める手段が無い



大きさ0の特異点へ向かって収縮し続ける他ない



質量に応じたシュバルツシルト半径より小さく収縮した天体 = **ブラックホール**



事象の地平面の大きさ
(シュバルツシルト半径)

特異点

事象の地平面 = 情報の伝達が一方的になる領域の境界面
事象の地平面の内側からは何も出てくることができない(外から内側を観測できない)

情報の伝達が一方的になる境界面に囲まれた領域 = ブラックホール

一旦通過してしまおうと
必ず中心へ向かう
(一瞬でも外向きに
進むことはできない)

シュバルツシルト半径

時空特異点
(全質量が一点に集中)

内側から外の
光景は見える

普通に入って行ける

goodbye

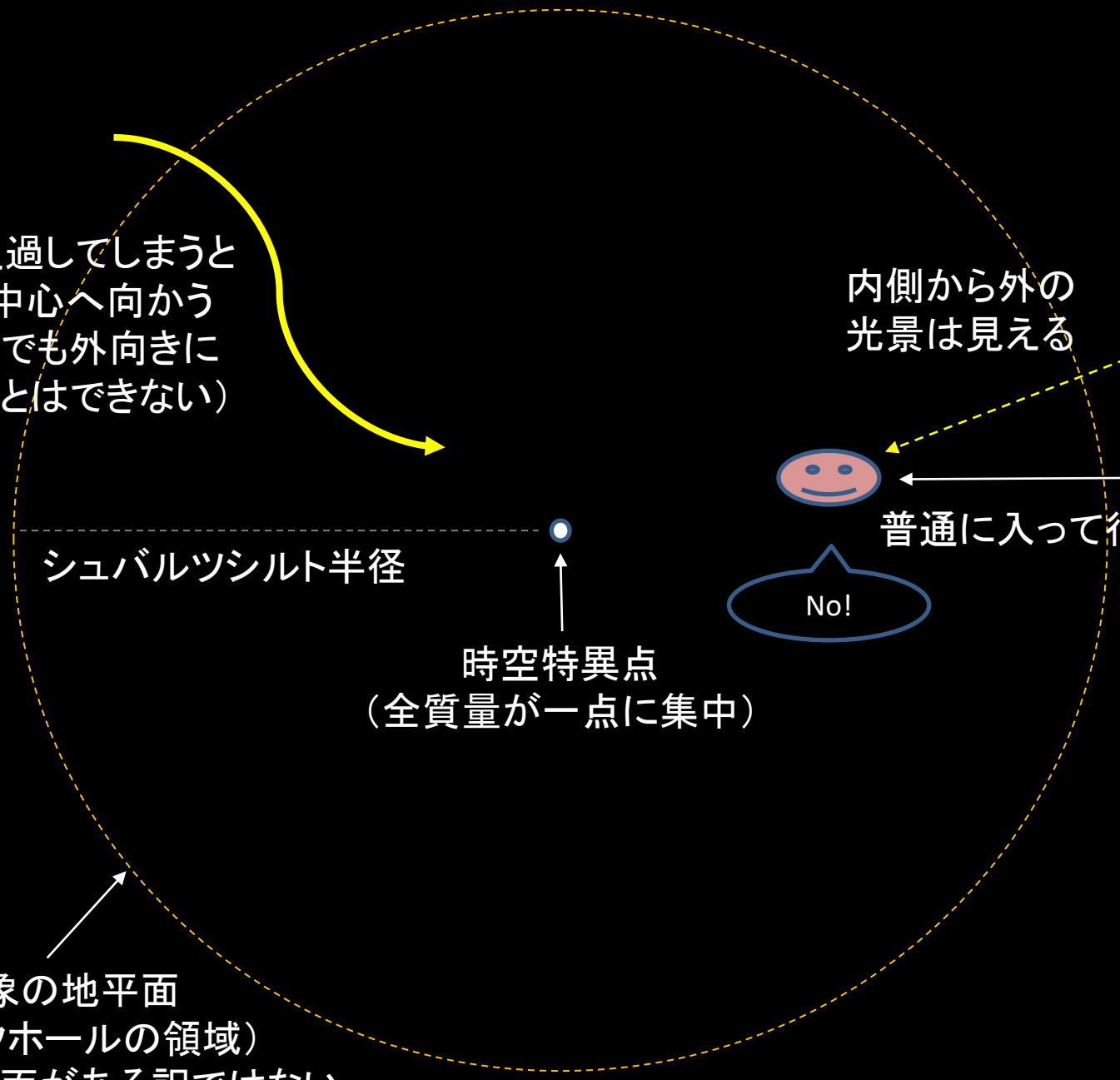
No!

See you

事象の地平面

(ブラックホールの領域)

ここに硬い表面がある訳ではない



1960～1970年台：ブラックホールの 理論研究の進展

- 1963年：回転するブラックホール解(カー解)の発見
- 1963年頃：「ブラックホール」の命名
- 1965年：ペンローズの特異点定理
- 1967～73年：ブラックホールの唯一性定理(無毛定理)
- 1969年：ブラックホールエンジンの提唱
- 1969年：ペンローズ過程
- 1969年：宇宙検閲官仮説
- 1972年：ブラックホールの面積増大則
- 1972年：ブラックホールの情報消失
- 1973年：ブラックホールの熱力学
- 1974年：ブラックホールの蒸発(ホーキング放射)

ペンローズは「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」の功績で2020年のノーベル物理学賞を受賞



NOBELPRISET I FYSIK 2020 THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2020

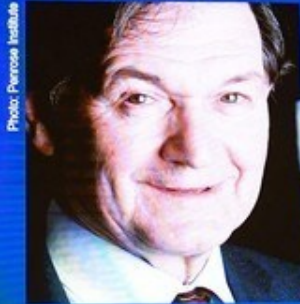


Photo: Perseus Institute

Roger Penrose

"för upptäckten att bildandet av svarta hål är en robust förutsägelse av den allmänna relativitetsteorin"

"for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity"



Photo: Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics

Reinhard Genzel

"för upptäckten av ett supermassivt kompakt objekt i Vintergatans centrum"

"for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy"



Photo: Christopher DeBele, UCLA

Andrea Ghez



DAVID HAVILAND



BB NEWS

KAPS-
MIEN
F SCIENCES



ブラックホールの無毛定理

ブラックホールの種類(一般相対性理論の厳密解)

	角運動量なし	角運動量あり
電荷なし	シュバルツシット解	カー解
電荷あり	ライスナー・ノルドシュトロム解	カー・ニューマン解

- 一般相対性理論の軸対称定常解はカー解となる(ブラックホールの唯一性定理)
 - 自然界(4次元時空)でのブラックホール解はカー解のみ
 - 電荷まで含めるとカー・ニューマン解となる
- カー解の自由パラメータは質量と角運動量のみである
- 一般相対性理論にもとづけばブラックホールを個性付ける要素は質量、電荷、自転の3つのみである
 - あるいは、毛が3本しかない
 - 重力崩壊する前の星が持っていた他の個性は全て失われる

ブラックホールとは(理論編)まとめ

- 一般相対性理論に従うと、ある質量に対し、事象の地平面と呼ばれる領域の半径が定義できる
 - その領域内では中心から離れる方向(外向き)に移動できない時空となっている
 - ある物体がシュバルツシルト半径 $2GM/c^2$ (地球だと9mm) より小さくなると事象の地平面に囲まれブラックホールとなる
- 事象の地平面は8太陽質量以上の星が最期につぶれる際に形成されうる
- 20世紀なかばまでは理論上の産物だった
 - ところが1960年代以降、ブラックホールでなければ説明が難しい天体が相次いで発見された
 - その頃から様々な理論的研究も進展した

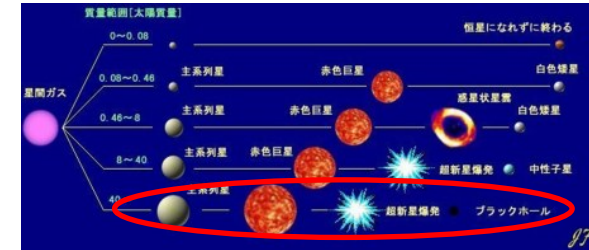
ブラックホールとは（観測編）

- 重力が強すぎてなにも抜け出せない領域
 - この世の最大速度＝光の速度（秒速30万km）をもってしても「脱出」できない
 - ということは、あらゆる情報は出てこない
 - 中がどうなっているか外から知ることはできない
- 質量を持ち重力を及ぼすので、天体とみなせる
 - 質量の割に小さいため重力の井戸がとんでもなく深い
 - そのため、周りに物質があると普通の天体よりかえって強力なエネルギー源になる
 - 本体は見えないが、周囲では様々な活動現象が生じる

質量にもとづくブラックホールの3分類

(天体としてのブラックホールは S・M・L サイズに分けられる)

- 恒星質量BH(太陽質量の100倍以下)
 - 超新星爆発の結果できるのがこれ ←
 - 我々の天の川銀河には数億個あるはず



- 中間質量BH
 - なぜかまだほとんど見つかっていない
 - 重力波事象の発見により成長過程が見えた？
- 超大質量BH(太陽質量の100万倍以上)
 - ほぼ全ての銀河の中心部に存在する
 - 宇宙誕生後10億年以内に100億倍まで成長する必要がある

ブラックホールの観測の歴史

- 1960年代: ブラックホールらしき天体の発見
 - クエーサーの発見(超大質量ブラックホール)
 - X線連星の発見(恒星質量ブラックホール)
- ~2000年: ブラックホールの存在の状況証拠
 - M106 中心部の高速回転
 - M87 中心部の高速回転と相対論的ジェット
 - 天の川銀河の中心部の恒星の運動
- 21世紀: より直接的なブラックホールの観測事例
 - 重力波事象 GW150914 の検出
 - 中間質量ブラックホール GW190521 の検出
 - M87 のブラックホールシャドウの撮影(?)

電波源 3C 273 の光学対応天体(クエーサー)

星にしか見えないが、距離は約20億光年、つまり太陽の2兆倍の明るさ
100日程度の時間で明るさを変える、つまり銀河の10万分の1以下の大きさ



Quasar 3C 273

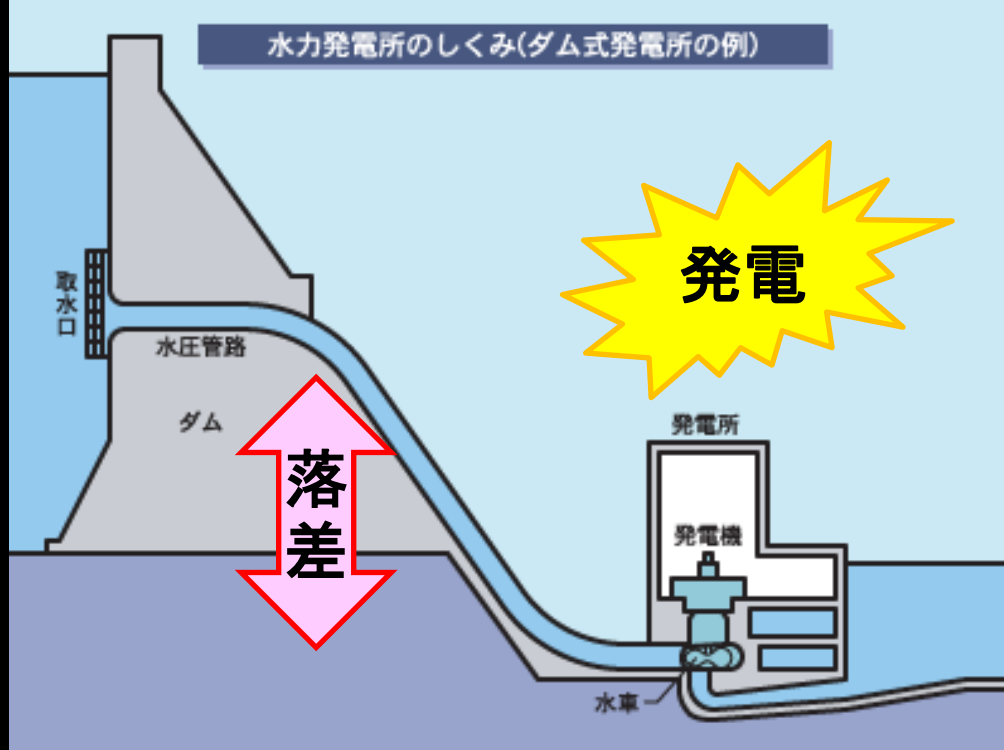
Hubble Space Telescope - ACS HRC Coronagraph

燃料
(水)

重力エネルギー
↓ 落差で加速
運動エネルギー
↓ 水車を回す
電気エネルギー

燃料
(物質)

重力エネルギー
↓ 落差で加速
運動エネルギー
↓ 摩擦・衝突
熱・光エネルギー



1969～1973年
「ブラックホール
エンジン」の提唱

ブラックホールへ
物質が落下すると、
位置エネルギーが
熱エネルギーへ
変換される

その結果、ブラック
ホールの周囲は
極めて明るく輝く

重力エネルギーは
 $E = GMm/R$
シュバルツシルト
半径までの落差で
 $E = 0.5mc^2$

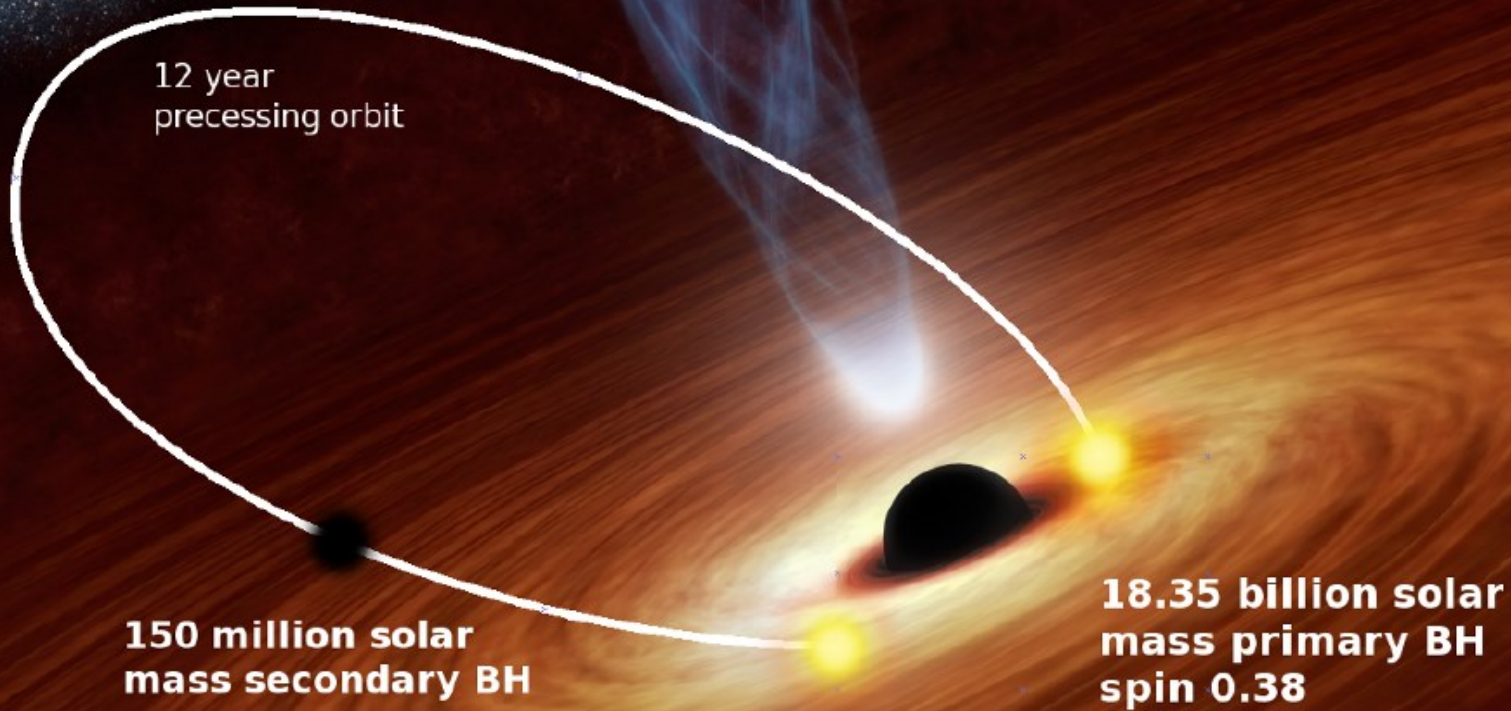
物理学で考え得るクエーサーの正体は超大質量ブラックホールしかない
クエーサー = 宇宙論的な遠方において極めて明るい活動銀河核



クエーサーのエンジンである活動銀河中心核の想像図
(超巨大ブラックホール + 降着円盤 + 相対論的ジェット)

(余談)大阪教育大学でのブラックホール研究の一例

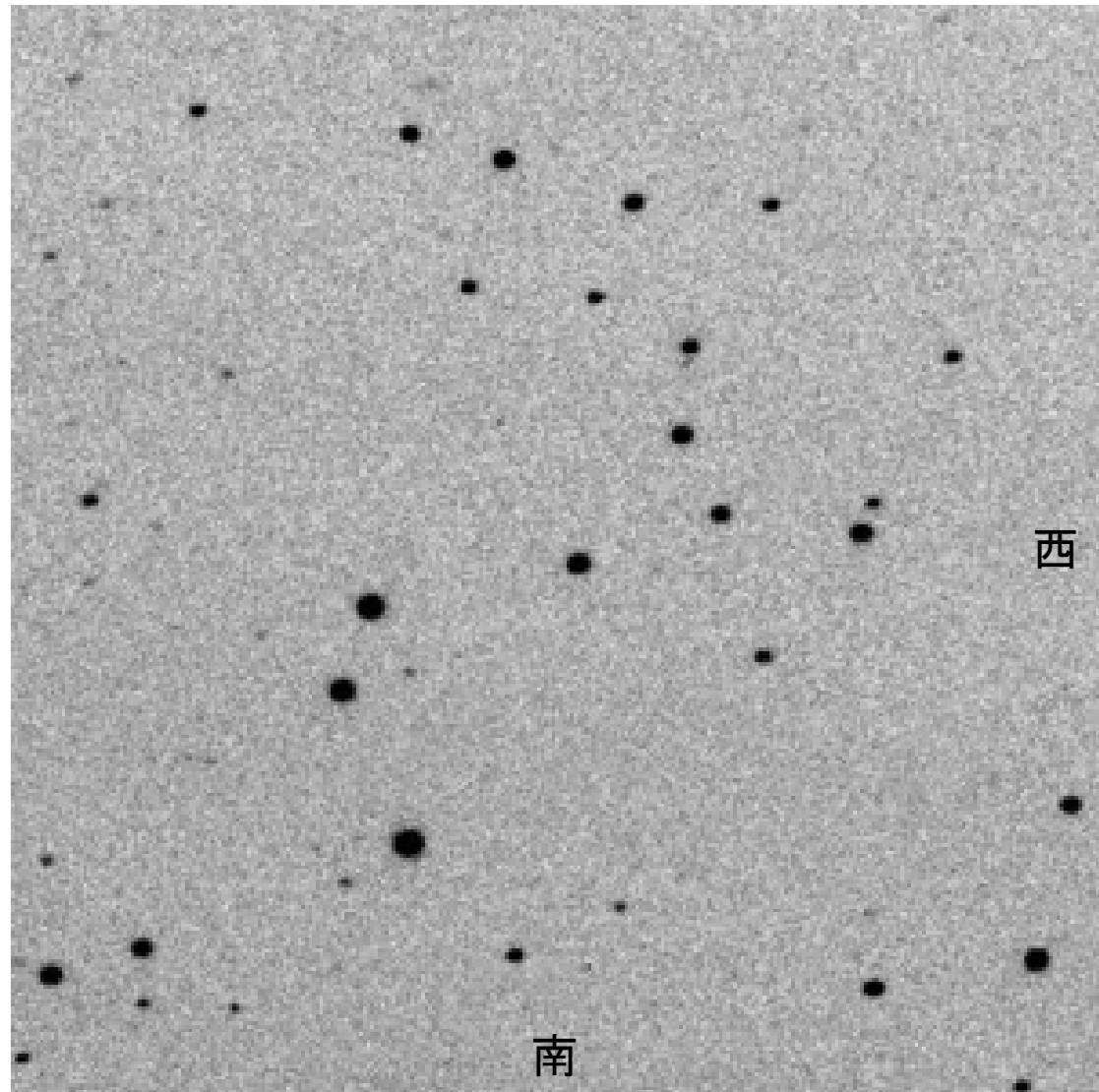
OJ 287



OJ 287 (BL Lac 型活動銀河核)

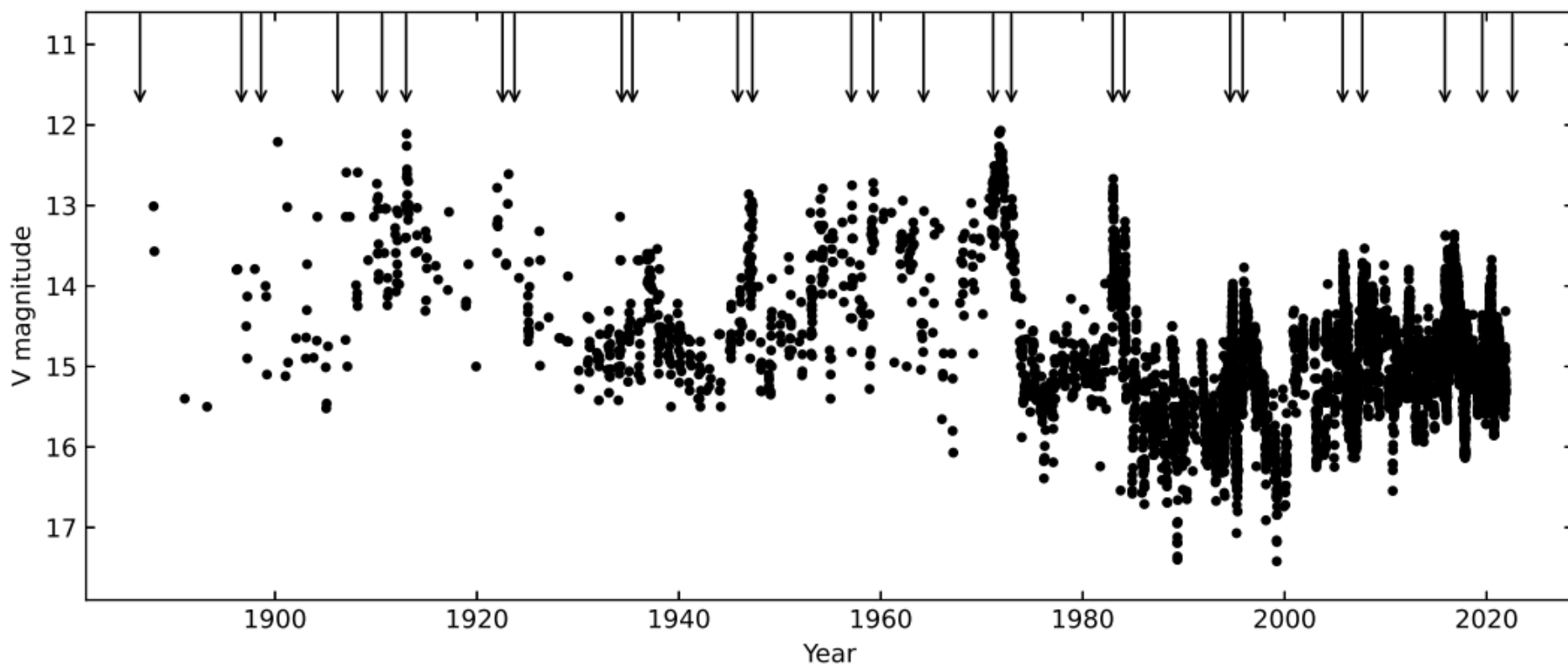
大阪教育大学51cm望遠鏡で撮影した OJ 287

- かに座の方向の活動銀河核
- 距離は約35億光年
 - 天の川銀河内の星と一見
区別がつかない(それくらい
明るい)
- 過去130年間、平均すれば
およそ12年ごとに大規模な
増光を繰り返している
- 12年ごとの増光には2つの
極大が伴っている
- 12年ごとの増光の時期は、
厳密な周期性から微妙にず
れている

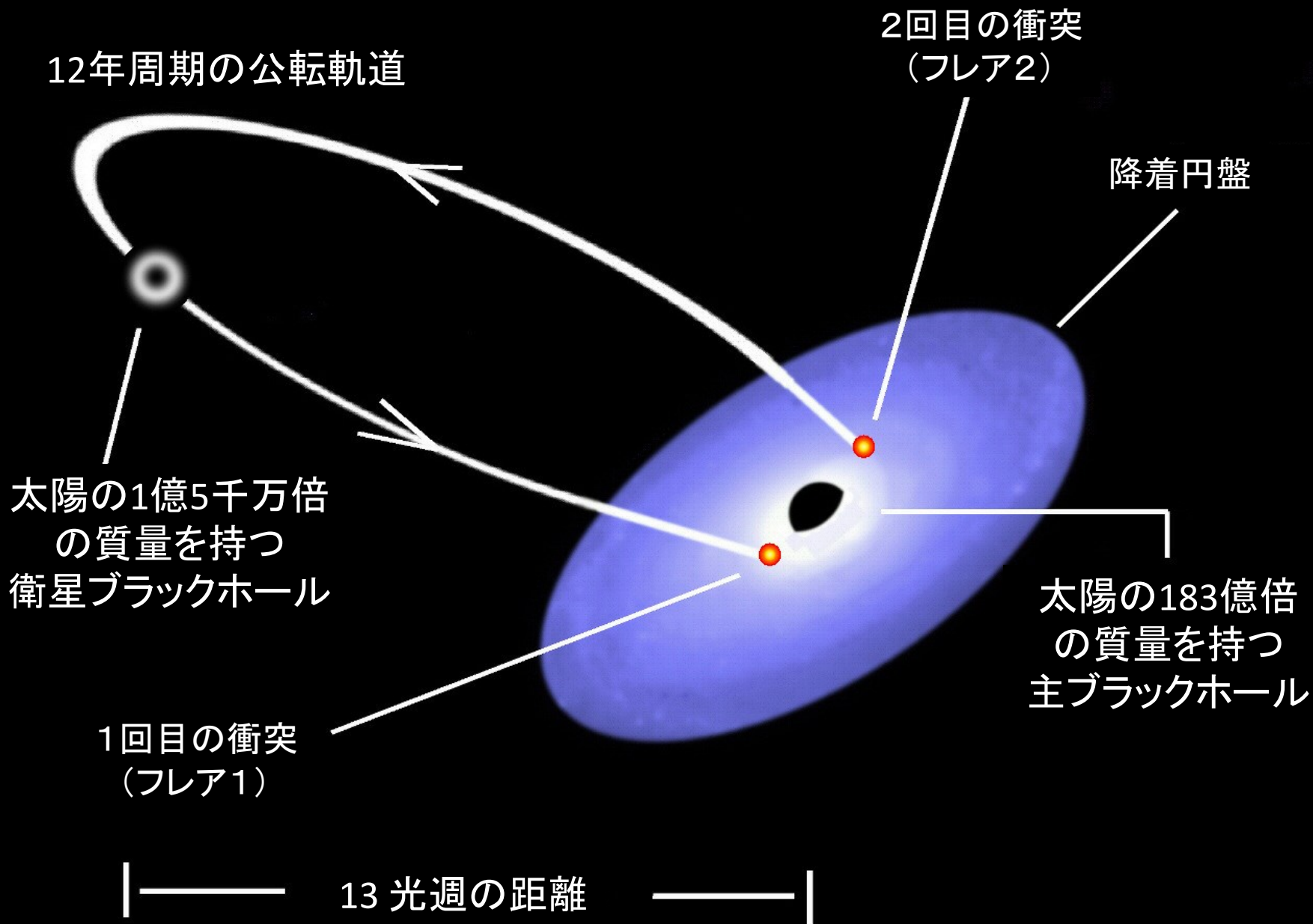


OJ 287 の過去130年間の明るさの変化と増光の発生時期(矢印)

平均すれば約12年ごとに大増光を繰り返している



OJ 287 の歳差連星ブラックホールモデル

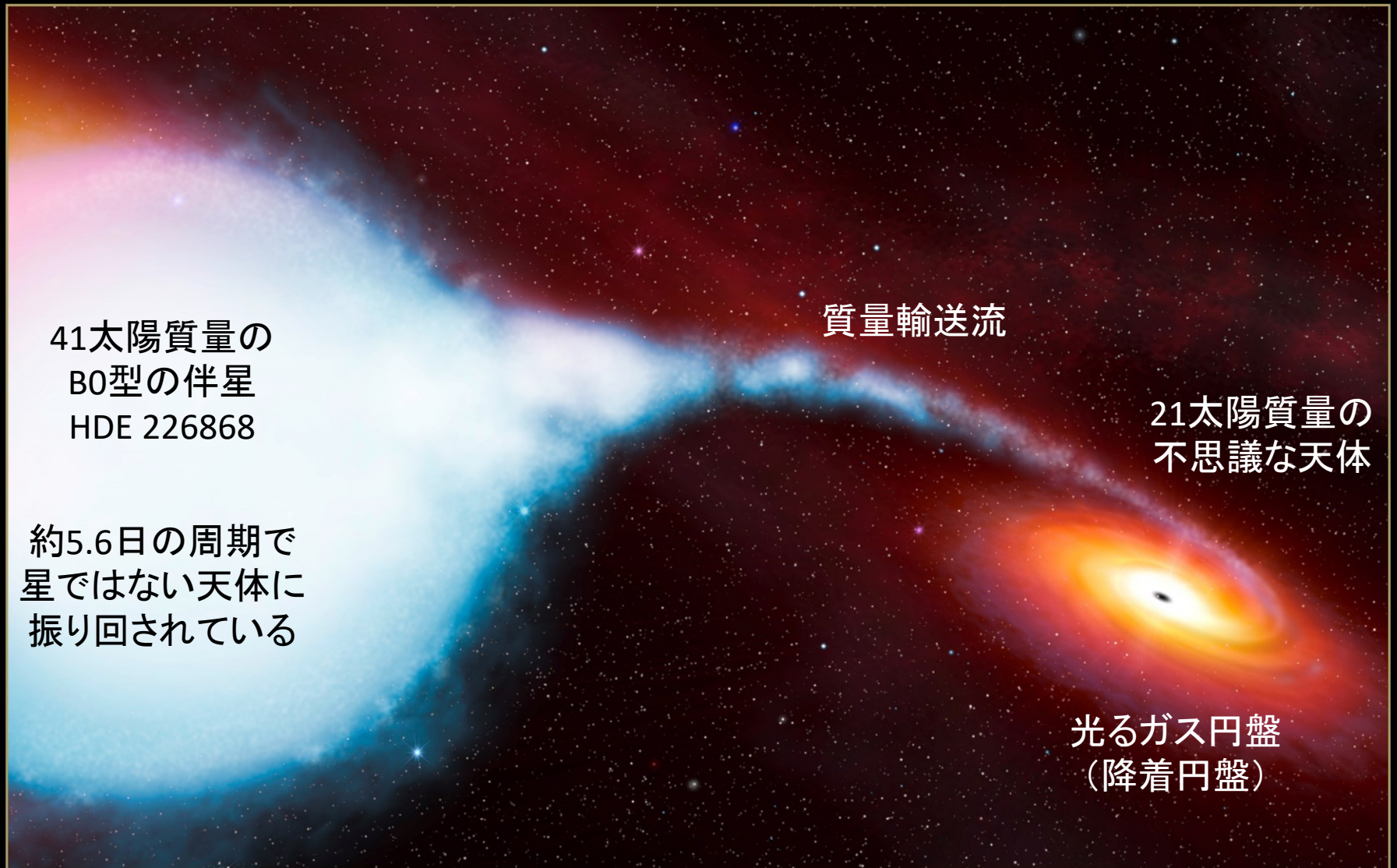


Animation of Orbiting Black Holes in Galaxy OJ 287



Simulation of Black Hole Disk Flares in Galaxy OJ 287

1964年に発見されたX線源はくちょう座X-1の想像図



CYGNUS - X 1 *Black hole*

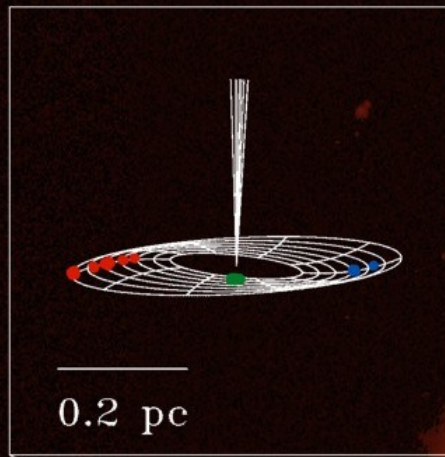
1972年に確実な(恒星質量)ブラックホールと指摘された史上初の天体

ブラックホールの観測の歴史

- 1960年代: ブラックホールらしき天体の発見
 - クエーサーの発見 (超大質量ブラックホール)
 - X線連星の発見 (恒星質量ブラックホール)
- ~2000年: ブラックホールの存在の状況証拠
 - M106 中心部の高速回転
 - M87 中心部の高速回転と相対論的ジェット
 - 天の川銀河の中心部の恒星の運動
- 21世紀: より直接的なブラックホールの観測事例
 - 重力波事象 GW150914 の検出
 - 中間質量ブラックホール GW190521 の検出
 - M87 のブラックホールシャドウの撮影(?)

M106 (NGC 4258) の 中心部の高速回転

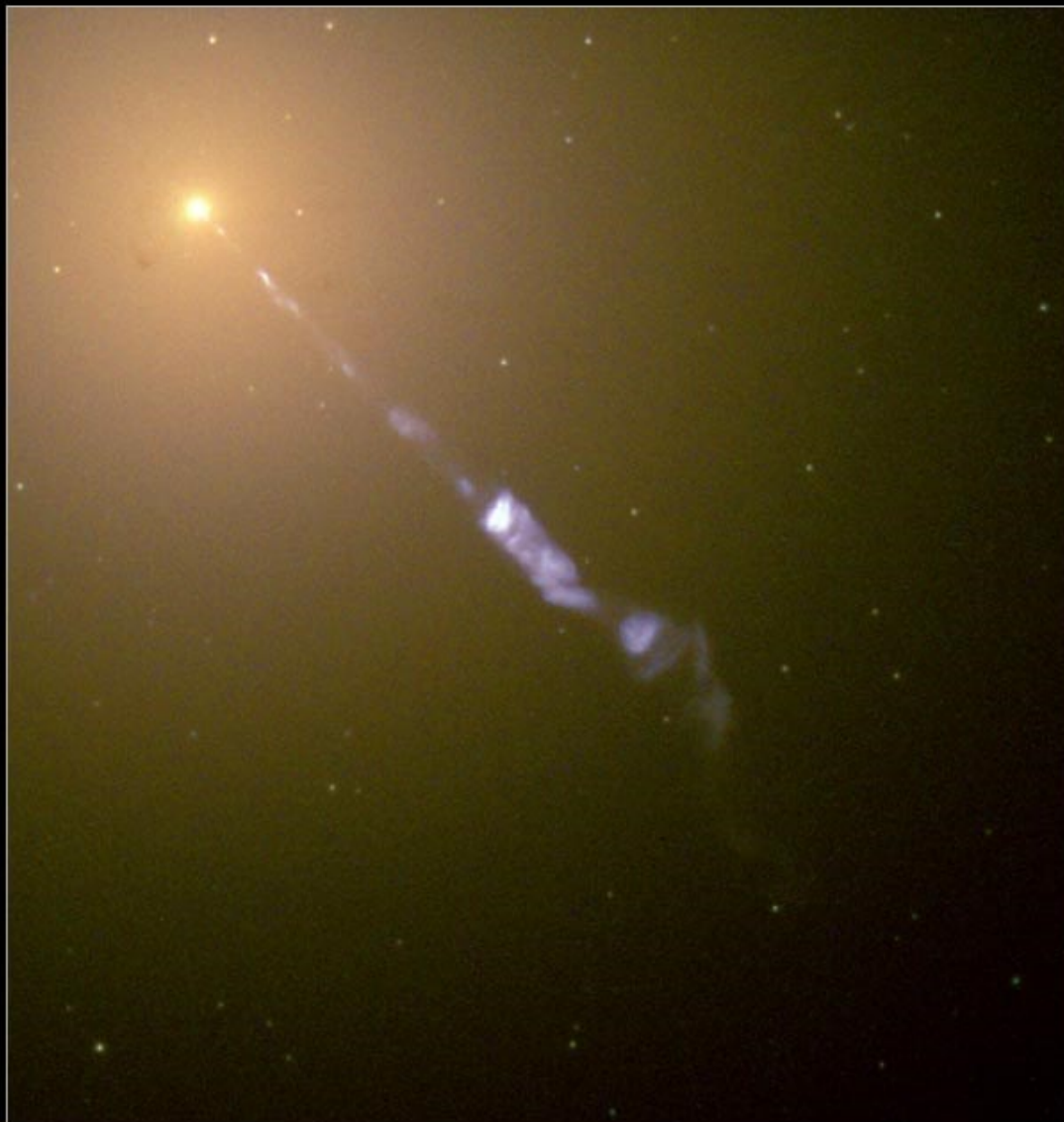
- 1992年に野辺山45m電波望遠鏡がM106の水メーザーの輝線に秒速1000kmのドップラー効果を発見
- この高速成分は銀河中心から1パーセク（銀河全体の100万分の1）以内の非常に小さな領域から出ている
- 中心に3600万太陽質量の「小さな天体」があり、メーザーはその周りを高速回転するガス円盤から出ている
- 世界初の確かな**超大質量ブラックホール**の存在の証拠



0.2 pc

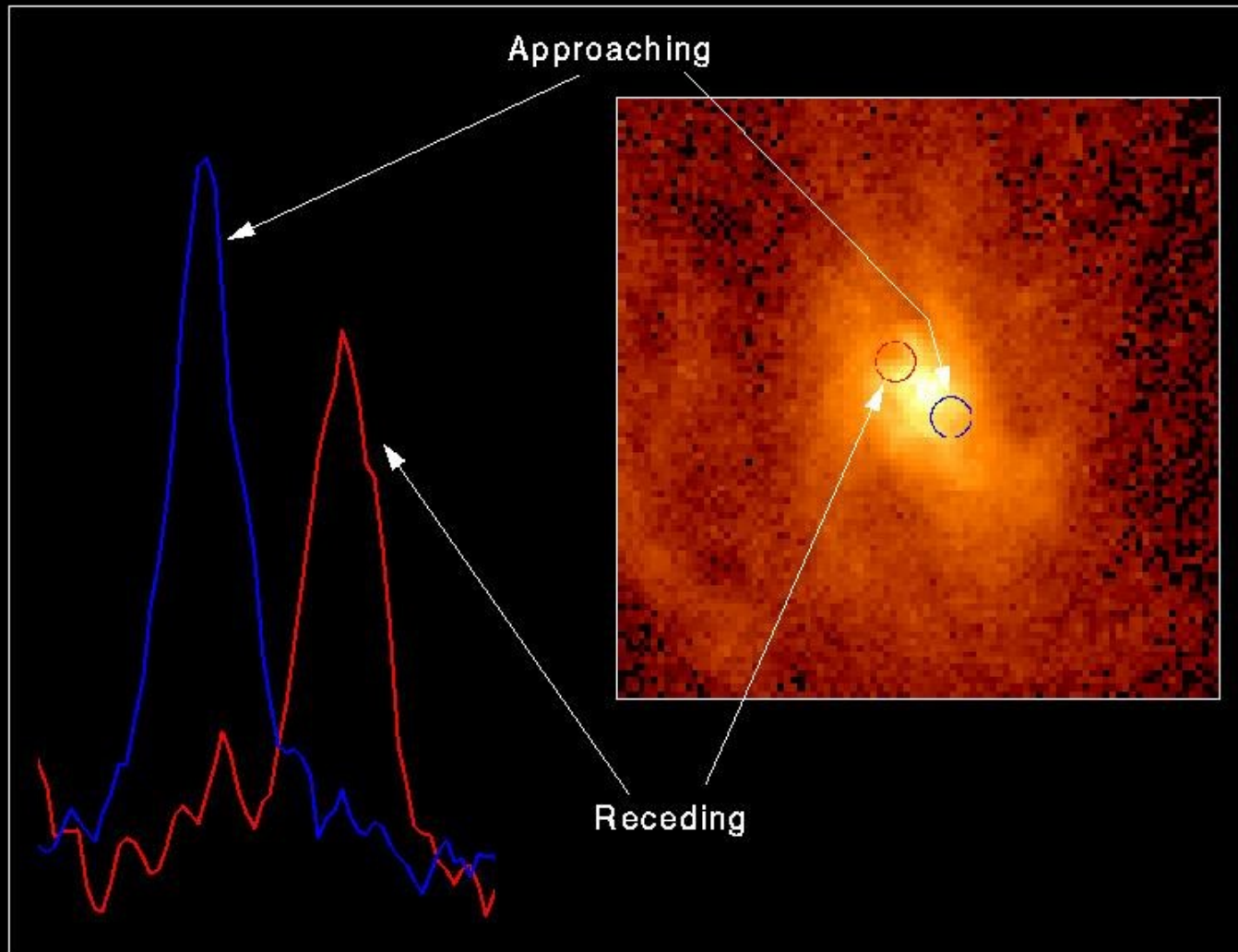
2 Kpc

The M87 Jet



Hubble
Heritage

Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph



天の川銀河(銀河系)

- 太陽系が属している銀河(星の大集団)
- 直径は約10万光年、厚さは約2000光年の円盤状に星が分布
- 最大で約4000億個の星々からできていると考えられている

(いて座の方向)
天の川銀河の中心部

2万6千光年の距離



太陽系の場所
(地球の場所)

いて座の方向の天の川





The "Teapot"
いて座

3 Sgr

Galactic center
天の川銀河の中心

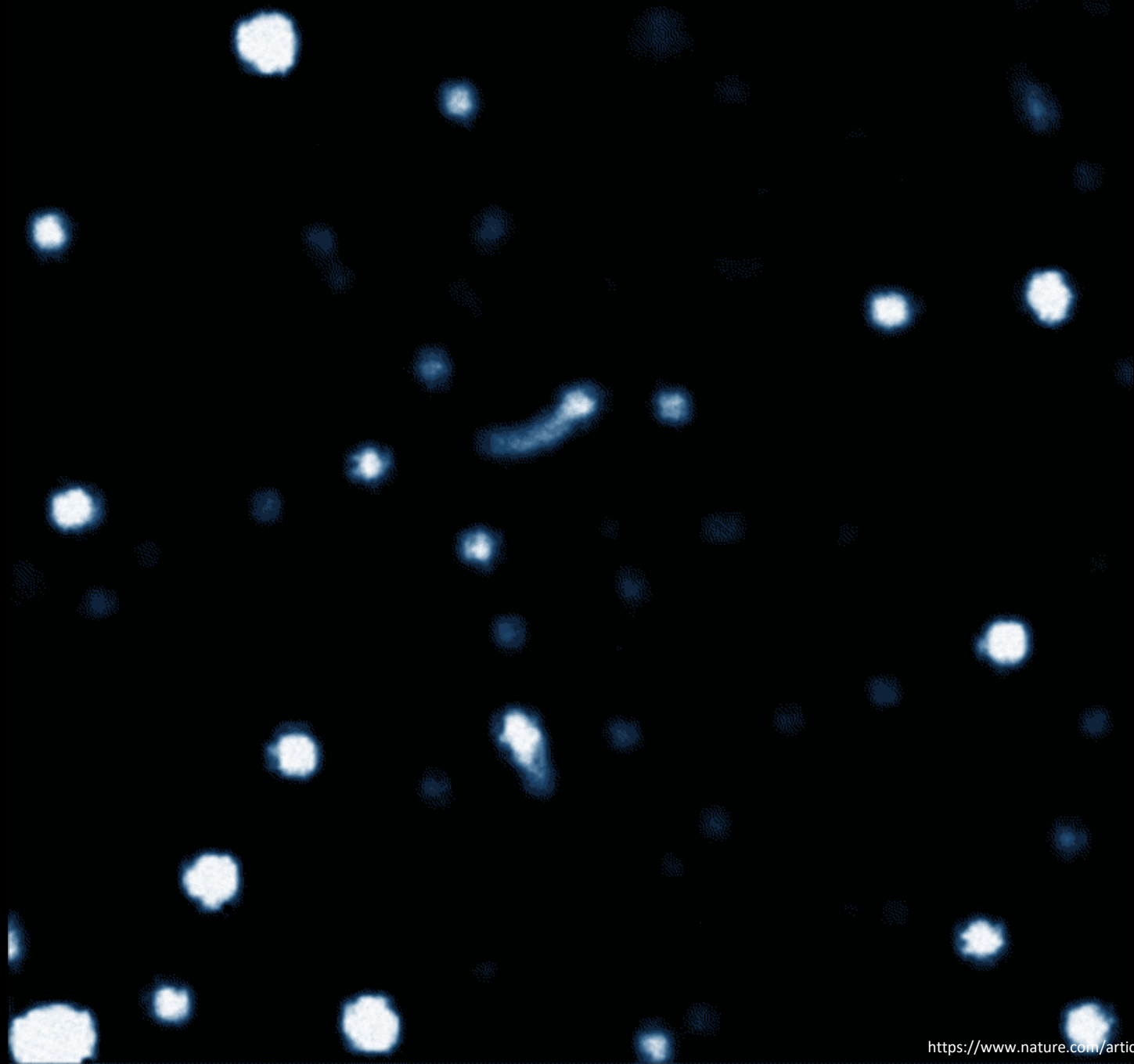
Antares
アンタレス

Scorpius
さそり座

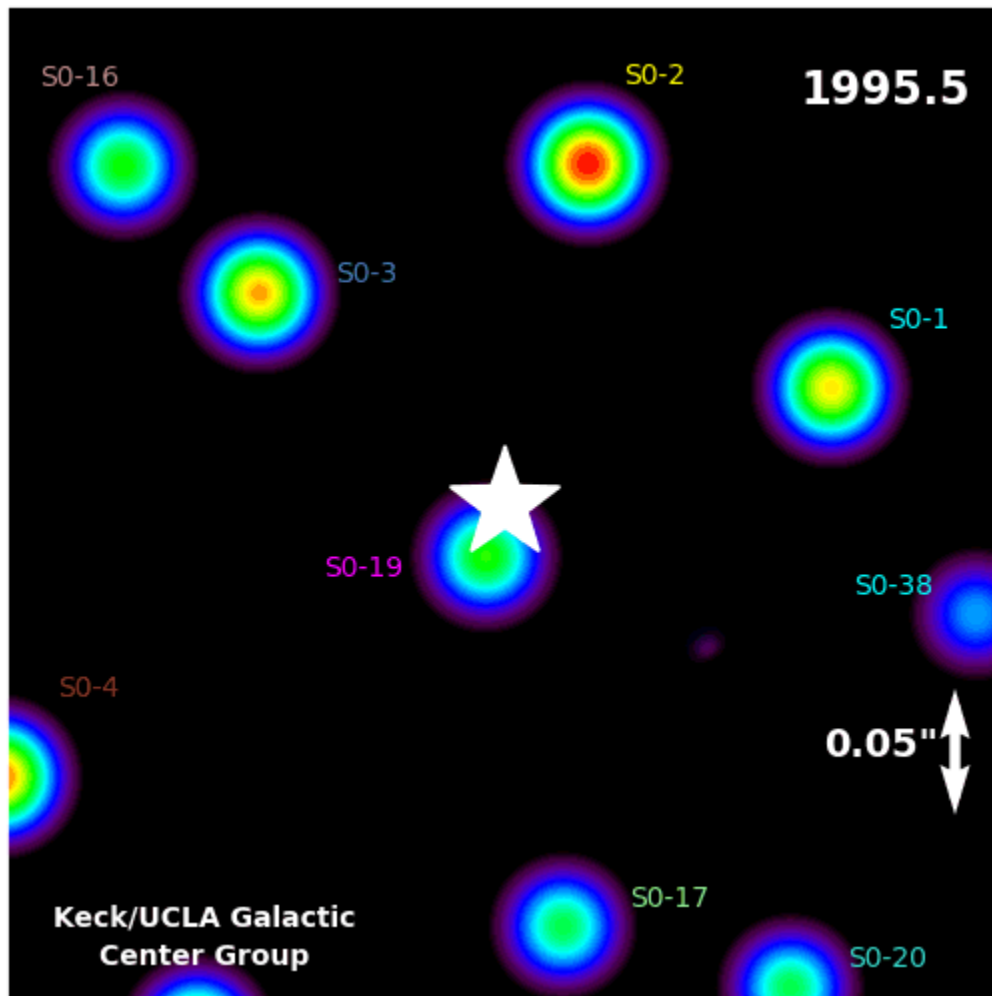
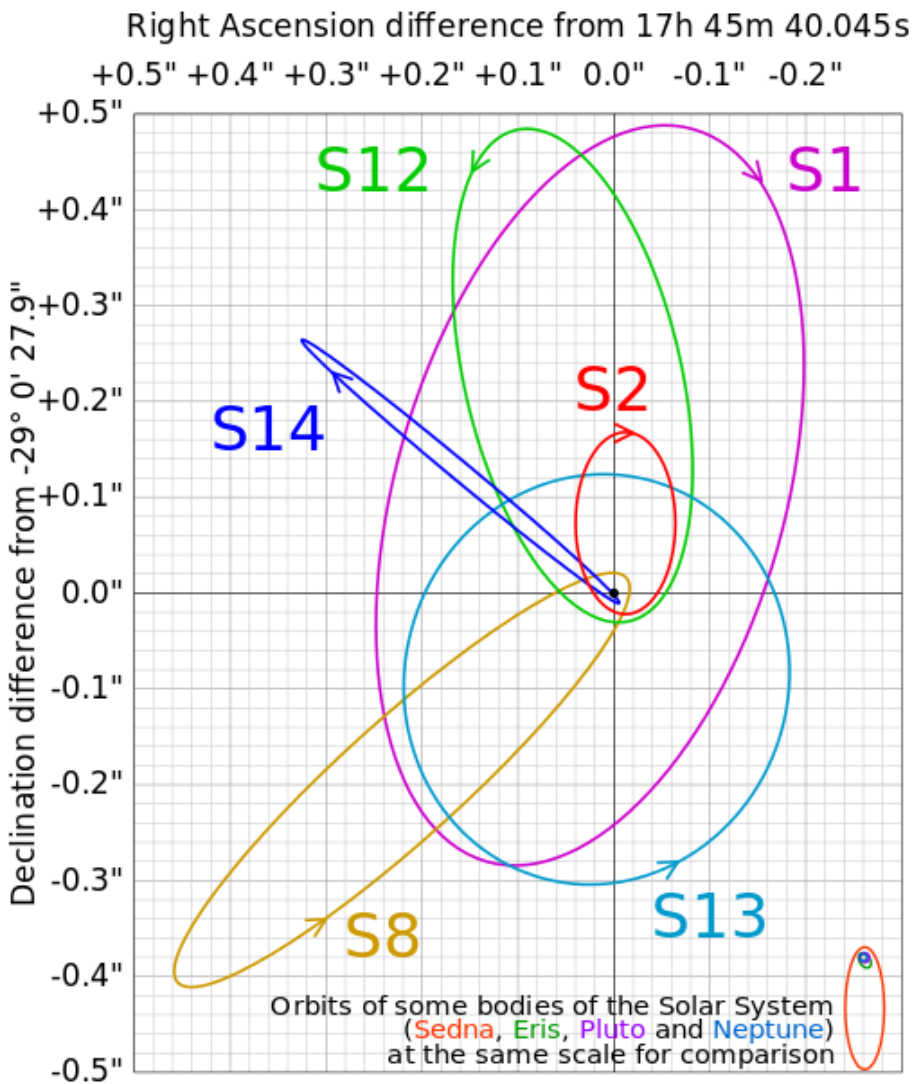
South

夏の夜空(南の低空)

ESO VLT が撮影した天の川銀河の中心部(20年間の恒星の運動の様子)



1990年代初頭から長年かけてゲンツェルとゲッツの研究グループは天の川銀河の中心(Sgr A*)を周辺の星々が猛スピードで動いていることを発見。その運動は、120天文単位より小さい領域に「約400万太陽質量の見えない天体」が存在することを示す。



ラインハルト・ゲンツェルとアンドレア・ゲズは、「天の川銀河の中心(Sgr A*)に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」の功績で2020年のノーベル物理学賞を受賞

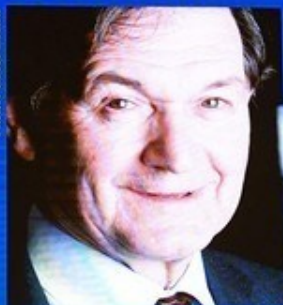


NOBELPRISET I FYSIK 2020
THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2020



KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Photo: Perseus Institute



Roger Penrose

"för upptäckten att bildandet av svarta hål är en robust förutsägelse av den allmänna relativitetsteorin"

"for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity"

Photo: Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics



Reinhard Genzel

"för upptäckten av ett supermassivt kompakt objekt i Vintergatans centrum"

"for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy"

Photo: Christopher DeRose, UCLA



Andrea Ghez



DAVID HAVILAND



BB NEWS

ブラックホールの観測の歴史

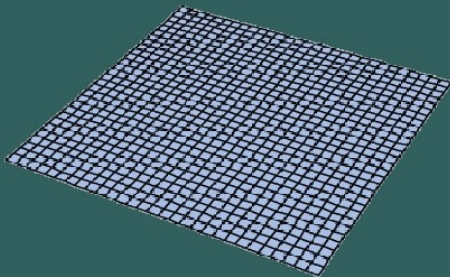
- 1960年代: ブラックホールらしき天体の発見
 - クエーサーの発見 (超大質量ブラックホール)
 - X線連星の発見 (恒星質量ブラックホール)
- ~2000年: ブラックホールの存在の状況証拠
 - M106 中心部の高速回転
 - M87 中心部の高速回転と相対論的ジェット
 - 天の川銀河の中心部の恒星の運動
- 21世紀: より直接的なブラックホールの観測事例
 - 重力波事象 GW150914 の検出
 - 中間質量ブラックホール GW190521 の検出
 - M87 のブラックホールシャドウの撮影(?)

重力波 (gravitational wave)

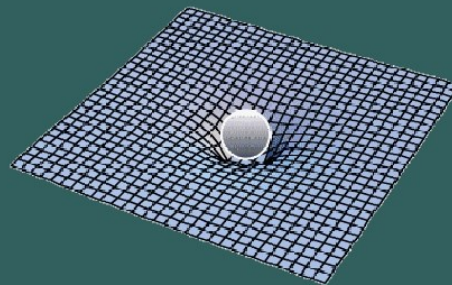


- 加速運動をする質量の周囲に生じる時空のゆがみの時間変動が波動として光速で伝播する現象
 - 重力波の発生源としては、白色矮星・中性子星・ブラックホールの合体、ビッグバン直後の宇宙初期の状態などの、大規模な質量やエネルギーの変動
 - 1916年にアインシュタイン自身によって一般相対性理論に基づいて存在が予言された
 - ただし微弱すぎて検出は不可能だろうと予想した
- 2015年に初めて検出され、次々に見つかっている

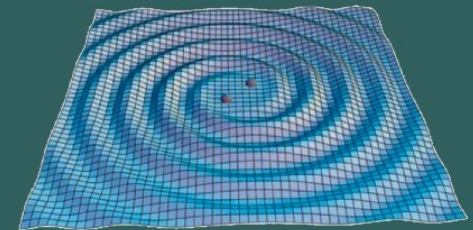
平坦な空間



星の重さで歪んだ空間

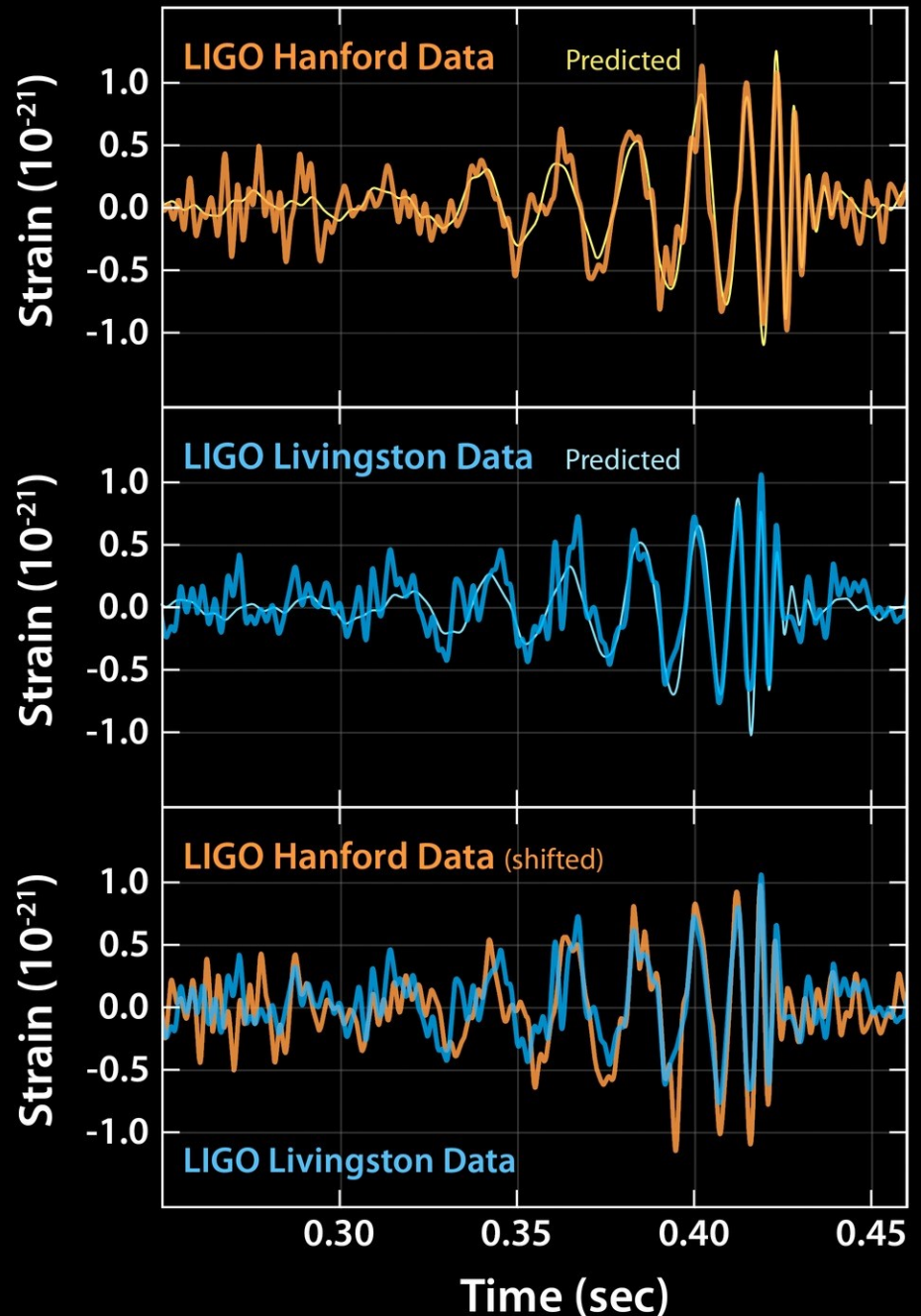


重い星が運動して重力波発生
(例：連星中性子星)



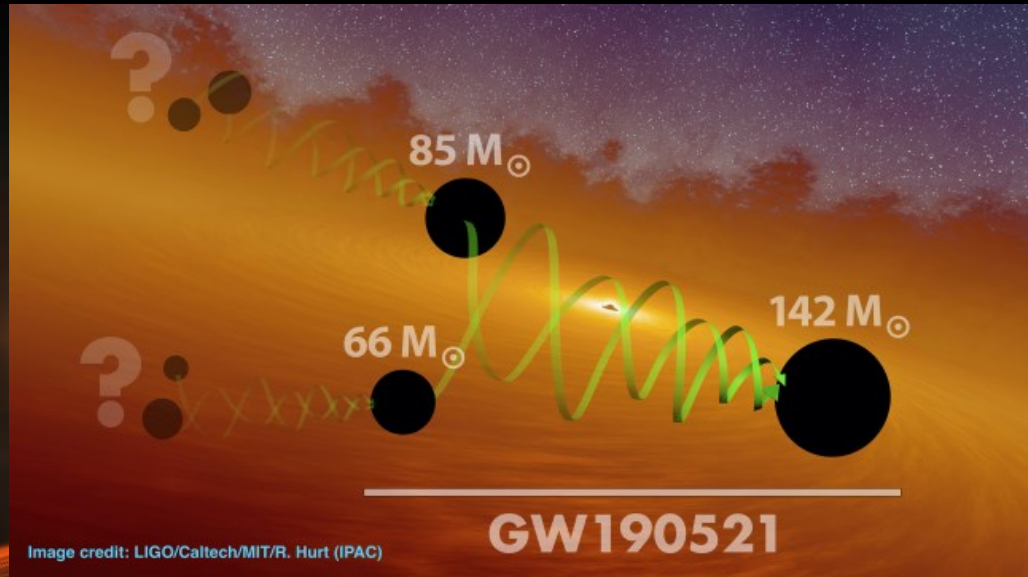
GW150914

- 史上初めて検出された重力波事象
- 2つのブラックホールの衝突・合体現象
 - 大きい方のBHの質量 = $35^{+5}_{-3} M_{\odot}$
 - 小さい方のBHの質量 = $30^{+3}_{-4} M_{\odot}$
 - 合体後のBHの質量 = $62^{+4}_{-3} M_{\odot}$
- ブラックホールの実在を決定的にする観測的証拠

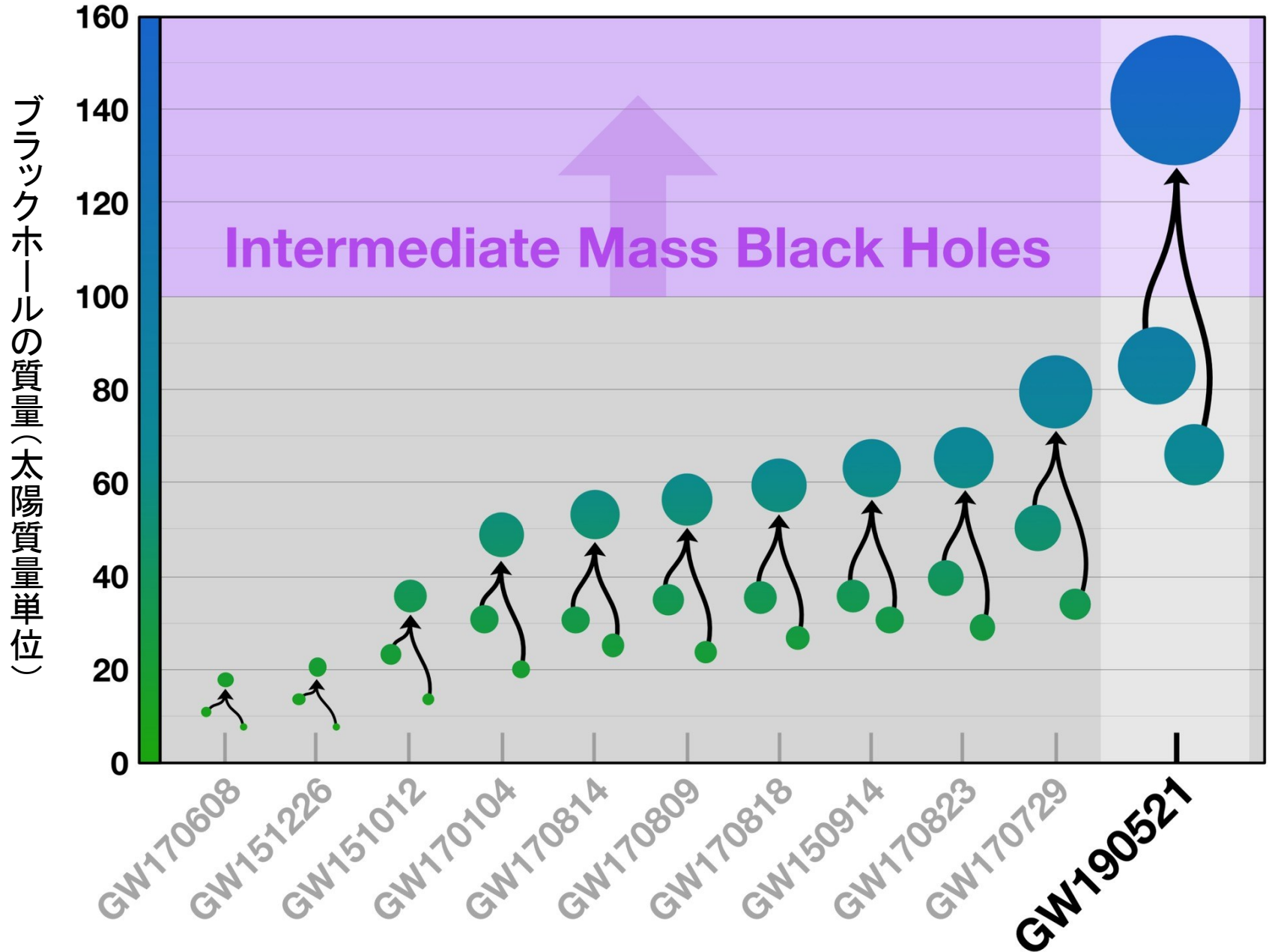


GW190521

- 重力波で観測されたなかで最も重たいブラックホール
 - 重い方: $85_{-14}^{+21} M_{\odot}$
 - 軽い方: $66_{-18}^{+17} M_{\odot}$
 - 合体後: $142_{-16}^{+28} M_{\odot}$ (重力波によるエネルギー損失: $\sim 8 M_{\odot}$)
- 中間質量ブラックホールの形成過程が見えた?



LIGO-Virgo Black Hole Mergers



ブラックホールを視るには



イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —

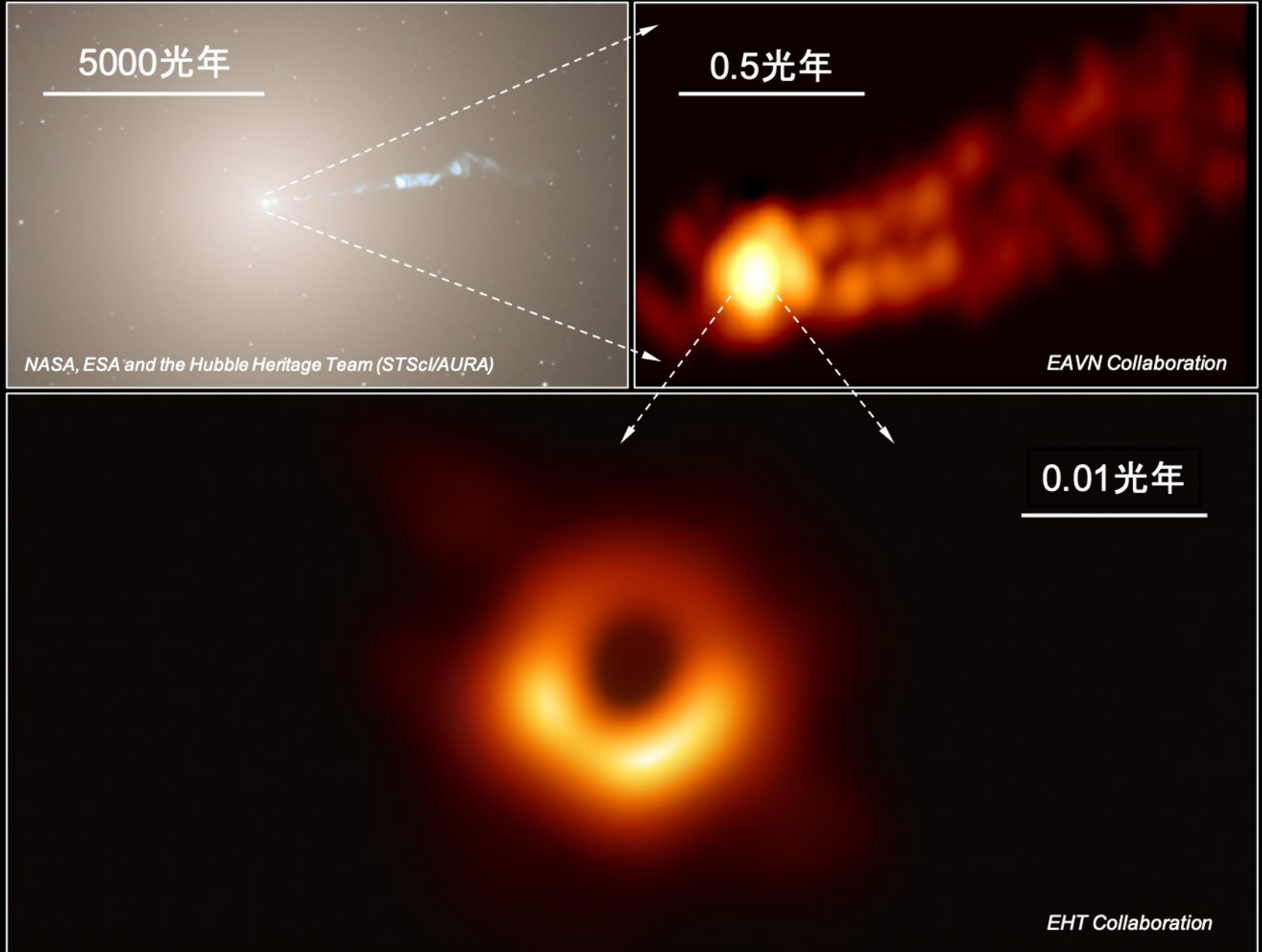


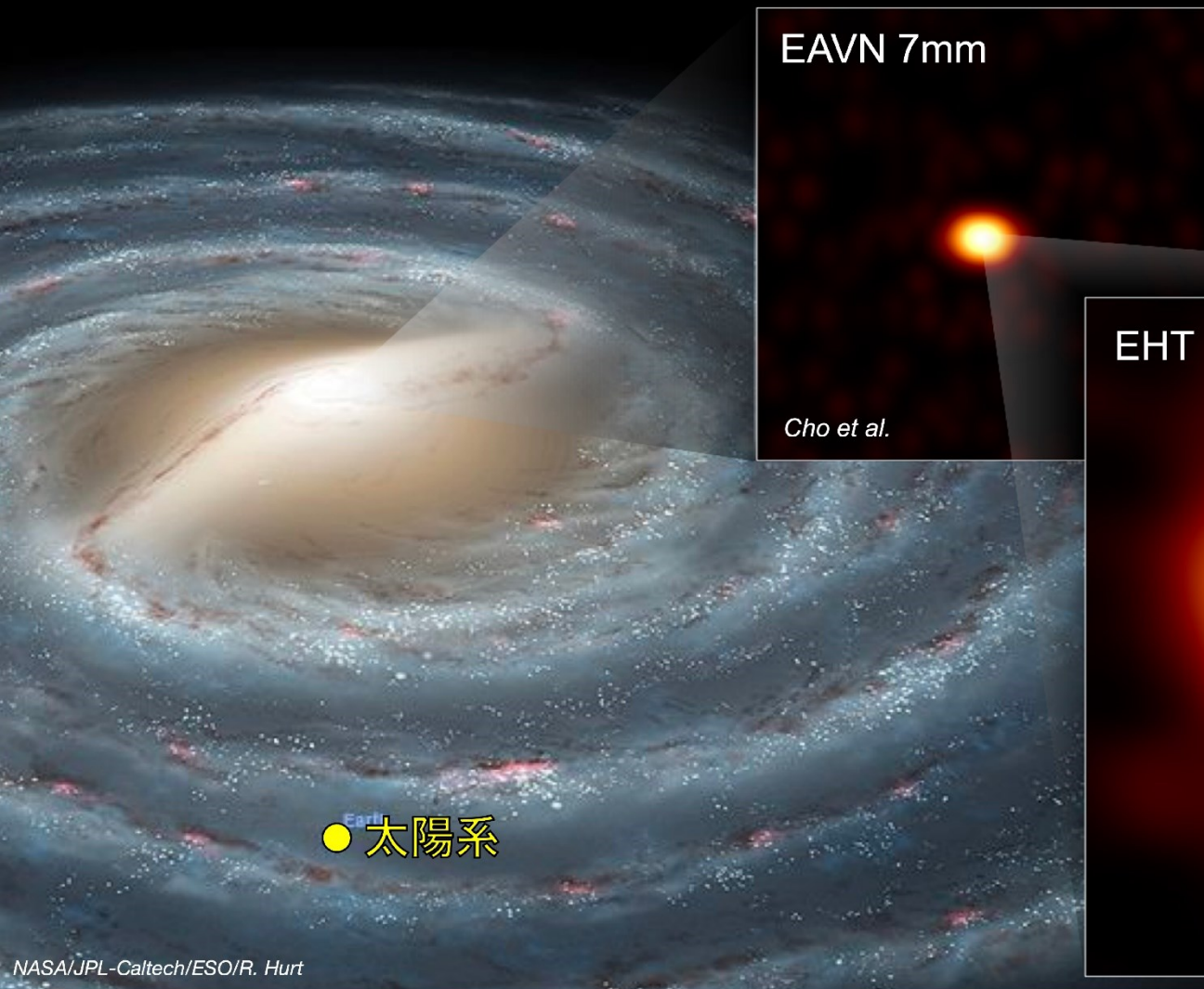
2017年の観測

- ALMA** アルマ望遠鏡
チリ・アタカマ砂漠
- APEX** APEX
チリ・アタカマ砂漠
- 30-M** IRAM 30m望遠鏡
スペイン・ピコベレタ
- JCMT** ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡
ハワイ・マウナケア
- LMT** 大型ミリ波望遠鏡
メキシコ・シエラネグラ
- SMA** サブミリ波干渉計
ハワイ・マウナケア
- SMT** サブミリ波望遠鏡
アリゾナ・グラハム山
- SPT** 南極点望遠鏡
南極点基地



M87





● 太陽系

EAVN 7mm

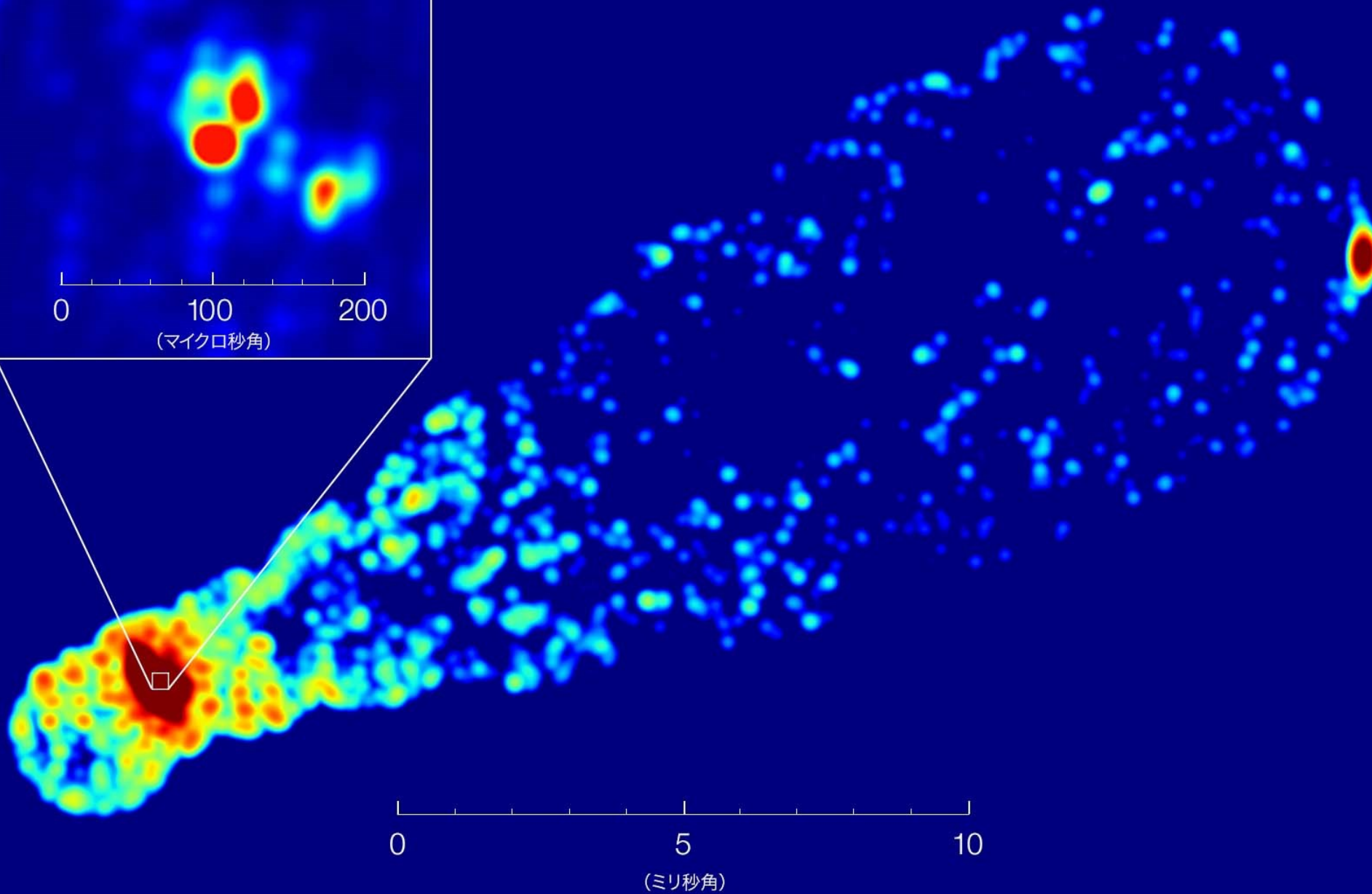
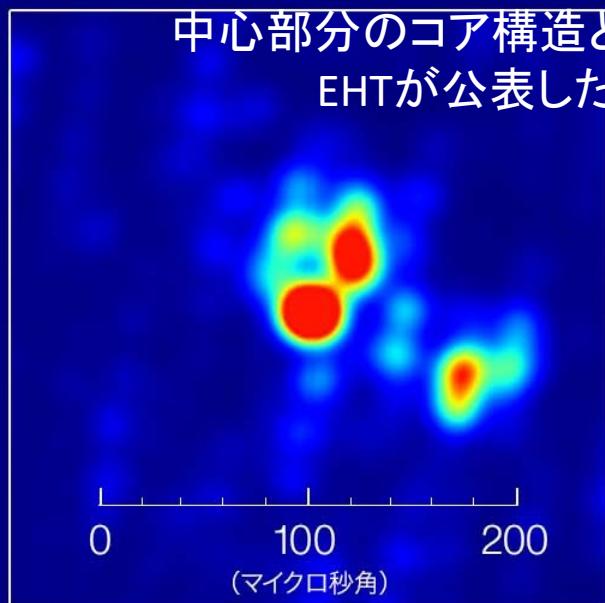
Cho et al.

SgrA*

EHT 1.3mm

EHT Collaboration

Miyoshi, Kato, Makino (2022) によるEHTデータの再解析の結果、リング状構造は確認できず、中心部分のコア構造と、そこから伸びるジェットの一部とみられるノット構造が現われた。EHTが公表したM87のリング状の画像についてはおそらく間違いと指摘している。



ブラックホール研究の歴史・まとめ

- 1915～1916年：一般相対性理論とシュバルツシルト解
- 1930年代以降：恒星の重力崩壊の理論的研究
- 1960年代以降：ブラックホールの理論的研究の進展

- 1960年代：ブラックホールらしき天体の相次ぐ発見
 - クエーサーの発見(超大質量ブラックホール)
 - X線連星の発見(恒星質量ブラックホール)
- ～2000年：ブラックホールの状況証拠の蓄積
 - M106 中心部の高速回転
 - M87 中心部の高速回転と相対論的ジェット
 - 天の川銀河の中心部の恒星の高速運動
- 21世紀：直接的なブラックホールの観測事例
 - 初の重力波事象 GW150914 の検出
 - GW190521 の検出(中間質量ブラックホールへの成長途上?)
 - M87* および Sgr A* のブラックホールシャドウの撮影(?)

質問など随時受け付けています

電子メールでもOK

katsura@cc.osaka-kyoiku.ac.jp

研究室のホームページで情報公開をしています

<https://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/>

今日のスライドも閲覧可能です

<https://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~katsura/BH-world-digest.pdf>

大阪教育 天文

