

一般相対論とスカラーテンソル理論におけるコンパクト天体の解析

高橋 優生・友澤由斗・佐藤圭悟・鈴鹿悠太
東京理科大学 理学研究科 物理学専攻 加瀬研究室

一般相対論(GR)とは

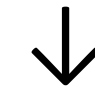
アインシュタインが掲げた重力理論。

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

:アインシュタイン方程式

これは古典力学での運動方程式に対応。

GRによって物理を記述

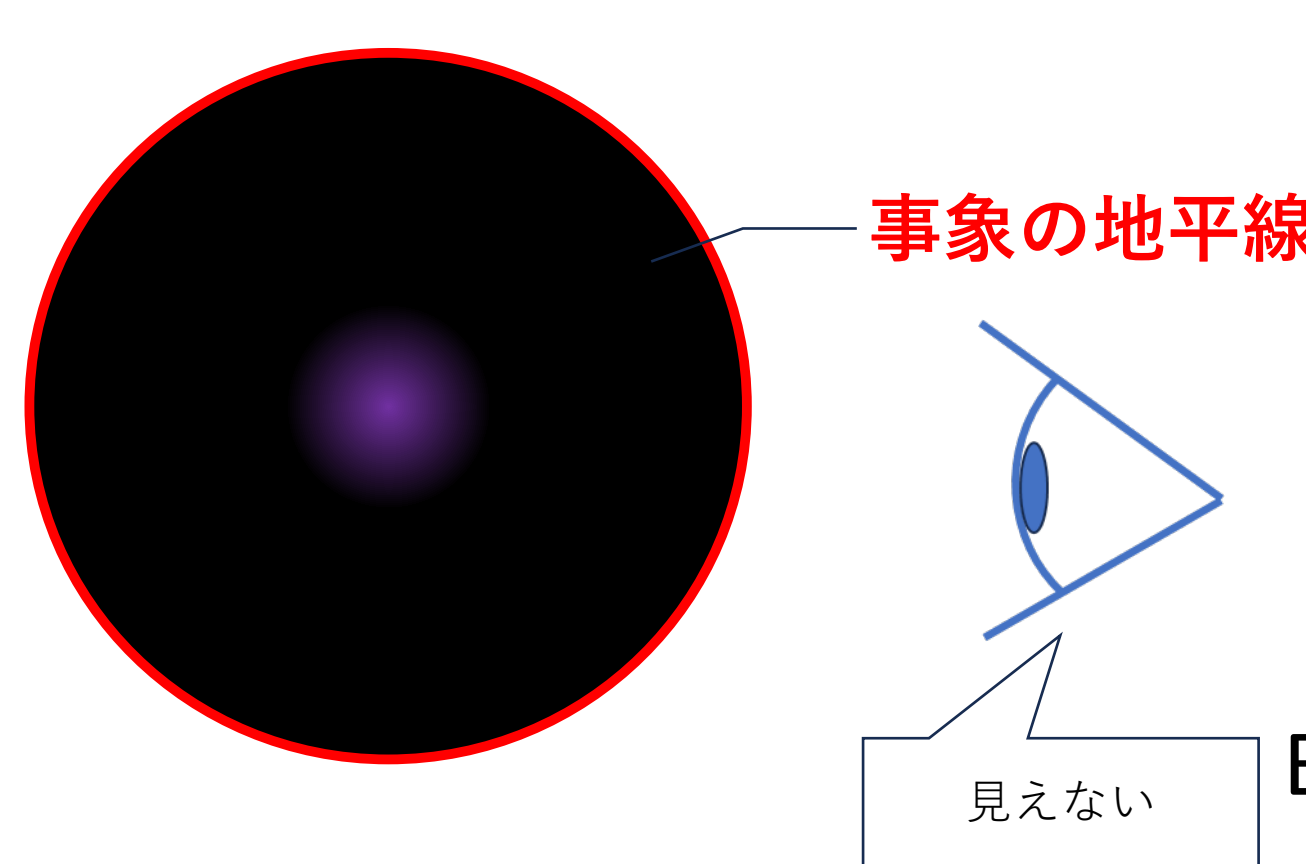


従来では説明が難しかった現象を記述

(宇宙膨張・ブラックホール・水星の近日点移動の誤差・・・)

ブラックホール(BH)とは

GRで存在が予言された強重力の天体



光が脱出出来なくなる領域
「事象の地平線」
観測を困難にしていた

しかし

重力波・シャドウ観測の貢献
BHの直接観測、新しい種類の観測データ

BHは観測で検証できるという将来性

スカラーテンソル理論(ST理論)とは

GRにスカラー場と呼ばれる新しい自由度を加える事で拡張した理論

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

:修正されたアインシュタイン方程式

GRだと解決が難しい問題



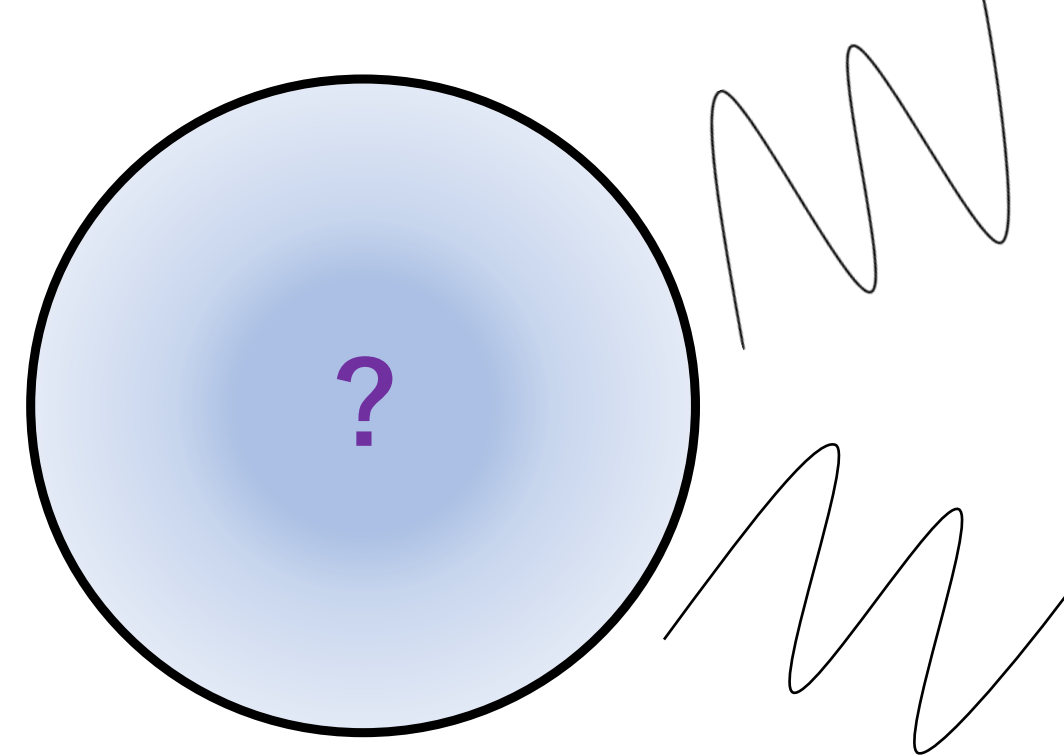
ST理論での記述で解決を目指す

様々な ST理論のモデルがあり、研究の余地あり

宇宙定数問題
ハッブル定数の
不一致など...

中性子星(NS)とは

規則的な電波を発する天体「パルサー」として発見



超新星爆発で誕生する天体の一つ
非常に高密度で中性子で構成
内部が特殊でよく分からない

中性子連星の重力波の観測

内部の情報を含んでいるかも
研究の幅が広がった

ST理論における無毛定理の破れ

無毛定理...GRはある仮定の下で、質量,電荷,角運動量で特徴付けられる一意なBH解を持つ。

Schwarzschild BH	Reissner-Nordstrom BH	Kerr BH
質量のみで構成	質量・電荷で構成	質量・角運動量で構成

GRはBHをはじめとした宇宙における様々な物理現象を記述可能！
しかし、今後の観測精度の向上によりGRとは異なるデータが得られるかも...

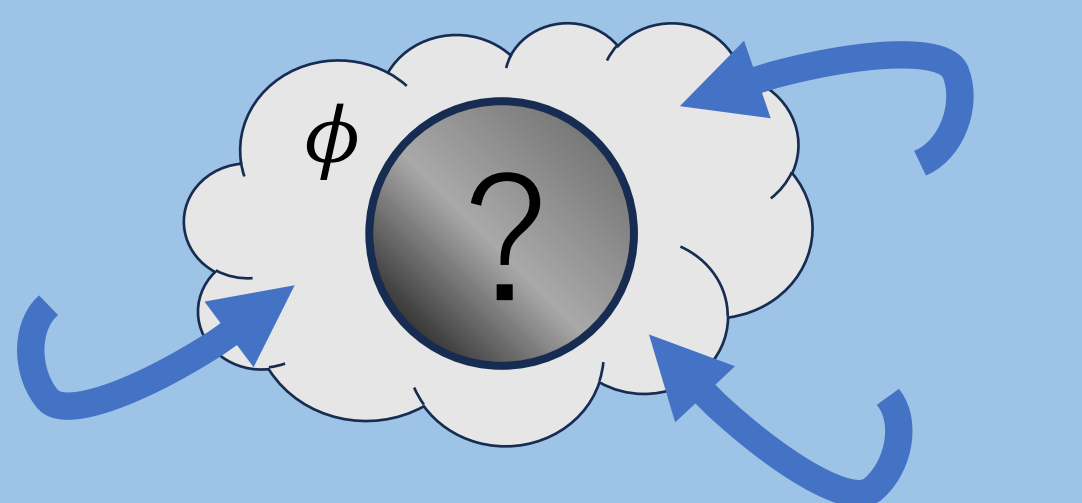
GR以外でBHを説明する1つの手段としてST理論の提案

⇒ **無毛定理**を破る解が!?
(ST理論以外の様々な理論でも発見)

無毛定理を破るBH解が見つかったら...

摂動(ズレ)を加え、その挙動を確認する
→物理現象を記述するのに安定か判断
もし、安定であれば
→摂動方程式を用いた準固有振動モードの研究など...

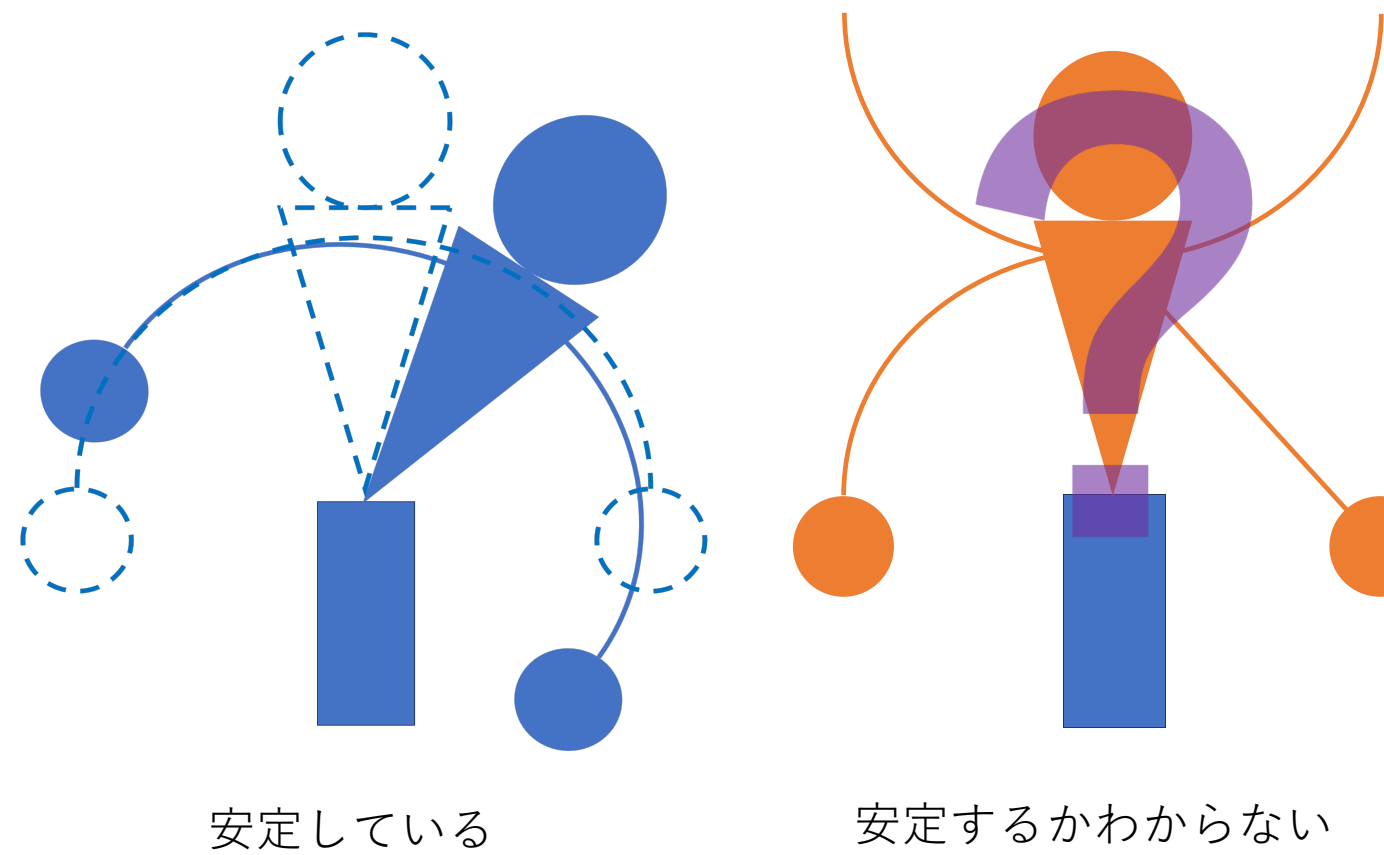
ST理論における
無毛定理を破るBH解



スカラー場φを導入したことでGR以外のBHが形成

BH解の安定性解析

そもそも安定とは
ちよっとずらされても元の状態に戻ろうとする事。このような状態であるのかを調べるのは極めて重要。



どうやって調べるのか

まず、**摂動**をBH解に加えて“ちよっとずらす”

摂動の加わったBH解を解析していく

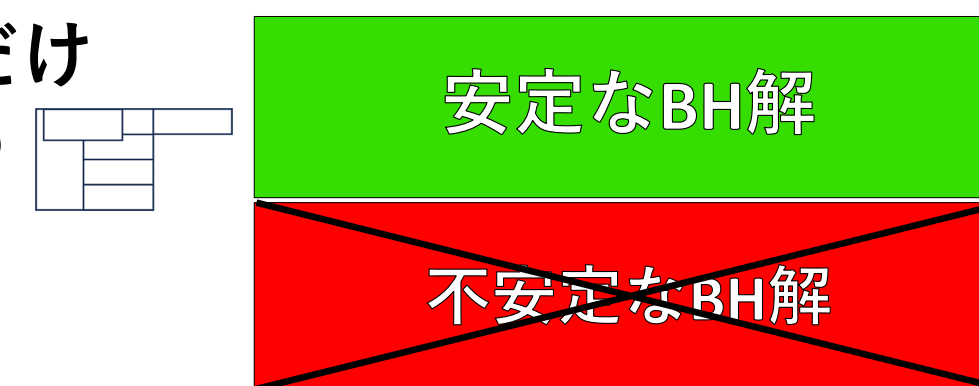
以下の不安定性が回避されるかを確認、安定性を議論する

ゴースト不安定性: エネルギーが下界でなくなる

グラディエント不安定性: 伝播速度が虚数になる

GRでは回避される事が分かっているが、ST理論では未検証な理論が存在するので研究の必要がある。

これだけ
見よう



安定(不安定)なBH解を判別

なぜ安定性を調べるのか

BH解が不安定

BHは安定して存在出来ない

⇕

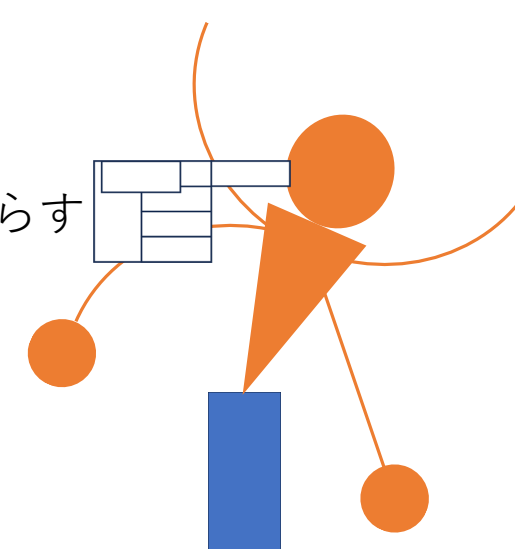
BHは実際に観測されている

安定したBH解でなければ説明出来ない

観測との整合のため

BH解の安定性が必要

ちよっとずらす



中性子星の潮汐変形率

潮汐力とは、天体の形を歪ませる力のこと。
潮汐変形率とは、**天体固有の歪みやすさ**、すなわち潮汐力に対して天体の変形する度合いを表す物理量である。

潮汐変形率の物理的な重要性

天体の変形は、その周りに作る重力場や重力波に大きな影響を与える。(右図)したがって、**中性子星のような変形が起こり得る天体**が生み出す重力波を観る際は、その天体の**潮汐変形率**を考慮する必要がある。



天体が変形すると、周りに作る重力場も変化。



天体が変形すると、それがなす連星が作る重力波も変化。

重力波の振る舞いに影響を与える、潮汐変形率

潮汐変形率は、例えば以下のような式で重力波に影響を与える。

$$\left(\frac{dx}{dt}\right) = (\text{定数}) \cdot x^5 \left(1 + \frac{39}{8} \tilde{\Lambda} x^5\right)$$

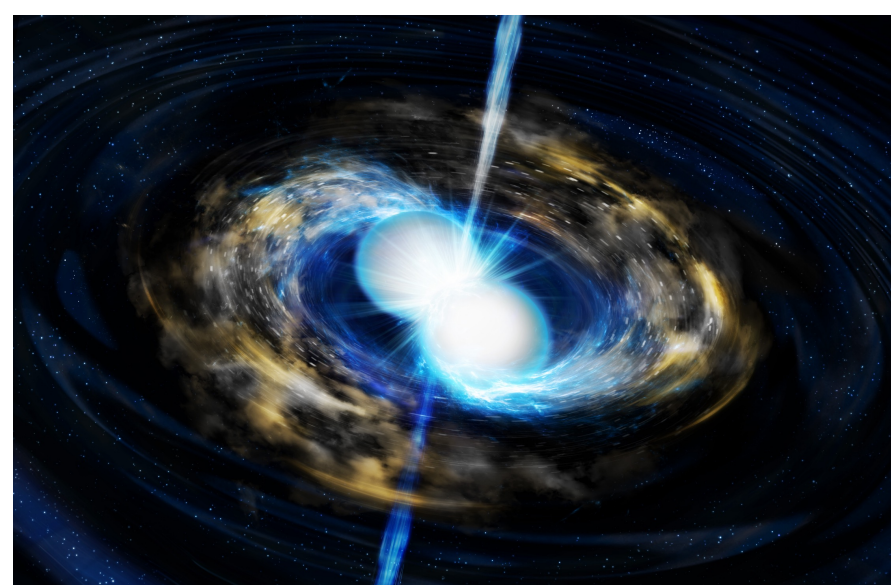
連星運動の角速度に関する時間変化

潮汐変形によって生じた補正項

x: Post Newton parameter、 $\tilde{\Lambda}$: 連星の潮汐変形率。

ST理論を使って、今後できること

GRとST理論での、計算した潮汐変形率を比較。
→今後の重力波における観測技術の向上を見込んで、ST理論でも観測された重力波との比較ができるよう準備しておく。



↑2017年に重力波として観測された中性子星合体の様子
(Credit: Tohoku University)

ブラックホールシャドウ解析

BHは重力が極めて強い天体であるため、BH付近で放出された光子は遠方の観測者には届かない。
→ この暗く見える領域を「**ブラックホールシャドウ**(以下BHシャドウ)」と呼ぶ。また、BHシャドウの輪郭を形成しているのが「**光子球**」と呼ばれる光子の円軌道である。

BHシャドウ解析の重要性

GRの場合のBH解においては無毛定理が成り立つ。
質量のみを持つ場合は**Schwarzschild BH解**と呼ばれる。質量に加えて自転するという条件を加えると**Kerr BH解**となる。

BHの性質は、周囲の**光子の運動**として現れるため、**BHシャドウ**を調べることで上記の様々なBH解の性質を知ることができる。

具体例 (Schwarzschild BHの場合)

Schwarzschild BH付近の光子の動径方向の運動は以下の式で表せる。

$$\left(\frac{d^2r}{dt^2}\right) = E^2 - L^2 V_{ph} \quad V_{ph} = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) \frac{1}{r^2}$$

有効ポテンシャル

(E、Lは単位質量当たりのエネルギー、角運動量。また、 $c=G=1$ とした。)

右図のように $r=3M$ よりも内側に入った光子はBHに吸い込まれるため、遠方の観測者には届かない。よって、 $r<3M$ の領域は**影**として観測される。

GR以外でも...

ST理論の場合、拡張の仕方によっては無毛定理を破るようなBH解が見つかったり。この場合においても、BHシャドウを調べれば、GRと異なるBH解の性質が調べられる可能性がある。

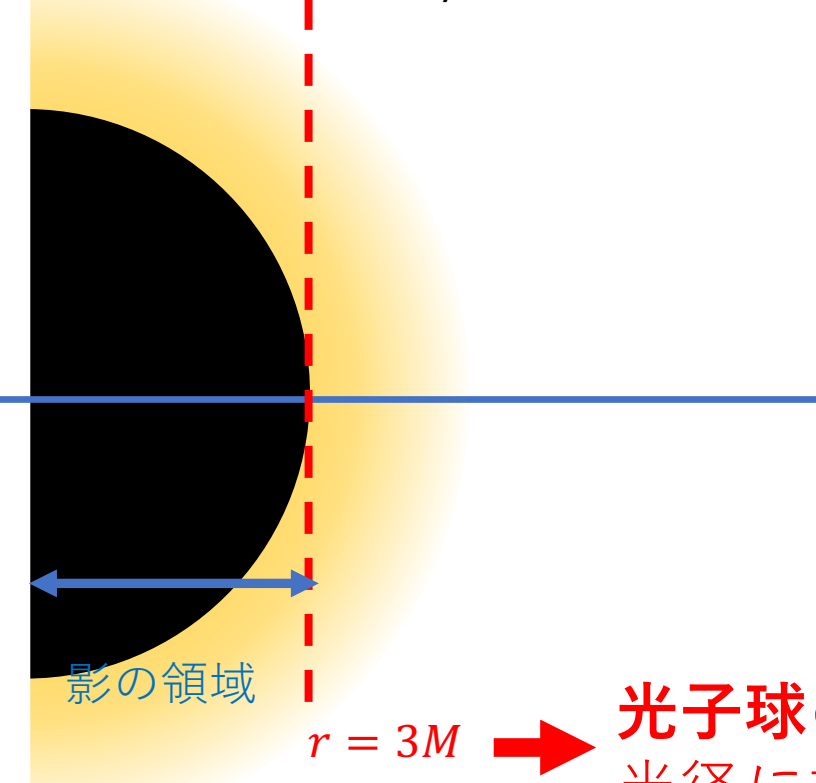
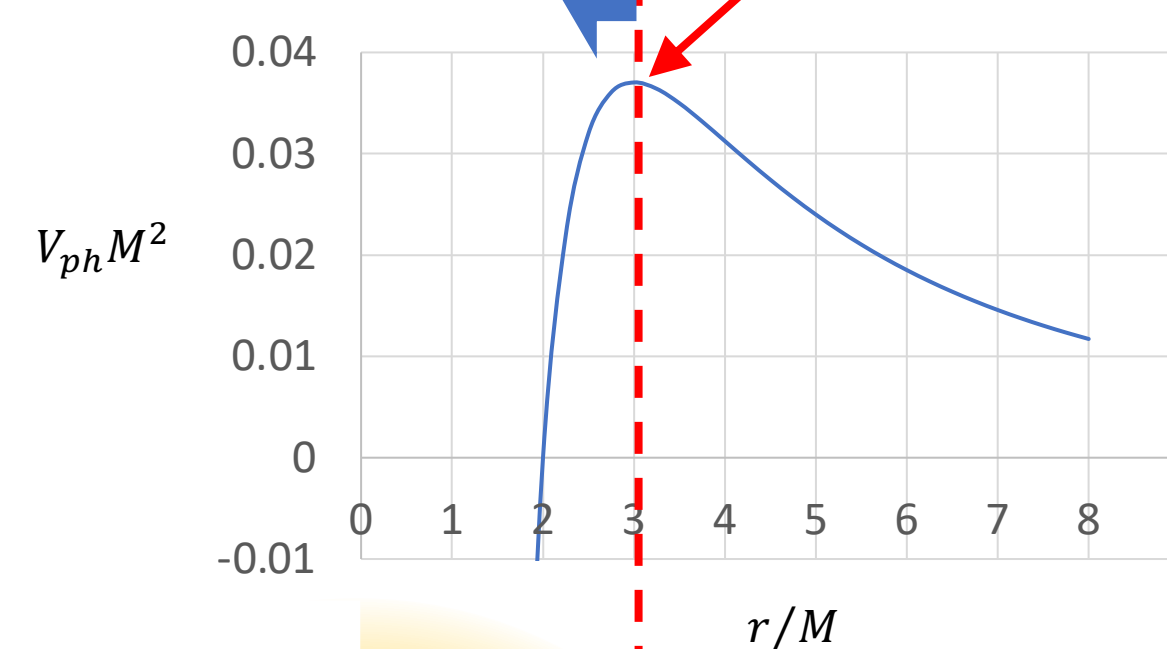
BHシャドウの観測ができるようになったので、BHシャドウ解析はより一層重要になっている



↑2017年に初めて観測された銀河M87の中心にあるBHシャドウ
(Credit: EHT Collaboration)

$r=3M$ のポテンシャル障壁より内側ではBHに落ち込む

極大



光子球の半径に対応