

第9回 講義内容

2025/11/17

配布物

- 09_Cosmology_contents.pdf このファイル Google classroom, web
- 09_Cosmology2025_Viewgraph.pdf スライド Google classroom, web
スライドファイルは当日朝に配布します。
- 09_Cosmology_report2.pdf 別ファイル Google classroom, web
レポート課題です。
- 09_Cosmology_report2ref.pdf 別ファイル Google classroom
朝永振一郎の「光子の裁判」(「量子力学の世界像」所収)。レポート課題の基礎資料です。
著作権があるものなので、Google classroom だけに置きます。

レポート (第2回)

- 読んでもらう基礎資料と課題を今回配布します。資料については、授業で位置づけを紹介します。

講義内容 (予定)

- §3.3 一般相対性理論
ブラックホール, 特異点定理, 重力波

本日の復習課題例

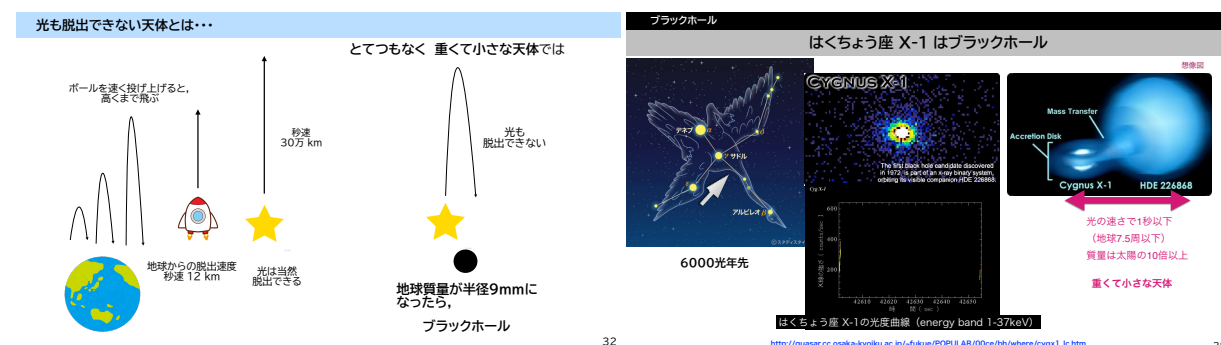
こんなことを観たり, 調べたり, 考えてもらったら面白いかな, という程度のおまけ。

- ブラックホールは天の川銀河中にいくつ発見されているだろうか。
- 重力波のイベントはこれまでにいくつ発見されたか。

次回の予習項目

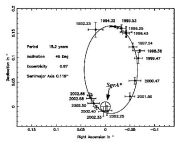
こんなことを調べてもらったら面白いかな, という程度の課題。

- 光は波である, という証拠は何だろうか。
- 「光子の裁判」を読み始めてみる。

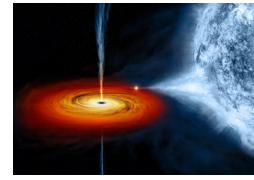


ブラックホール

ブラックホールが存在することは、どうしてわかったのか？



周りの星の激しい運動から
強い重力源であることがわかる



落下していくガスが
高い温度で輝く
(降着円盤 accretion disk)
「ブラックホールは明るい天体」

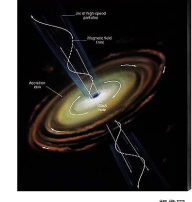
想像図

<http://www.skyandtelescope.com/observing/black-hole-spectacular-astros>

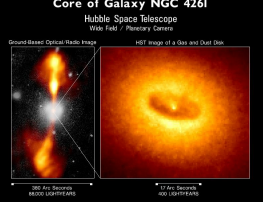
41

ブラックホール

ブラックホールが存在することは、どうしてわかったのか？



銀河中心からジェットが吹き出す
(活動銀河核 active galactic nuclei)



想像図

<http://www.nasa.gov/visual-universe/06/black-hole>

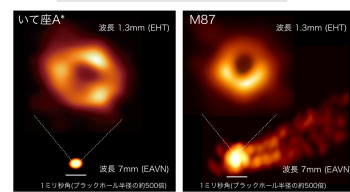
42

ブラックホールの直接撮像に成功！

2022年5月12日、「天の川銀河中心のブラックホールの直接撮像に初めて成功」

Sgr A*	M87
400万太陽質量	65億太陽質量
8 kpc	16.8 Mpc

3桁大きなBHが
3桁速くいるので、
同じ位の大きさに見える



いて座A* 波長 1.3mm (EHT) 波長 7mm (EAVN)
M87 波長 1.3mm (EHT) 波長 7mm (EAVN)

1ミリ秒角(ブラックホール半径の約500倍) 1ミリ秒角(ブラックホール半径の約500倍)

<https://www.miz.nao.ac.jp/eh/eh-j/c/pr/pr20220512>

61

Nobel Prize

ノーベル物理学賞受賞者 2020年
Nobel Laureates in Physics 2020 <https://www.nobelprize.org/>

“ブラックホール”

ロジャー・ペンローズ (89) 英オックスフォード大
「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對して」

ライナルト・ゲンツェル (68) 独マックスプランク研究所
アンドレア・グズ (55) 米カリフォルニア大ロサンゼルス校
「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに對して」

Roger Penrose "for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity"
Reinhard Genzel and Andrea Ghez "for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy."

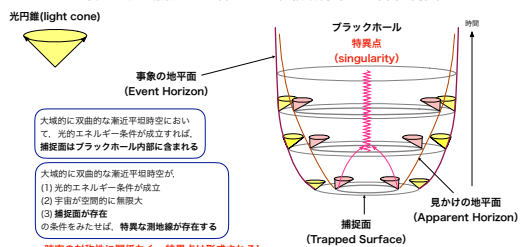



63

3.4.3 ブラックホールの未解決問題: 特異点をどう解決するのか 教科書p97

特異点定理 (ペンローズ, 1965年)

ブラックホールの定義 = 光が無限遠まで届かない空間領域(事象の地平面の内側)



光円錐(light cone)

事象の地平面 (Event Horizon)

特異点 (singularity)

見かけの地平面 (Apparent Horizon)

捕捉面 (Trapped Surface)

大域的に双曲的な漸近平坦時空において、
光的エネルギー条件が成立すれば、
捕捉面はブラックホール内部に含まれる。

大域的に双曲的な漸近平坦時空が
(1) 光的エネルギー条件が成立
(2) 宇宙が空間的に無限大
(3) 捕捉面が存在
の条件を満たせば、特異な測地線が存在する

時空の対称性に関係なく、特異点は形成される！

69

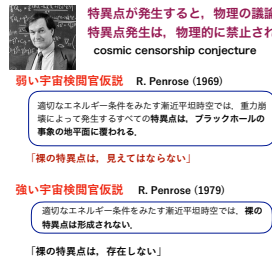
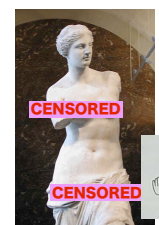
3.4.3 ブラックホールの未解決問題: 特異点をどう解決するのか 教科書p98

宇宙検閲官仮説 (ペンローズ, 1969/79年)

特異点が発生すると、物理の議論ができなくなって困る。
特異点発生は、物理的に禁止されているのではないかと
cosmic censorship conjecture

弱い宇宙検閲官仮説 R. Penrose (1969)
適切なエネルギー条件を満たす漸近平坦時空では、重力崩壊によって発生するすべての特異点は、ブラックホールの事象の地平面に覆われる。
「裸の特異点は、見えてはならない」

強い宇宙検閲官仮説 R. Penrose (1979)
適切なエネルギー条件を満たす漸近平坦時空では、裸の特異点は形成されない。
「裸の特異点は、存在しない」

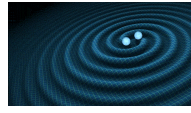
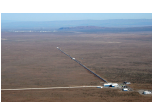
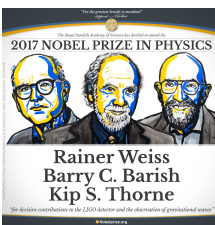

70

Nobel Prize

ノーベル物理学賞受賞者 2017年
Nobel Laureates in Physics 2017

重力波の初観測に成功したアメリカの重力波検出グループLIGO (ライゴ, Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)の3名へ、

贈賞理由は、"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves" (LIGO検出器開発への貢献と重力波の観測)。

Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne

82

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



レーザー干渉計
LIGO=Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

