

特異点とブラックホール - 宇宙検閲官仮説 -

中尾憲一

大阪市立大学
大学院理学研究科 & 南部陽一郎物理学研究所(NITEP)

一般相対論



1915年にEinsteinが提案

重力は時空の曲率が引き起こす見かけの力

電磁気力などを受けていない粒子の世界線は、
因果的（時間的か光的）な測地線（ $\approx$ 時空における直線）

時空の曲がり方はEinstein方程式に従う

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

時空の曲率

物質・輻射のエネルギーと応力

ブラックホール

一般相対論が予言する奇妙な時空の構造



1916年 Schwarzschild がEinstein方程式の球対称真空解を発見
球対称ブラックホールを記述する解

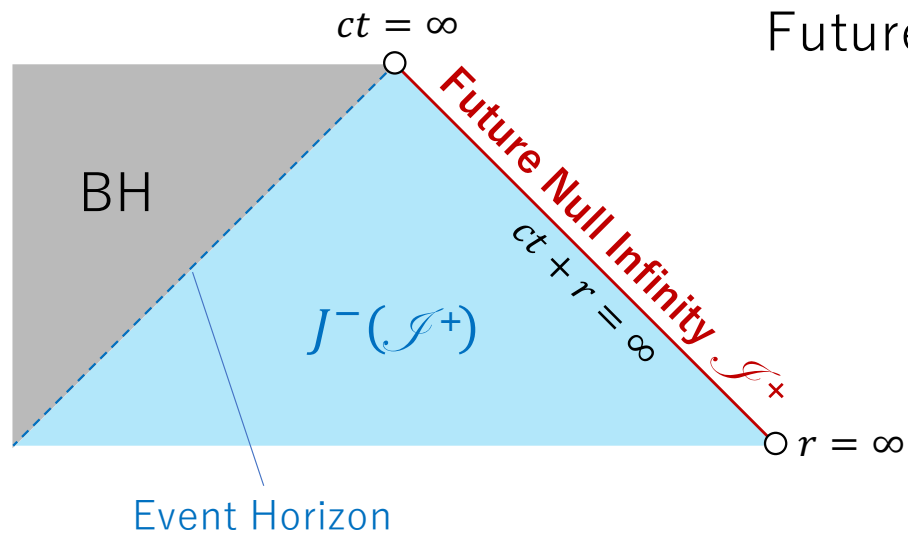
しかし、その意味が完全にわかったのは1960年代

1963年 Kerr が Einstein 方程式の軸対称定常な真空解を発見.

Kerr 解は唯一の定常なブラックホール解！

大雑把にいうと、ブラックホールはそこから何モノも出られない領域

ブラックホール (BH) の定義



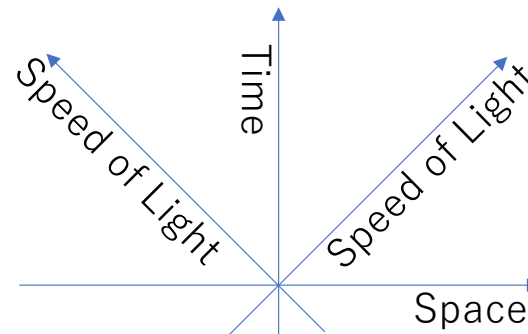
Future Null Infinity の Causal Past の補集合

$$\text{BH} = \mathcal{M} - J^-(\mathcal{I}^+)$$

$\mathcal{M}$: 時空全体

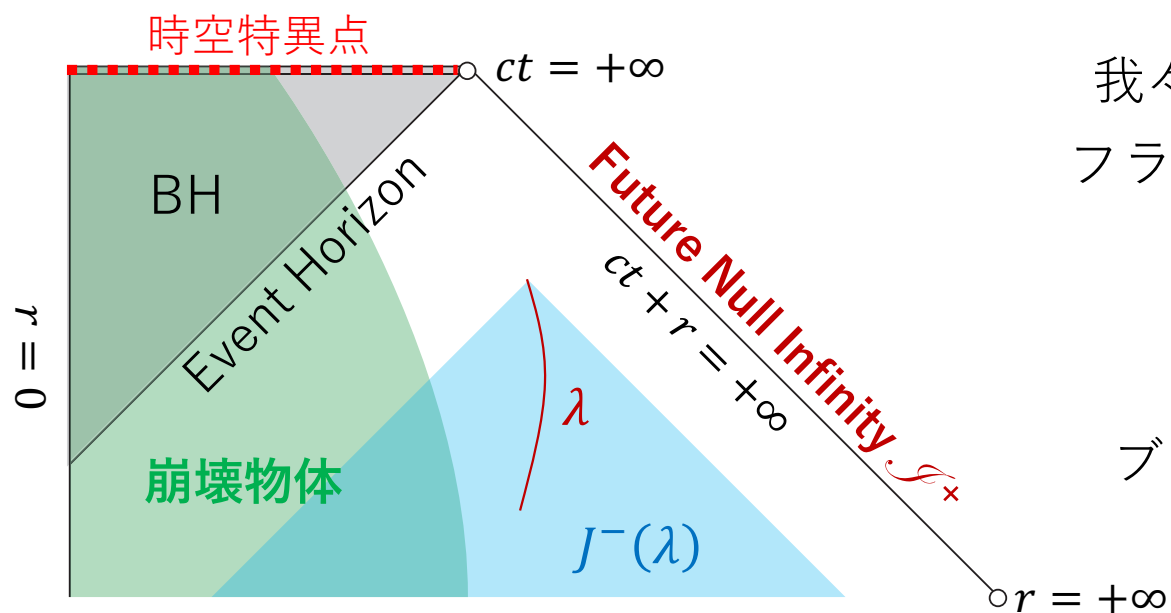
Schwarzschild 時空のPenrose diagram

(注：全体ではない)



我々の宇宙に存在するブラックホールは
大質量物体（例えば星）の重力崩壊で形成される。

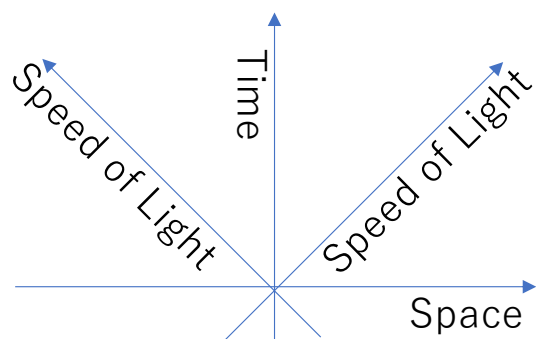
球対称大質量物体の重力崩壊



我々のような外部観測者 λ の視界には
ブラックホールは無く、崩壊物体が存在

永遠に崩壊し続ける!

未だかつて我々の視界の中で
ブラックホールが形成されたことは無い



時空特異点はブラックホールの内部



一般的な性質か?

宇宙検閲官仮説

We are thus presented with what is perhaps the most fundamental unanswered question of general relativistic collapse theory, namely: **does there exist a cosmic censor** who forbids the appearance of naked singularities, clothing each one in an absolute event horizon?

裸の特異点の出現を禁じる宇宙検閲官はあるか？

BHの外側にある特異点

R. Penrose

Nuovo Cimento, Series I, **1**, 252 (1969)

最初は、問題提起だった。

… : is it possible to explain these observations without invoking naked singularities?
The most glaring place where the answer might be appeared to be “no”
is in Weber’s results.

R. Penrose

New York Academy of Science, Annals **224**, 125 (1973)

宇宙検閲官仮説

弱いバージョ ン： 真っ当な物質だけが存在する一般的な初期条件の重力崩壊では、BH の外に特異点は形成されない。

強いバージョ ン： 真っ当な物質だけが存在する時空は大域的雙曲

全ての物理過程を予言できる初期条件を設定できる瞬間(Cauchy surface) が存在

真っ当な物質とは？

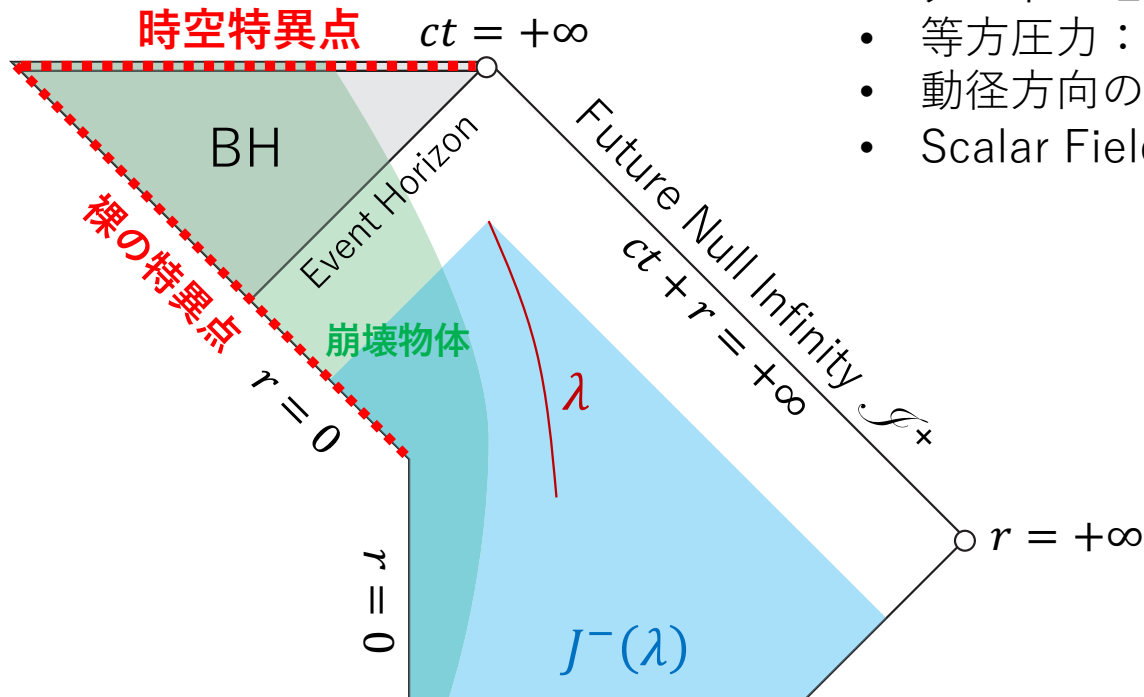
e.g. Dominant Energy Condition を満たす。

未来向きの時間的ベクトル t^α に対し $-T^{\mu\nu}t_\nu$ が未来向きの光的か時間的なベクトル

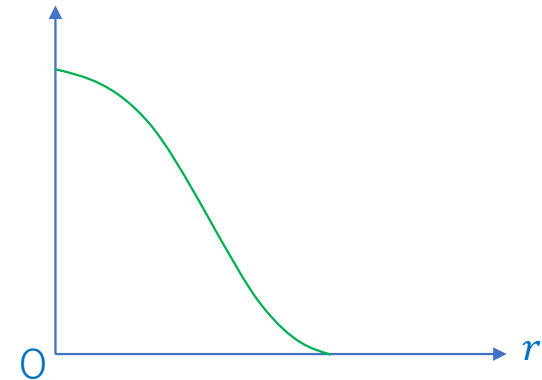
弱いバージョンの反例 1

球対称重力崩壊

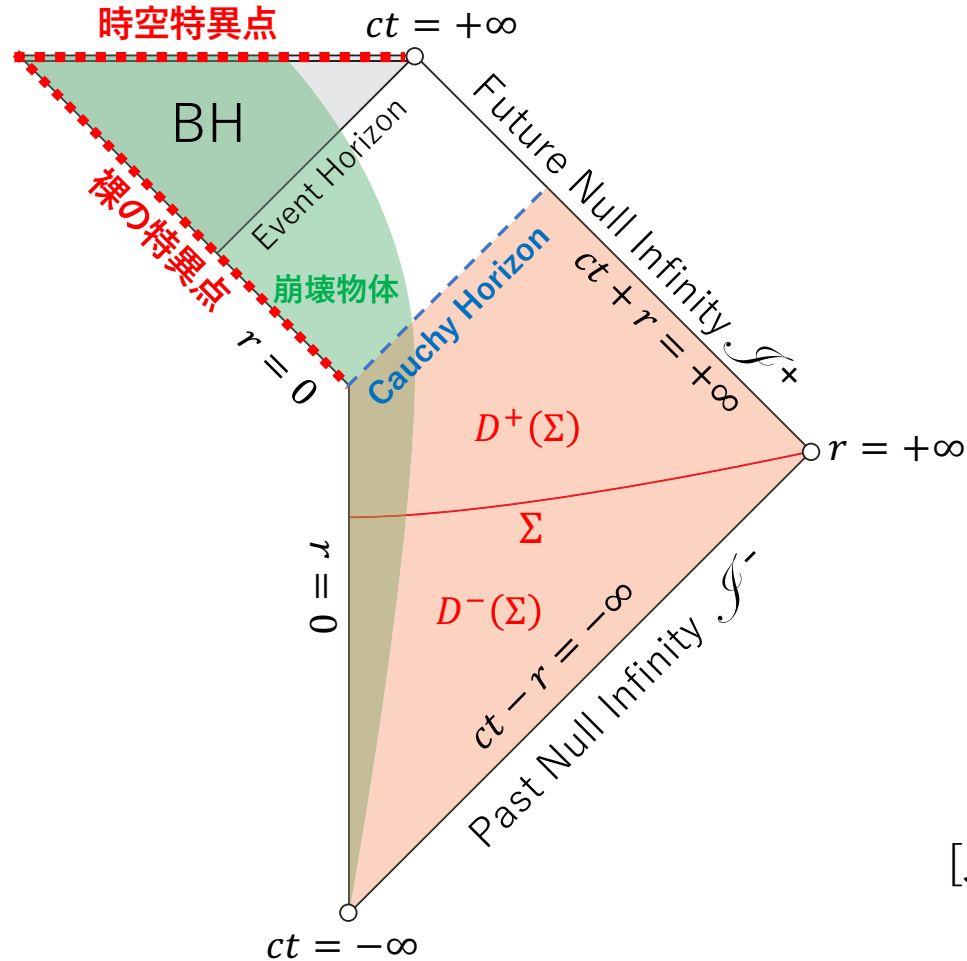
- ダスト： Eardley & Smarr, ...
- 等方圧力： Ori & Piran, Harada, ...
- 動径方向の圧力ゼロ： Harada, Iguchi, KN, ...
- Scalar Field (Critical Behavior)： Choptuik, ...



エネルギー密度



強いバージョンの反例でもある



空間的超曲面 $\Sigma \neq$ Cauchy surface

この時空に Cauchy surface は存在しない。

$D^+(\Sigma)$: Σ 上の情報だけで決まる未来
Future Domain of Dependence of Σ

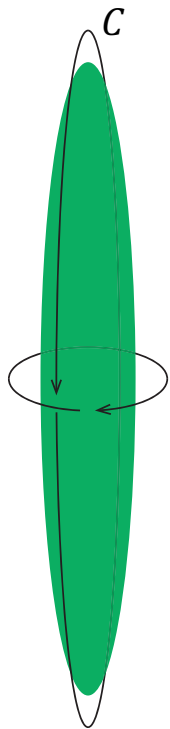
$D^-(\Sigma)$: Σ 上の情報だけで決まる過去
Past Domain of Dependence of Σ

[$\mathcal{M} = D^+(\Sigma) \cup D^-(\Sigma)$ ならば、 Σ は Cauchy surface]

弱いバージョンの反例 2

Hoop Conjecture by K. Thorn (1972)

Horizons form when and only when a mass M gets compacted into a region whose circumference in EVERY direction is $C \lesssim 4\pi GM/c^2$.



数値相対論による研究 (時空の大域的構造は未知)

- ・ 軸対称完全流体 : Nakamura & Sato (1982)

$$\gamma = \frac{4}{3} \sim 2 \quad \frac{E_{\text{internal}}}{|E_{\text{gravity}}|} \lesssim \frac{2}{3} \rightarrow \text{No Apparent Horizon}$$

- ・ 軸対称無衝突粒子 : Shapiro & Teukolsky (1991,1992)

ゼロ速度分散 = ダスト

$$\text{速度分散有り} \quad u^\phi = \pm \Omega r^2 \sin^2 \theta$$

- ・ 3D 無衝突粒子 : Yoo, Harada, Okawa (2016)

ゼロ速度分散 = ダスト

宇宙検閲官仮説

弱いバージョン：真っ当な物質だけが存在する一般的な初期条件の重力崩壊では、BH の外に特異点は形成されない。

強いバージョン：真っ当な物質だけが存在する時空は大域的雙曲

全ての物理過程を予言できる初期条件を設定できる“瞬間”が存在

真っ当な物質とは？

e.g. Dominant Energy Condition を満たす。

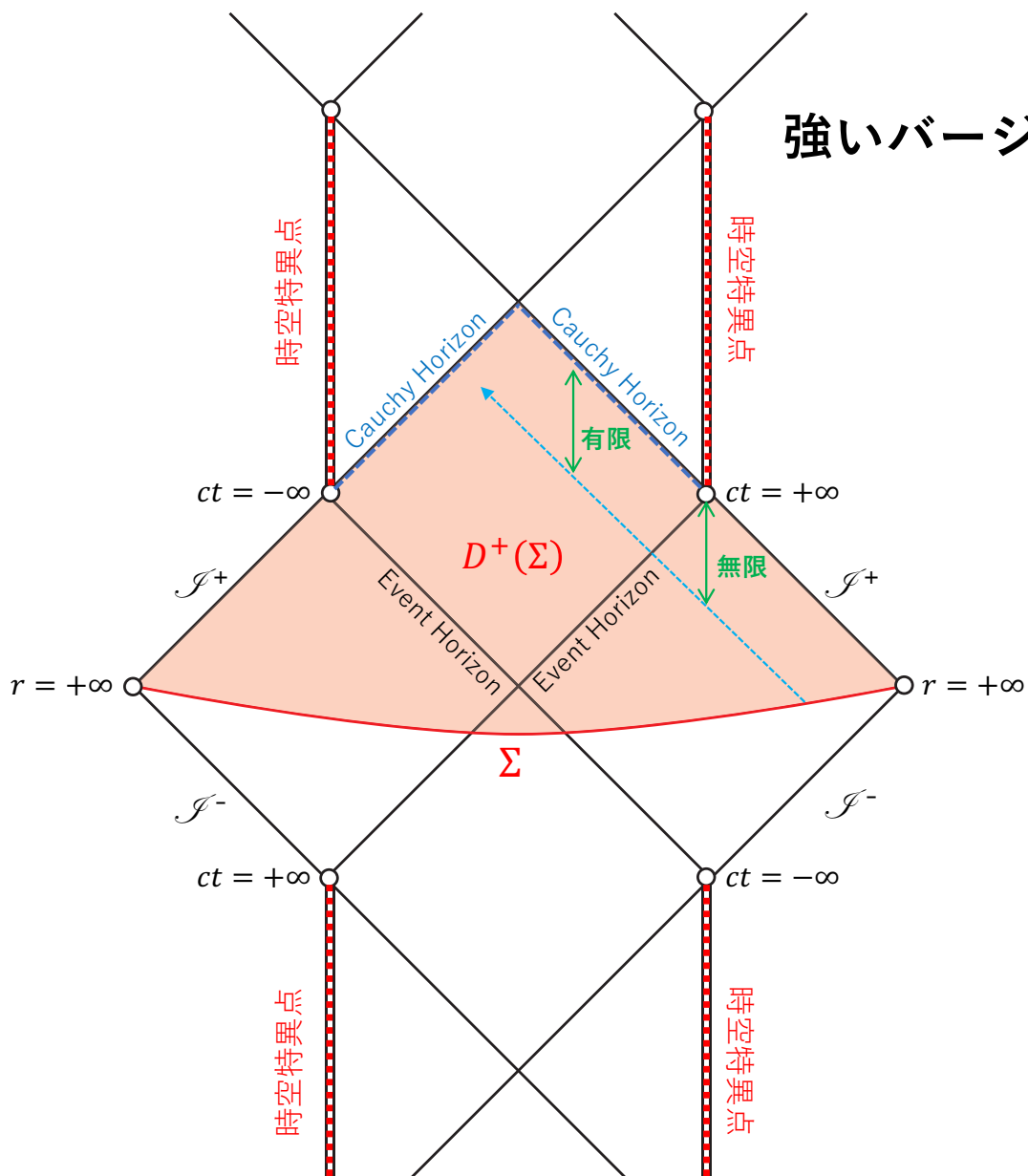
未来向きの時間的ベクトル t^α に対し $-T^{\mu\nu}t_\nu$ が未来向きの光的か時間的なベクトル

重力が存在しない状況でも特異点（物理量の発散）を形成する物質は、真っ当ではない。

強いバージョンの反例

Reissner-Nordstrom black hole

帯電したブラックホール $M > |Q|$ (M : 質量, Q : 電荷)



BH の外側の無限時間の情報を

Cauchy Horizon 近傍では有限時間で受け取る



無限大の青方偏移

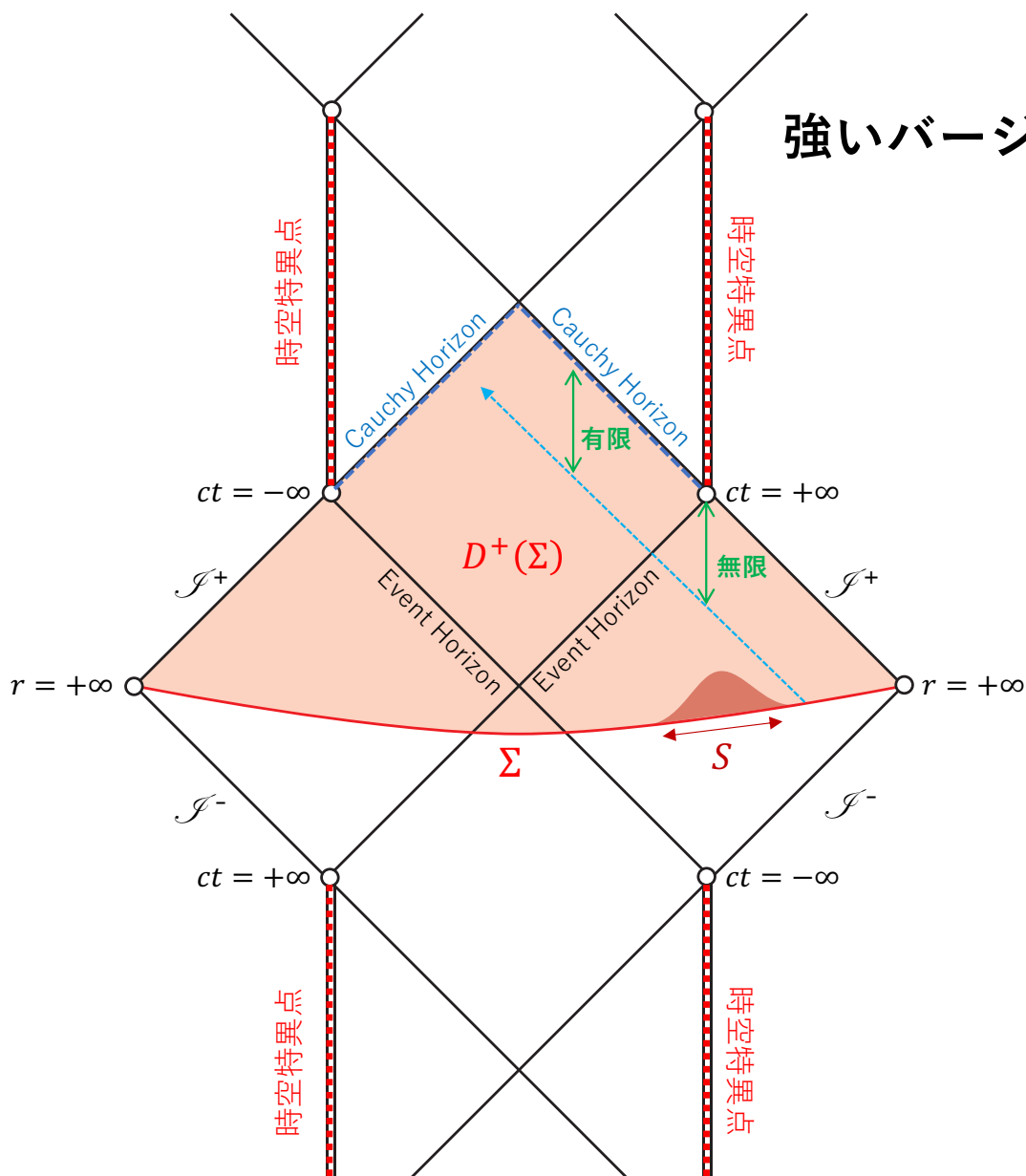
Blueshift Instability

Cauchy Horizon が空間的特異点に置き換えれば、
「強いバージョン」の反例ではない

強いバージョンの反例

Reissner-Nordstrom black hole

帯電したブラックホール $M > |Q|$ (M : 質量, Q : 電荷)



BH の外側の無限時間の情報を
Cauchy Horizon 近傍では有限時間で受け取る



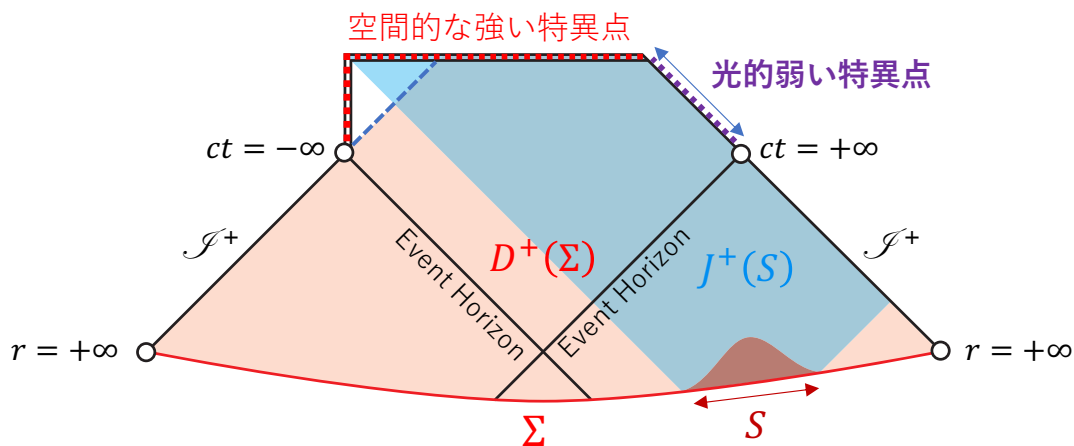
無限大の青方偏移
Blueshift Instability

Cauchy Horizon が特異点に置き換えれば、
「強いバージョン」の反例ではない

強いバージョンの反例

Σ 上の領域 S に球対称摂動を与える

Poisson & Israel (1990), ..., Dafermos (2005)



Cauchy Horizon の一部は光的な弱い特異点に置き換わる

$$g_{\mu\nu} = \text{finite} \quad \partial g_{\mu\nu} = \infty : \text{Mass Inflation}$$

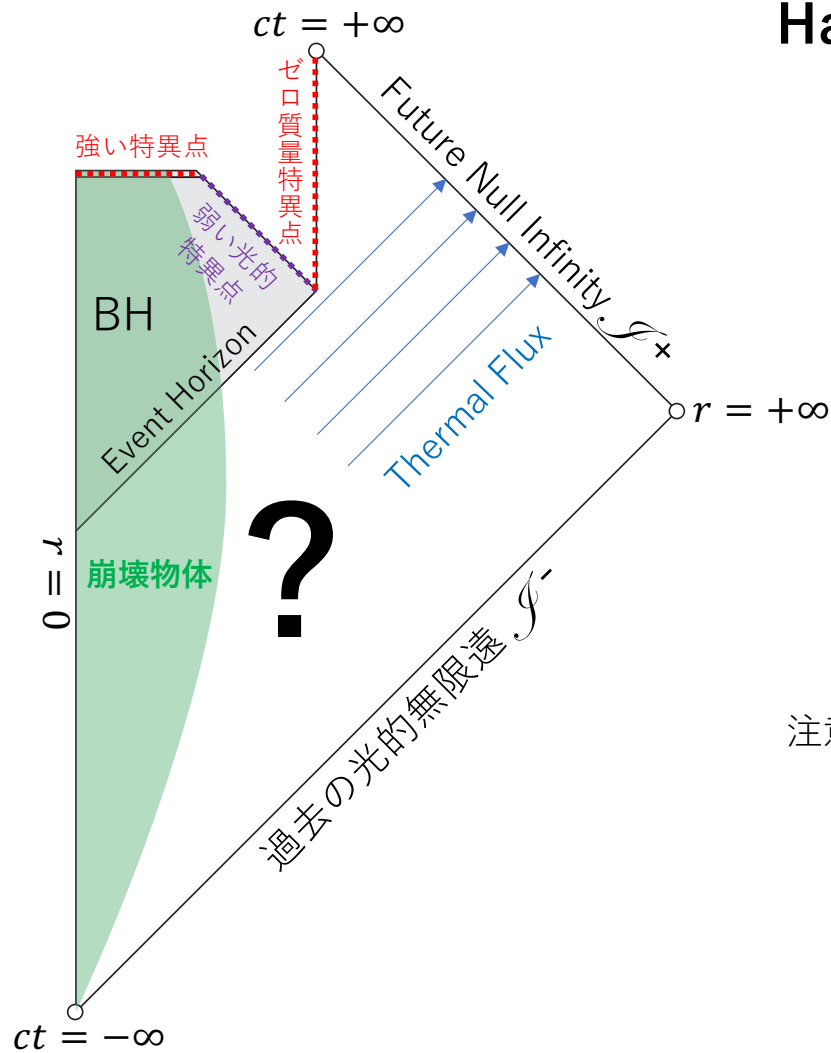
C^0 拡張が可能 $\rightarrow$ 依然として Cauchy horizon

Blueshift instability による光的な弱い特異点形成は一般的

Ori (1991), Ori & Franagan (1995), Brady Droz, Marsink (1998), ...,

Kerr BH 内部の Cauchy Horizon も同様

Dafermos & Luk (2017)



Hawking 放射

球対称の物体が重力崩壊する時空における量子場

$\mathcal{I}^+$ に熱的分布の放射

Hawking (1974)

外部観測者にとって重力崩壊は永遠に続く

永遠に放射 = 無限大のエネルギーの放出

注意) Event Horizon は Thermal Flux の必要条件ではない

Paranjape & Padmanabhan (2009), Barcelo, Liberati, Sonego, Visser (2011)

ブラックホールの形成過程は不安定

最後は裸の特異点？

まとめ

ブラックホール：それがブラックホールであることを観測的に確認できない

ブラックホール $\cap$ 外部観測者の因果的過去 $= \emptyset$

我々の視界の中では、ブラックホールは形成されていない

裸の特異点：原理的に観測可能、既知の物理理論の適用範囲外 → **Laboratory of New Physics**
(beyond Einstein)

弱いバージョン：まだ意見の一致を見ていないようである

高次元時空では、反例の候補多数

Lehner & Pretorius (2010), Okawa, KN, Shibata (2011),...

強いバージョン：ブラックホールの内部で破れていそう

Hawking 放射 → 最後は裸の特異点 (beyond Einstein) ?