

## 2.3 ブラックホール物理学

cf. [江][H]

- **アインシュタイン方程式(重力の古典論) (祭) :**

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

右辺: 物質(星)の分布  
左辺: 時空の曲がり具合

$g_{\mu\nu}$  (リーマン計量) についての2階の微分方程式

- **シュワルツシルト・ブラックホール解(球対称) (祭)**

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (G = 1, c = 1 \text{ とした})$$

$$= -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \frac{1}{1 - \frac{2M}{r}} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$r$  : 原点からの距離

$M$  : BHの質量

# ● シュワルツシルト・ブラックホール解(球対称) <sup>47</sup>

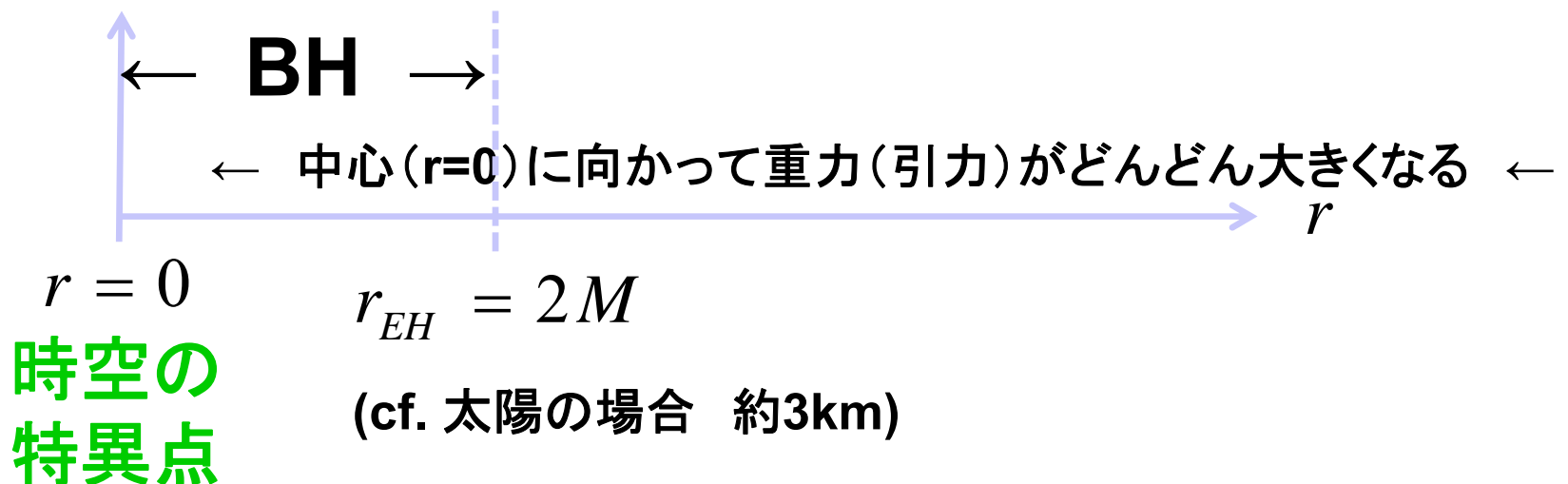
$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \frac{1}{1 - \frac{2M}{r}} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

$r$  : 原点からの距離

$M$  : BHの質量

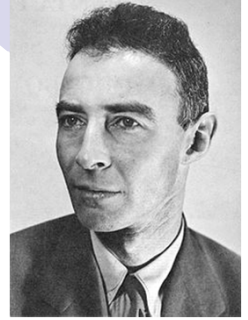
$r = 2M$  ( $=: r_{EH}$ ) : 事象の地平線(Event Horizon=EH)

$r < r_{EH}$  の領域では光さえも逃れられない！  
(EHの内部=ブラックホール)



# ブラックホール(Black Hole=BH)研究の歴史

- 1915年: アインシュタインの一般相対論
- 1916年: シュワルツシルトBH解
- 1939年: 星の重力崩壊によるBHの形成
- 1965年: カー・ニューマンBH解
- 1965年～1975年: **黄金時代**(特異点定理・無毛定理・一意性定理・面積定理・・・)  
[ペンローズ・ホーキング]
- 1972年: ブラックホール熱力学
- 1975年: ホーキング輻射の発見
- ...
- 1996年～: 超弦理論によるBH熱力学の解明: 3.3節



Oppenheimer  
ウィキペディア[22]



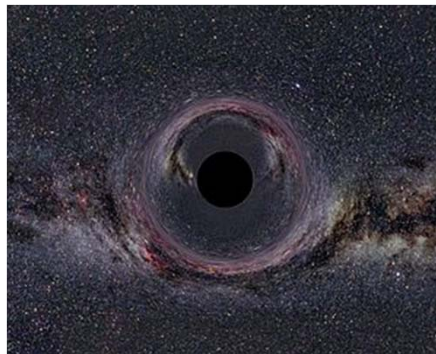
Roger Penrose  
ウィキペディア[23]

# ブラックホールはそもそもあるのか？

- はくちょう座X-1(強いX線の放射源)

cf.「慶永十五年(1408年)六月二十一日戌戌客星あらわる。天文博士 某、凶兆八ヶ条を奏す」  
[続史愚抄三十二]

- 銀河中心の超巨大ブラックホール(太陽の1億倍程)



Ute Krausによる  
シミュレーション  
画像[24]

- 2つのブラックホール衝突による重力波の検出！

# ブラックホールの性質

- **無毛定理**: ブラックホールには「毛」(個性)がない [カーター、ホーキング、イスラエル、ロビンソン]

ブラックホールを特徴づけるパラメータは  
M(質量)、J(角運動量)、Q(電荷)のみ。

- **面積定理** [ホーキング]

ブラックホールの事象の地平線の面積Aは  
時間とともに減少しない

(例) シュワルツシルトBH  $A = 4\pi r_{EH}^2 = 16\pi M^2$

# ブラックホールの性質

## ● ブラックホール熱力学

[バーディーン、カーター、ホーキング]

	普通の熱力学	BH熱力学
第0法則	熱平衡において温度 $T$ はいたるところ一定	定常BHにおいて表面重力加速度 $\kappa$ はいたるところ一定
第1法則	下記(i)	下記(ii)
第2法則	エントロピー $S$ は増大する	EHの面積 $A$ は増大する
第3法則	$T=0$ は実現しない	$\kappa=0$ は実現しない

$$(i) \delta E = T \delta S + \text{work terms} \quad (ii) \delta M = \frac{\kappa}{2\pi} \delta \left( \frac{A}{4} \right) + \text{work terms}$$

- ・ブラックホールのエントロピー:  $S = \frac{1}{4} A$  cf.[ベケンシュタイン]
- ・上記の議論はただの類似(似ているというだけ)!
- ・BHの温度って何? 熱放射するの??
- ・BHのエントロピーって何? おいしいの?

# ホーキング輻射

- ブラックホールはそんなに「黒く」ない！

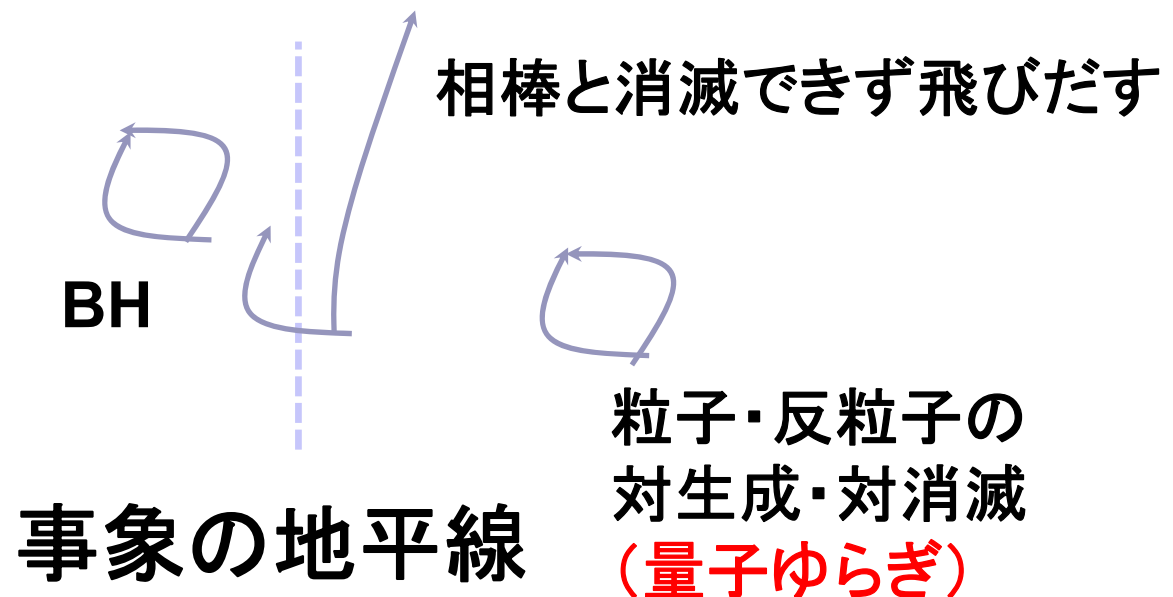
ブラックホールは**熱放射**をする！ [ホーキング、1974年]  
(吸い込むだけではない！)

設定：ブラックホール時空を背景として固定し、  
その上で物質場を量子化する

直観的説明：



Steven  
Hawking  
ウィキペ  
ディア[25]



- 注：量子力学に従う物質場はユニタリな時間発展をする(因果律を守り過去から未来へ情報を保つ)
- シュワルツシルトBHの温度： $T = \frac{1}{8\pi M}$  (祭注：BHの比熱は負！)  
熱放射によりエネルギー(質量)を失う  
→ 温度が上がって放射が激しくなる → BHの蒸発
- BHに吸い込まれた物質の情報は一様なホーキング放射となり、蒸発後情報損失が起こるのでは？  
(ブラックホールの情報損失問題：大問題)
- 2つの立場：
  - (i) 量子力学は破たんし情報は損失する  
(ホーキングはこちらに賭けた)
  - (ii) 量子力学は破たんせず情報は保たれる  
(プレスキルはこちらに賭けた) --- 続く

