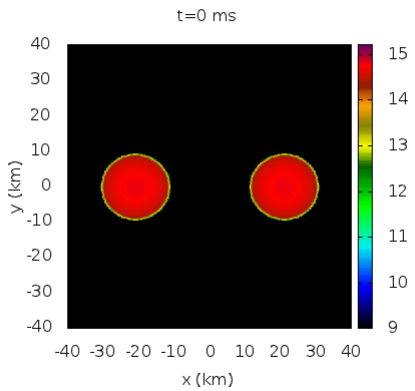
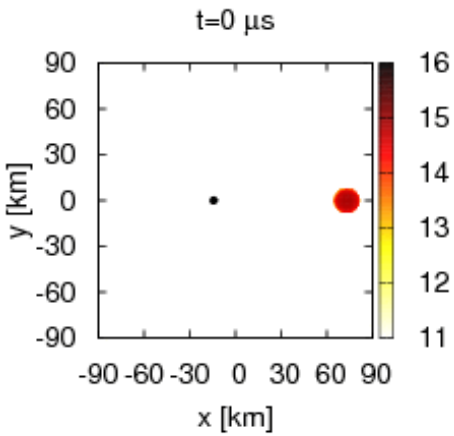
ブラックホールを
コンピュータ上で
創る





柴田　大

(京都大学基礎物理学研究所)

YITP
YUKAWA INSTITUTE FOR
THEORETICAL PHYSICS

内容

1. 一般相対論と万有引力
2. ブラックホールの証拠
3. ブラックホールはどのように誕生するのか
4. 重力波でブラックホールを探る
5. ブラックホールを創る

1　一般相対論と万有引力

◆　ニュートンの万有引力理論：
２つの物体がひきつけあう

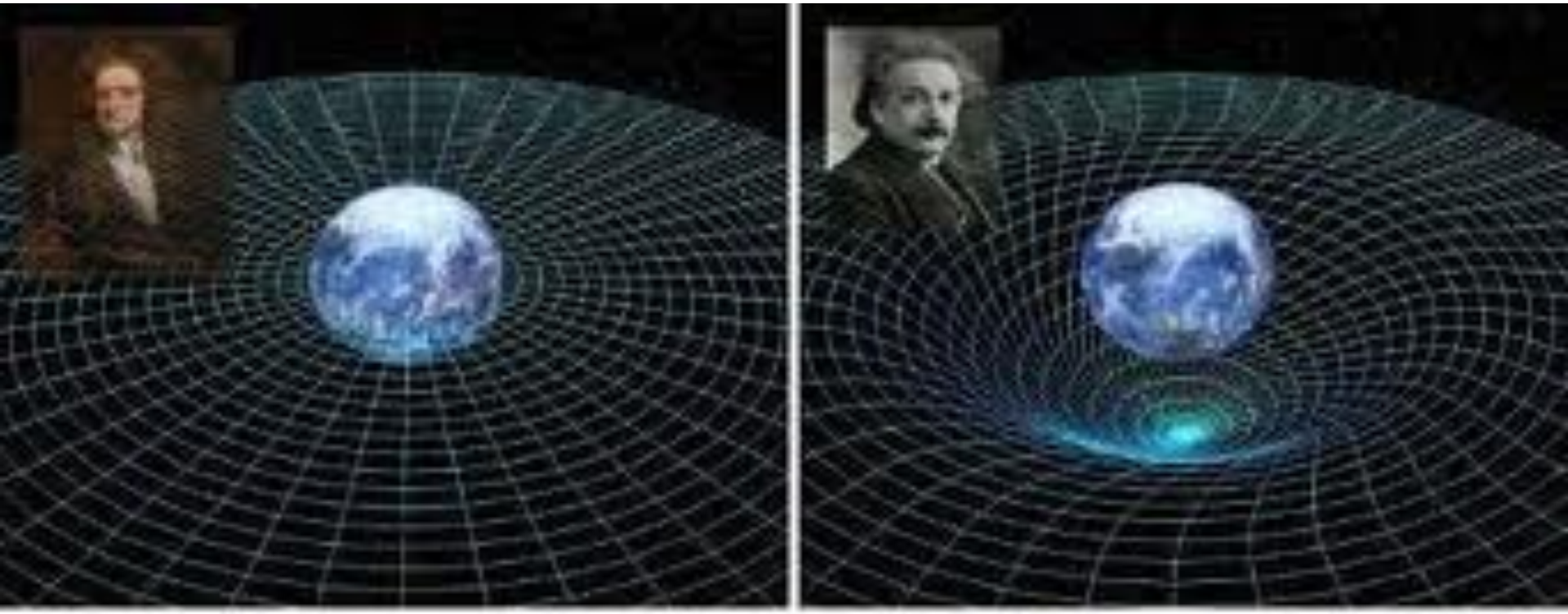
2×10^{30} kg

引力

6×10^{24} kg

公転運動はまっすぐ進もうとするのを
引力で阻害するから起こる、と考えうる

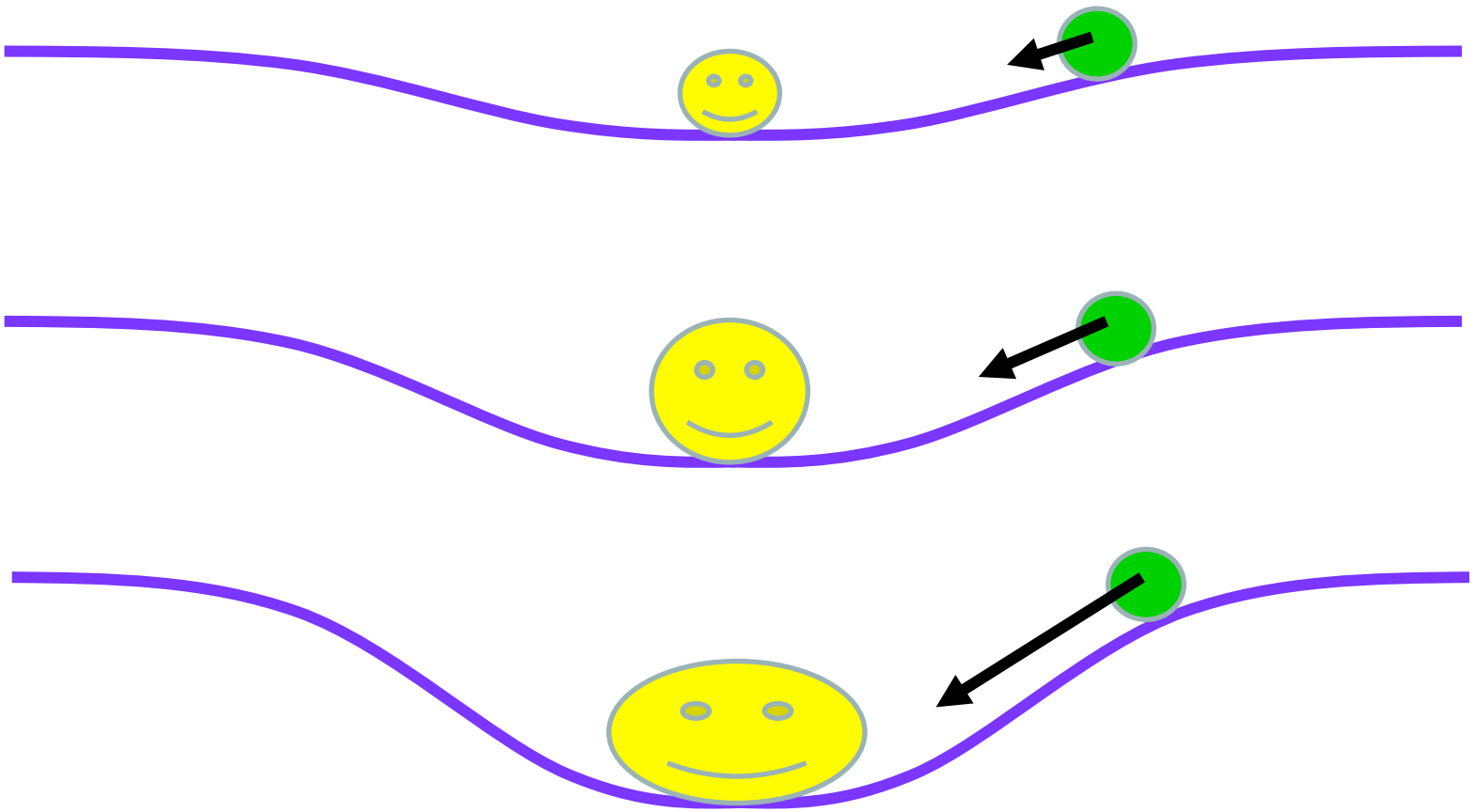
◆　アインシュタインの一般相対論：
重力＝時間・空間が曲がっていること



Newton's fixed space　　Einstein's flexible space-time

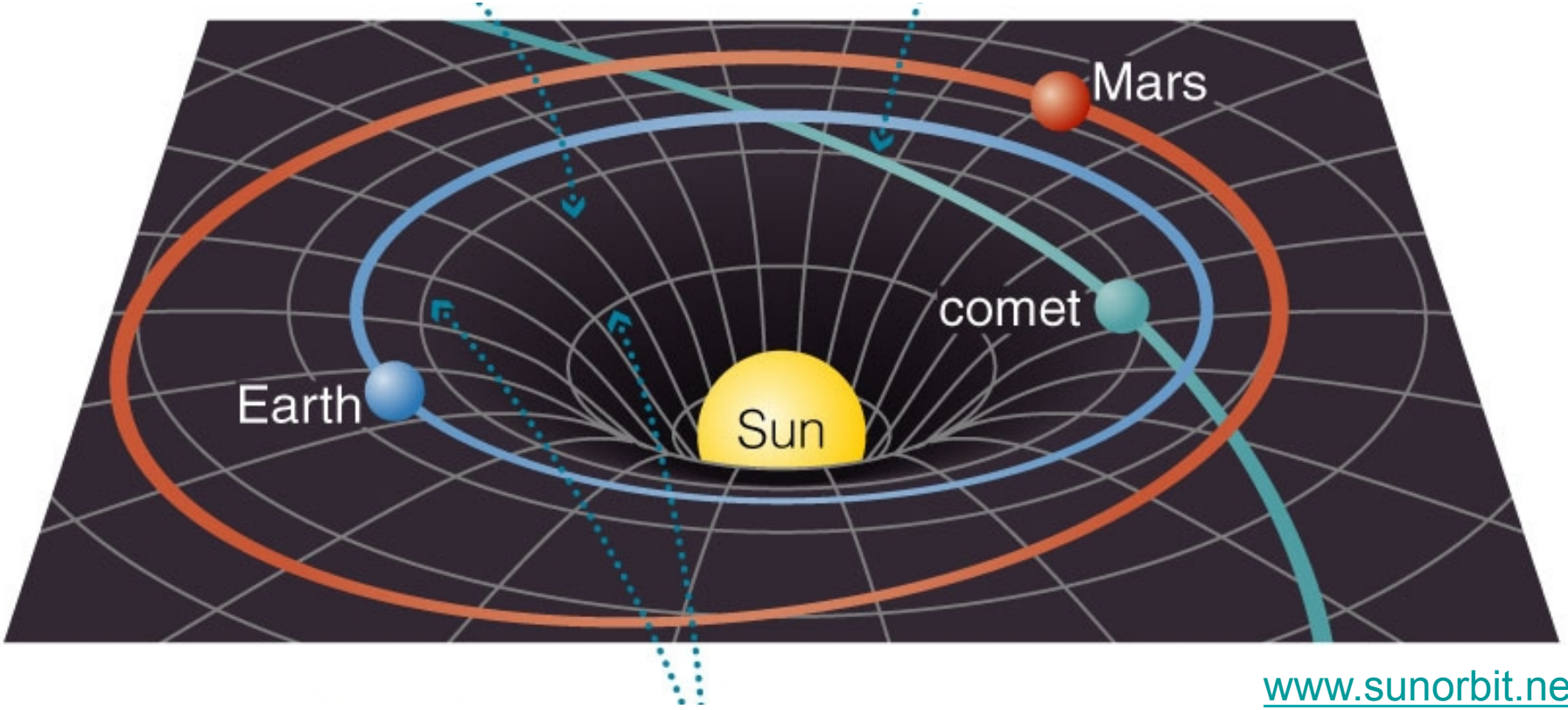
www.nasa.gov

時空の曲がりのイメージ



・重い人がトランポリンに乗ると、よりたわみ勾配がきつくなる、かのようである

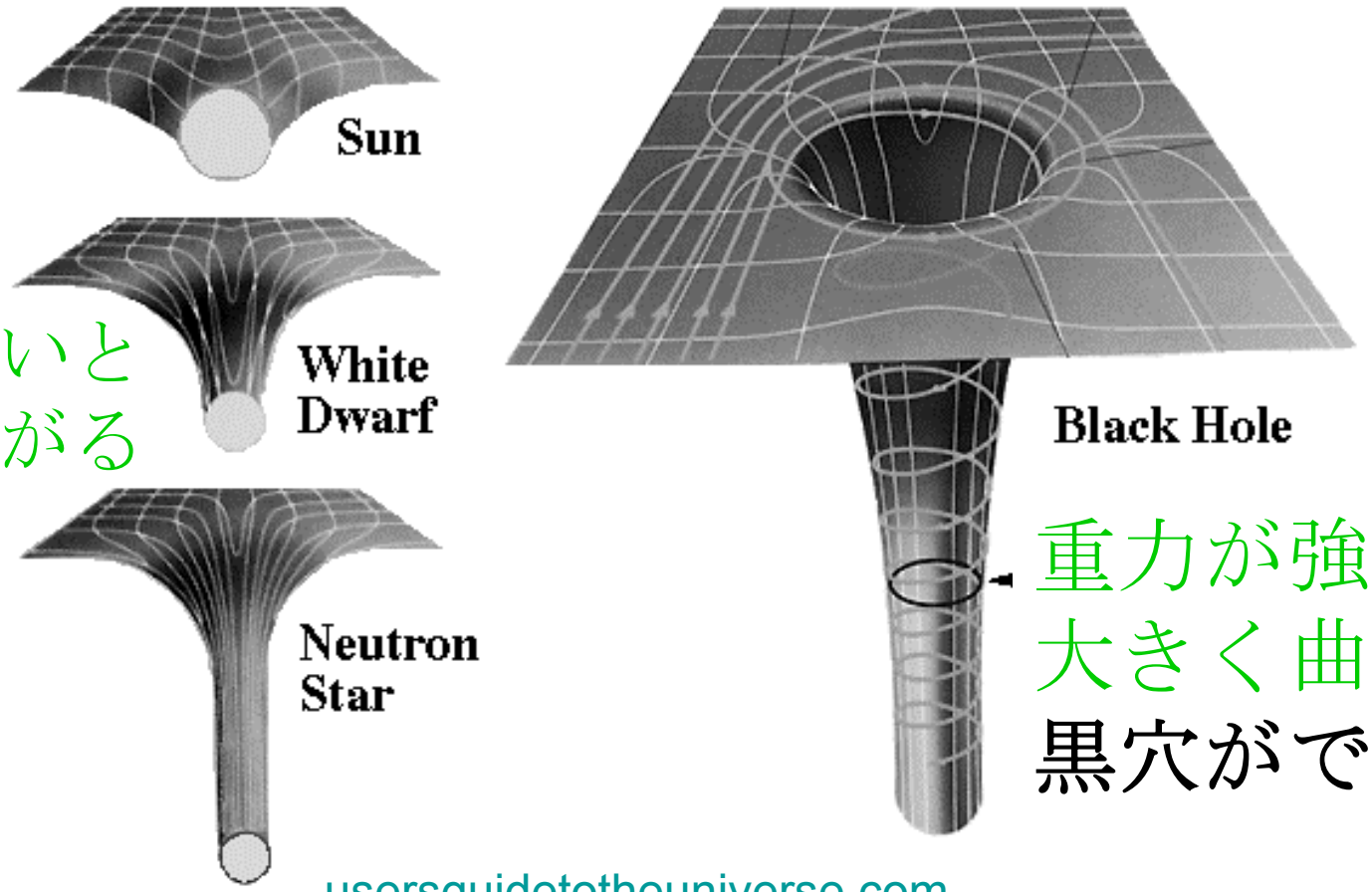
天体の運動



www.sunorbit.net

曲がった時空の中を最短距離で動こうとする。
軌道は、物体の性質、質量に依存しない
→　等価原理

強い重力場＝時空の大きな歪み



重力が弱いと
小さく曲がる

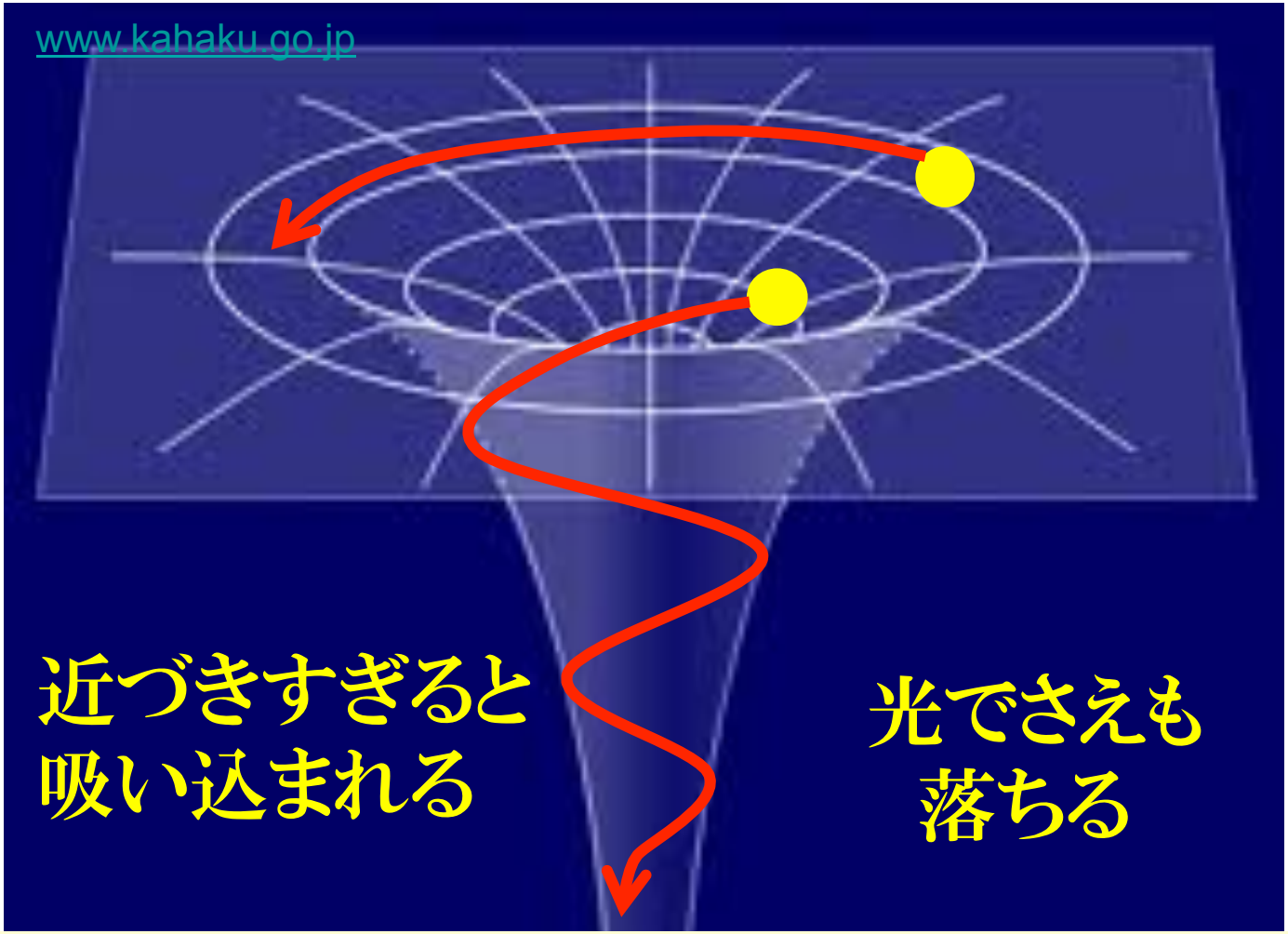
重力が強いと
大きく曲がる。
黒穴ができる。

usersguidetotheuniverse.com

違いは重力源の<u>コンパクトさ</u>による

質量÷半径

ブラックホール＝曲がりすぎた空間



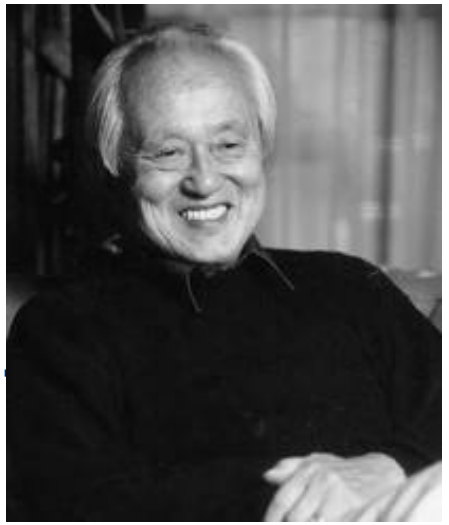
離れていれば公転も可能

だが、近づけば落ちる

最初に存在が予言されたのは1916年

2 ブラックホールの証拠

- 長年にわたる観測的努力による：
  1960年代中ごろ以降に飛躍的発展
- 日本もX線衛星による観測で黎明期から
  大きく貢献してきた：　　小田稔先生



- 電波観測でも、90年代から貢献

➢ 2つの種類のブラックホールの存在が確定

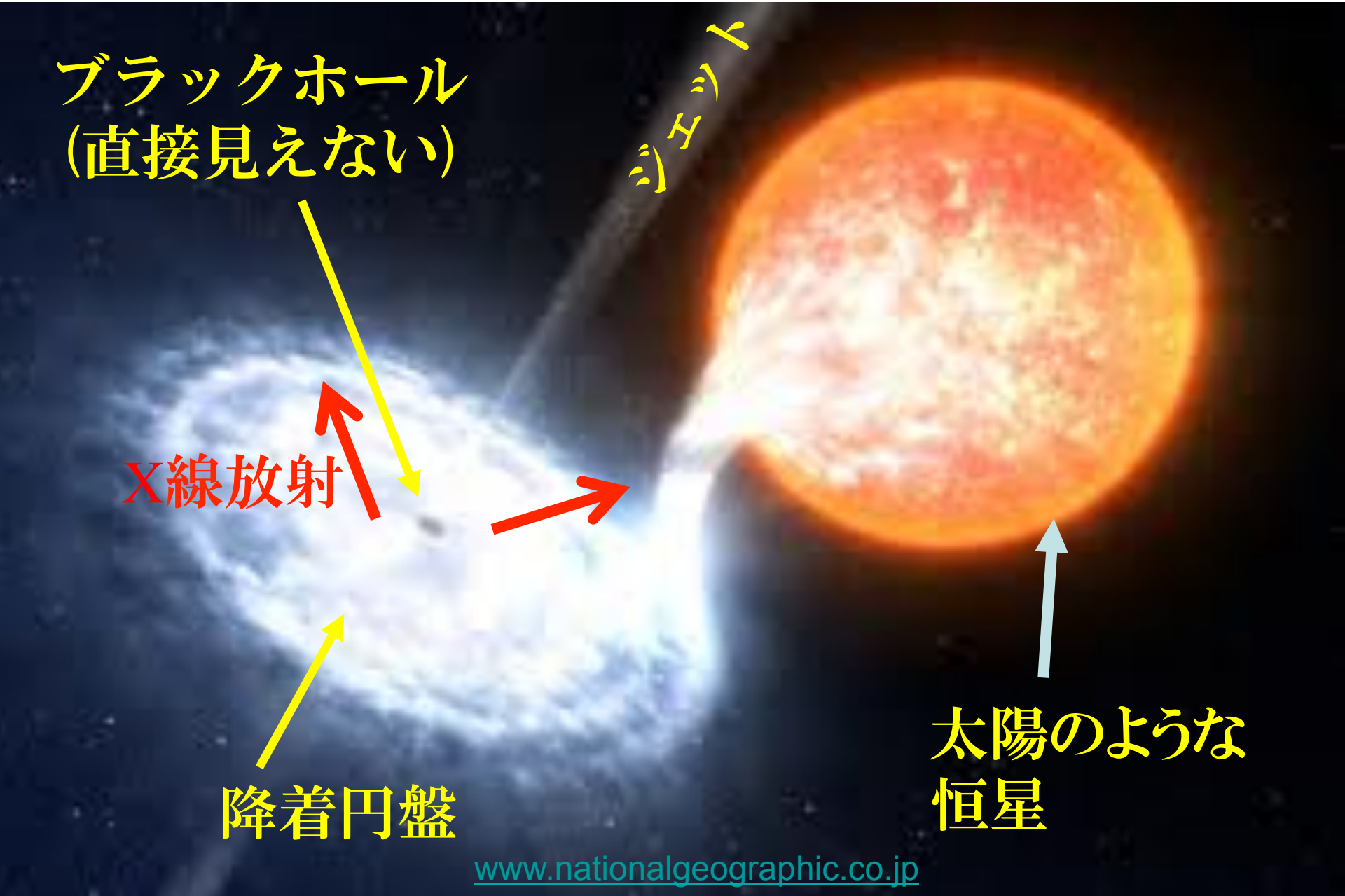
a. 星サイズのブラックホール
　＝太陽の数倍～数十倍の質量を持つもの (X線観測)

b. 超巨大ブラックホール
　＝太陽の百万～百億倍の質量を持つもの
(電波観測、可視光、赤外線観測)

a:　星サイズのブラックホール

- 我々の銀河系と近傍の銀河系内でこれまでに約20が確定、さらに約30の候補
- どのように観測されるのか？
  ブラックホール自体は、真っ暗で見えない
- 「間接的に」観測してきた
  →　観測できる星との２重星(連星)の中で発見する。そして状況証拠から決定。

ブラックホール連星のイメージ図



www.nationalgeographic.co.jp

十分条件

◆ 「見えない」だけでは証拠にならない。
技術力が十分でないために、見えない天体は他にも存在する（例：中性子星）
⇒ ブラックホール特有の証拠が必要になる

➢ ブラックホールには、表面がないという性質が降着円盤の輝き方に現れる。

➢ ブラックホールならではの激しい現象。

➢ 質量が大きくて、他の天体では説明できない

ジェットを出す：光速に近い速度で物質噴出

アーティストによる想像図です

ケプラーの第3法則

- 公転周期Pの2乗は、軌道半径Rの3乗に比例する

$$\left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 = \frac{R^3}{GM}$$

Gは万有引力定数。Mは全質量。
ケプラーの第3法則から、全体の質量がわかる。

- 伴星である恒星の動きから、公転周期は判明。
公転速度Vもドップラー効果観測で制限が課される → $R=V\times P$から軌道半径が制限が課される。さらに恒星の『色』から質量が大体分かる

⇒$M-m$が十分に大きければブラックホールと判定

b: 超巨大ブラックホール

- 多くの銀河系の中心に存在すると信じられていて示唆する観測は多い。
- しかし、真に確定したものはまだ3つ：
  我々の銀河の中心、およびさらに2つの系外銀河の中心に存在を確認。うち1つは、日本人電波観測者(三好、井上、中井ら)による
- どのように観測されるのか？
- ブラックホール自体は、真っ暗で見えないのでやはり「間接的に」観測する

アンドロメダ銀河

http://apod.nasa.gov/apod/ap130626.html
我々からもっとも近い銀河の1つ。
それでも210万光年の距離。

我々の銀河系の中心

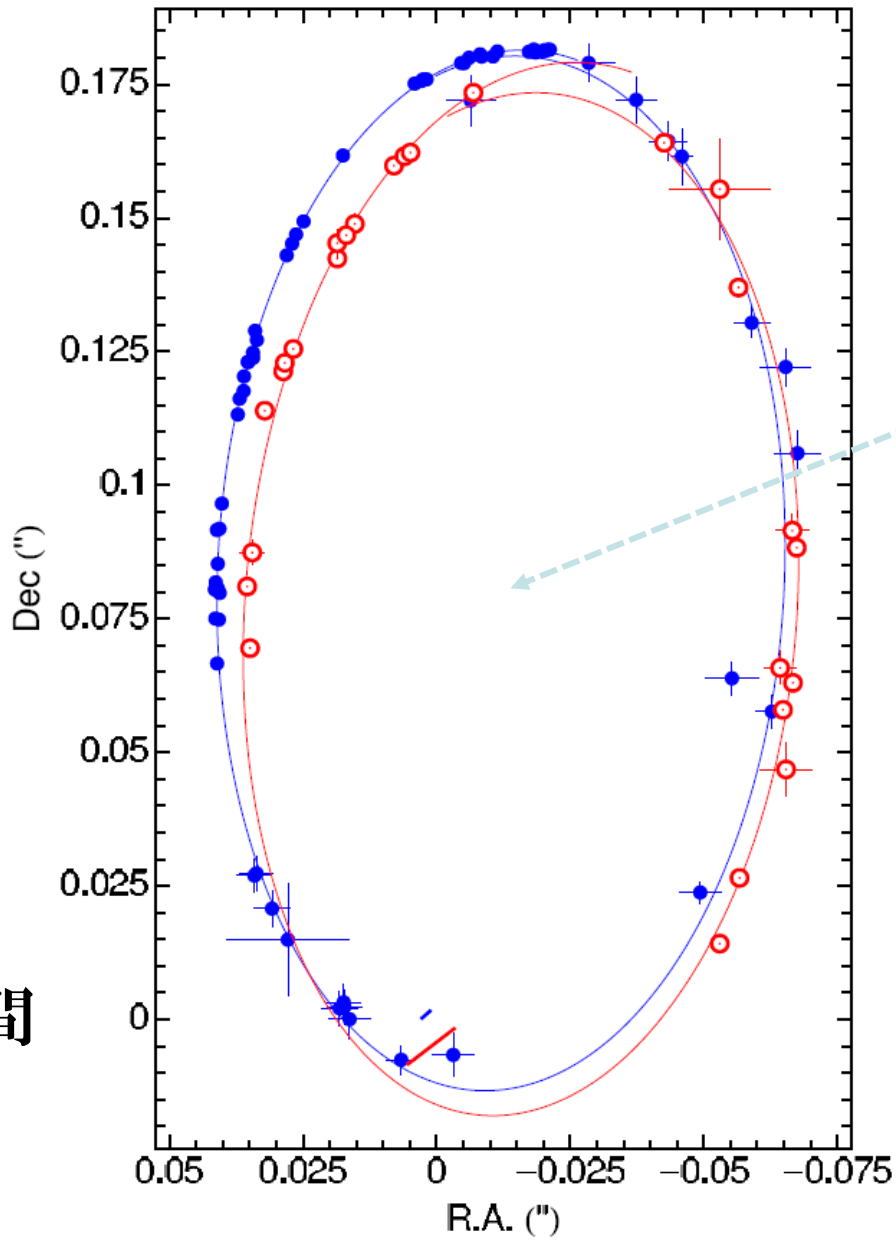
- 銀河系中心のズームアップ
- 銀河中心の星の運動
  (太陽系の大きさ程度の領域の観測結果)
- S2星の運動

http://www.eso.org/public/videos/

我々の銀河系の中心に存在するブラックホール

およそ2千億キロメートル

太陽・地球間の約15倍



質量(見えない)
$4.3 \times 10^6\ M_{Sun}$

Schödel et al. 2003
Eisenhauer et al. 2005
Ghez et al. 2008
Gillessen et al. 2009

3　ブラックホールはどのように誕生するのか？

➢　恒星サイズのブラックホールの場合

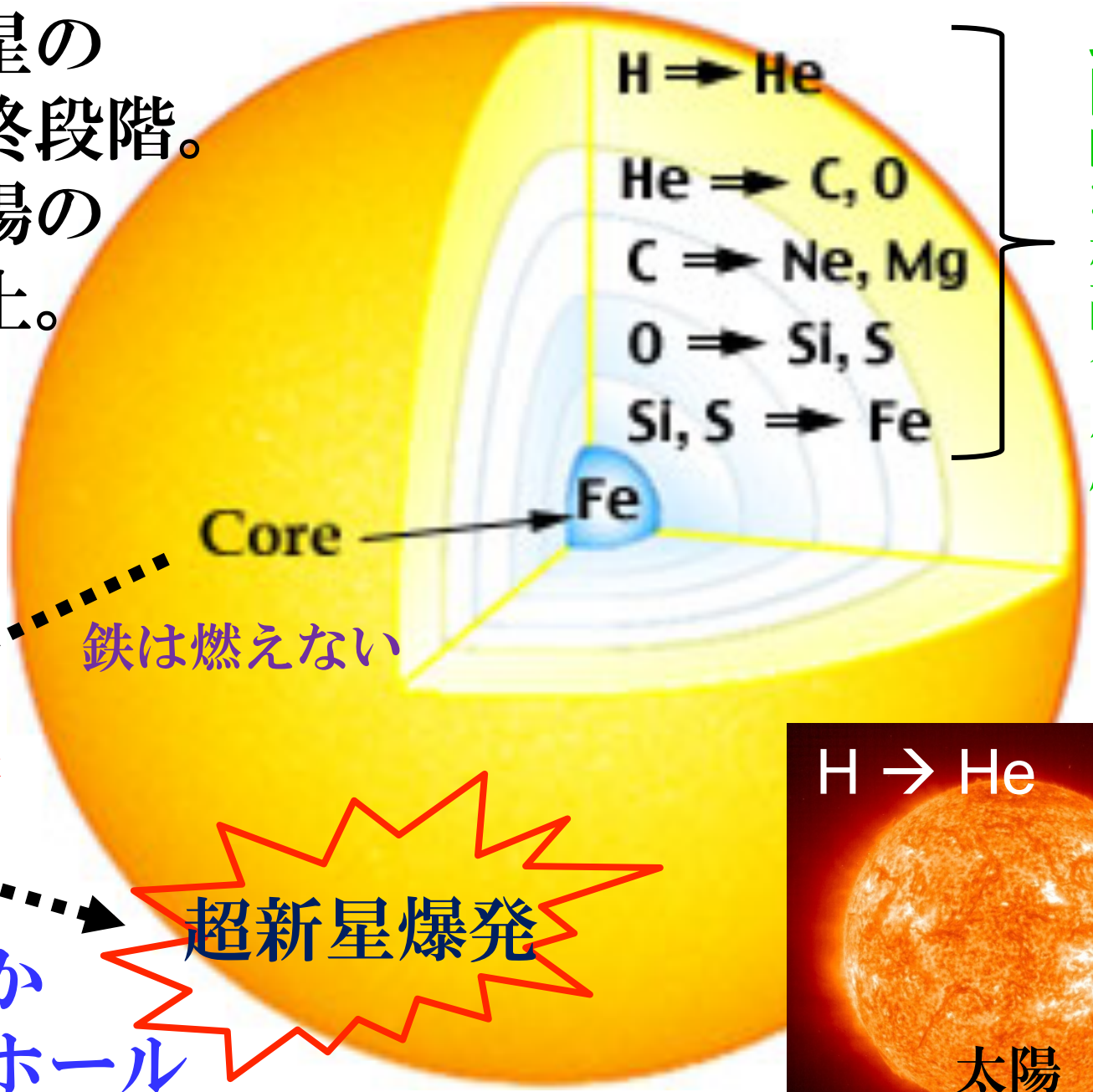
- 恒星進化の最後に誕生するか、あるいは中性子星に何らかの過程で物質が降り積もって誕生する、と推測されている。

➢　超巨大ブラックホールの場合

- よくわかっていない。大雑把な推測しかない。現代宇宙物理学の最大の謎の１つ

■どちらも、誕生過程が観測されたことはない未観測、未知の現象である

大質量恒星の
進化の最終段階。
質量は太陽の
１０倍以上。



段階的な核融合反応

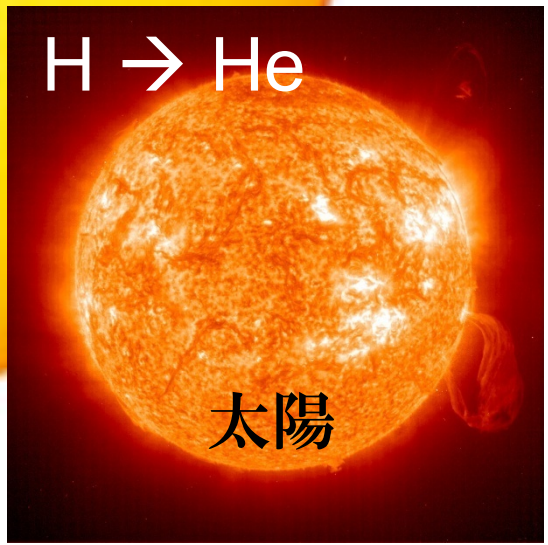
鉄は燃えない

重力崩壊

↓

中性子星か
ブラックホール

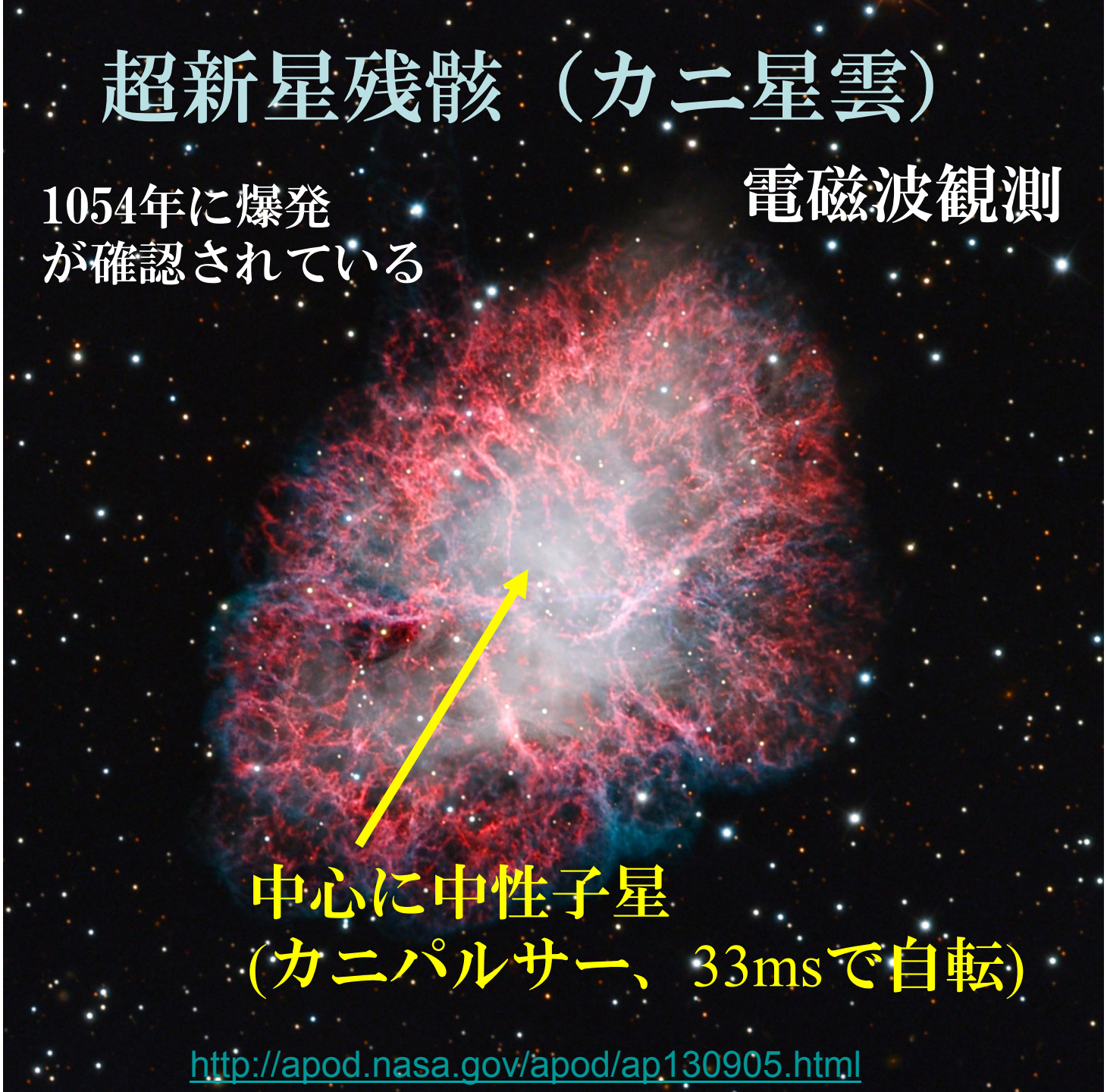
超新星爆発



超新星残骸（カニ星雲）

1054年に爆発
が確認されている

電磁波観測



中心に中性子星
(カニパルサー、33msで自転)

http://apod.nasa.gov/apod/ap130905.html

中性子星連星

想像図

質量は太陽の数倍
⇒　合体すれば最終的には
ブラックホールに（後述）

http://apod.nasa.gov/apod/ap050601.html

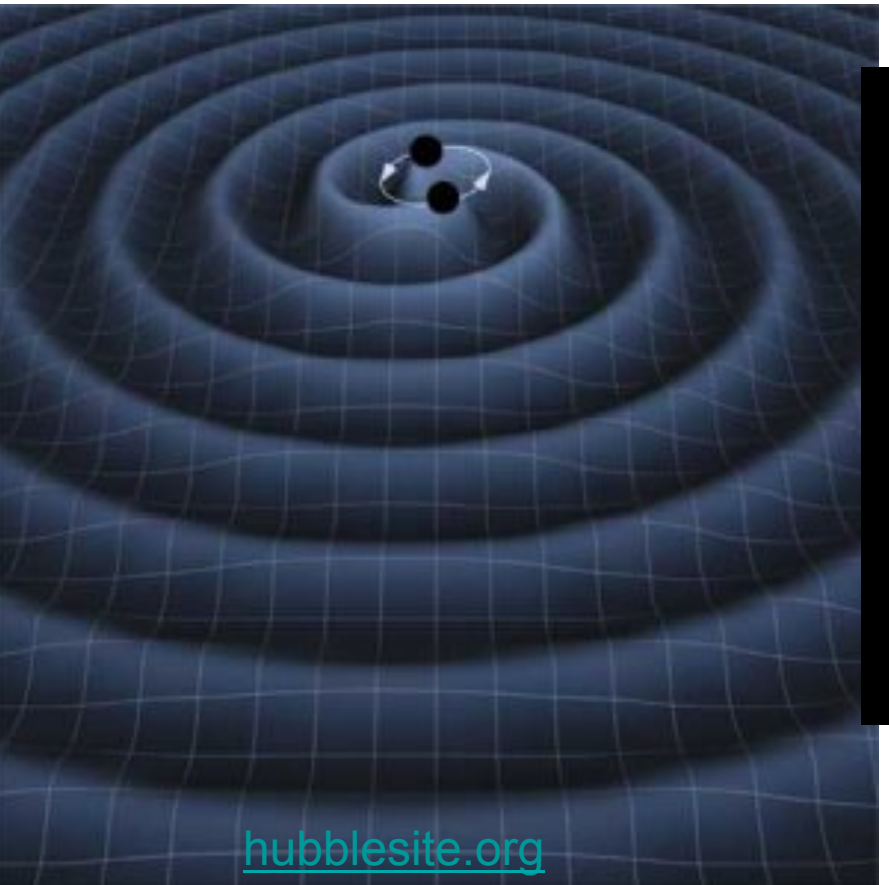
ブラックホールの誕生過程の観測法

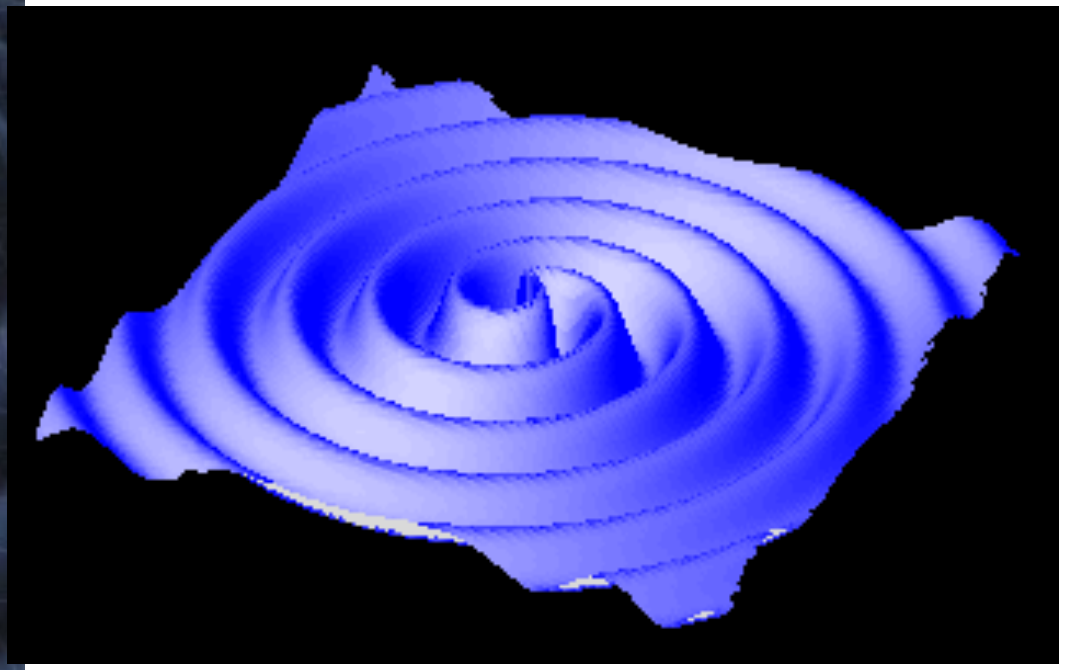
- これまでには観測されたことはない。
  既存の天文観測手段では、非常に難しい。
  → ブラックホールが誕生するような場所は、高密度で光が出てこないから。
- しかしもうすぐ観測されるだろう！
  重力波検出器による観測で

＊ 重力波は物質が高密度に存在しても、
問題なくすり抜けてくることができる

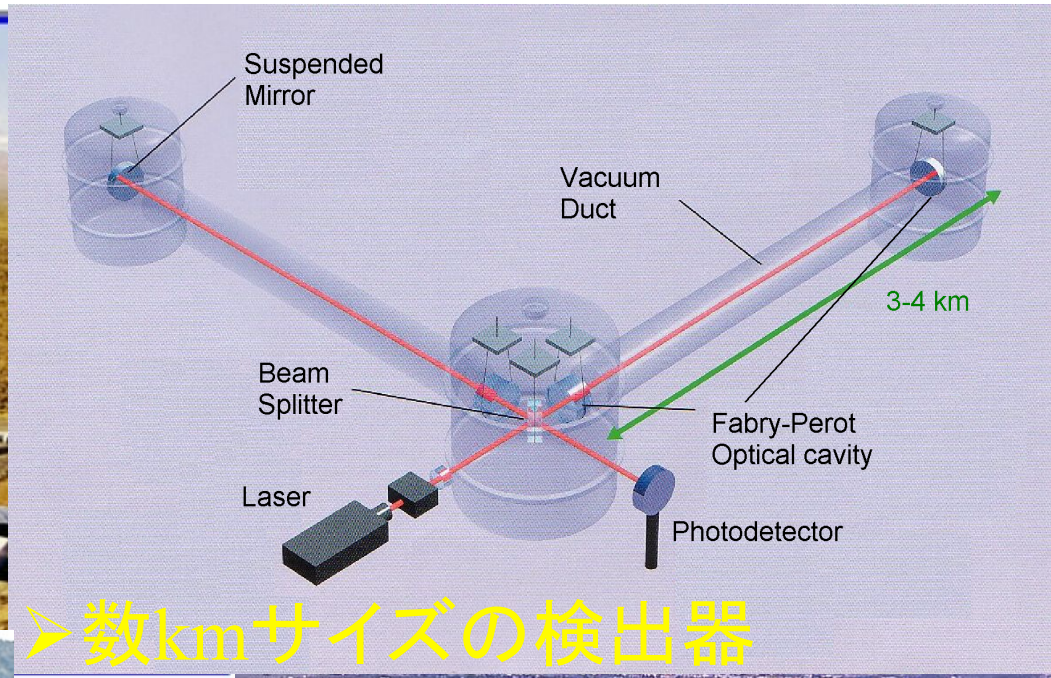
4　重力波で探るブラックホール

- 時空の曲がり具合が変化すると、放射される
- ブラックホールのように時空を大きく曲げている物体が動くと大量に放射される





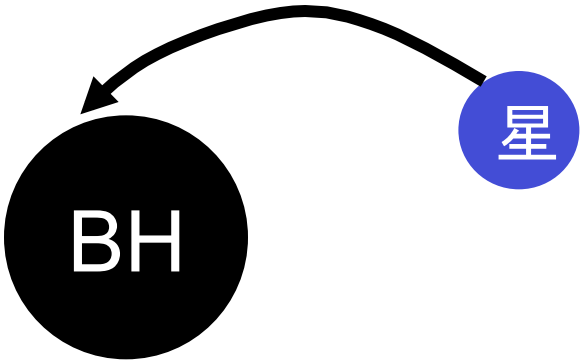
世界の重力波観測装置



- 数kmサイズの検出器
- 2015年頃から本格観測

Inside of Kamioka place

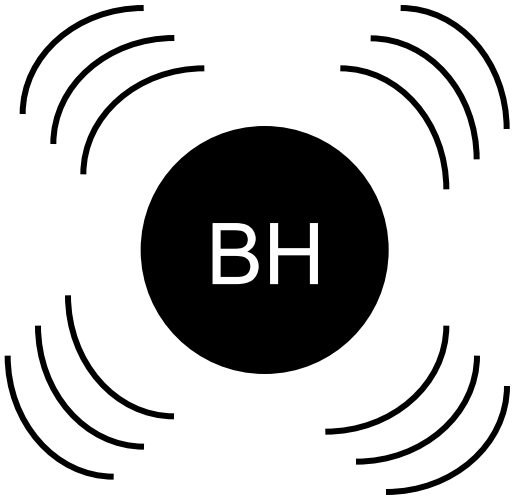
ブラックホールと重力波

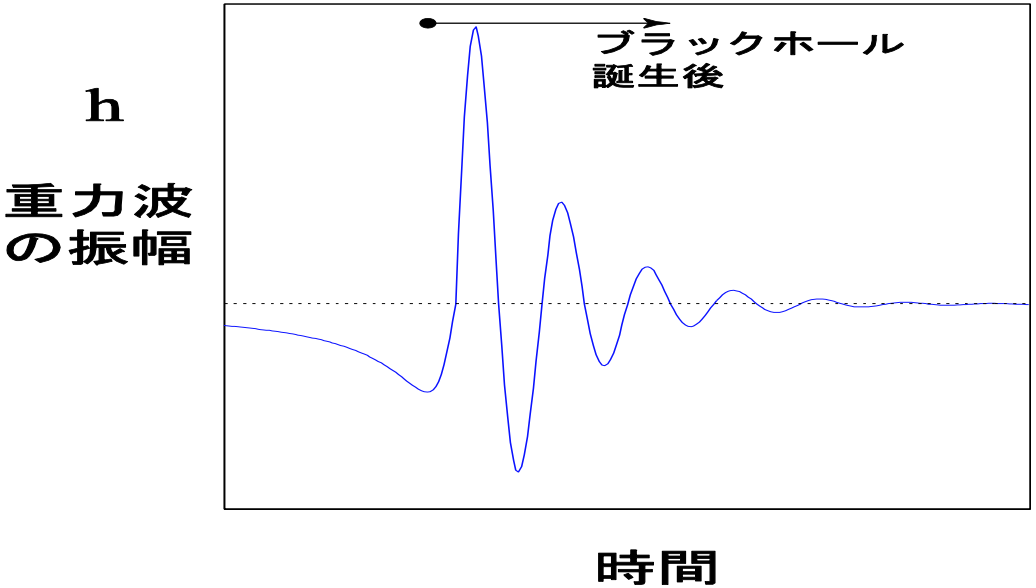


ブラックホールを
刺激する

⬇

ブラックホール近傍から
特有の重力波が発生する



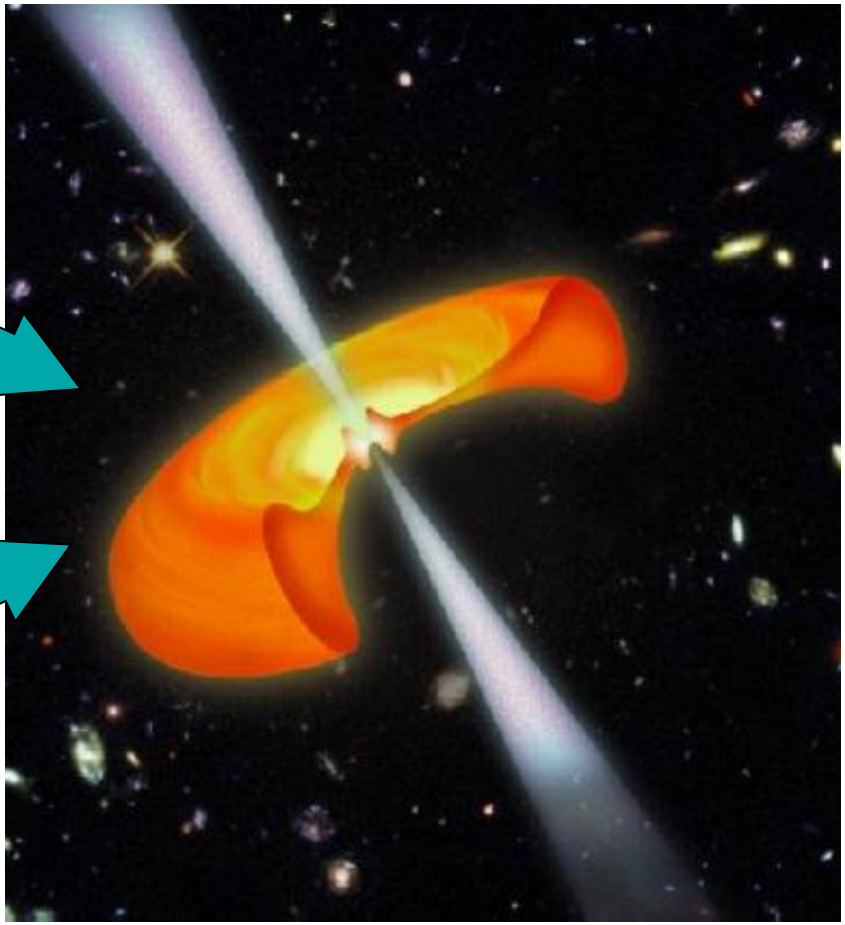


連星中性子星の合体

超新星
＋ブラックホール形成

http://apod.nasa.gov/apod/ap111225.html

www.astro.psu.edu



重力波が放射される。
重力波観測でブラックホール形成現場を観る。

5　ブラックホールを創る

✓　ブラックホールの誕生過程の「推測」を確かめるには理論予想に基づいた観測が必要

✓　重力波の検出に波形予測は必須

➢　ブラックホール＝一般相対論の産物。理論的解明にはアインシュタイン方程式の解を得なくてはならない。

➢　アインシュタイン方程式は大変複雑なので大規模数値計算でのみ解が求められる

→　数値的一般相対論

A　連星中性子星の合体

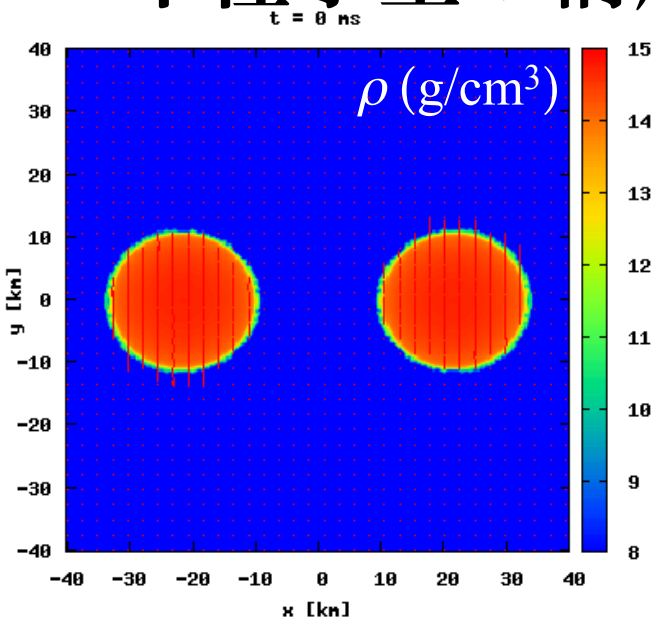
- 1999年、我々日本のグループが初めてシミュレーションに成功。日本の得意分野。
- 合体現象は観測されたことがないが、今後10年以内に観測されそうな楽しみな現象

⇒　シミュレーションにより現象を予言する！

- 重力波、ニュートリノ、ガンマ線～電磁波など多彩な放射が実現しそうである

中性子星の構成要素が異なる場合

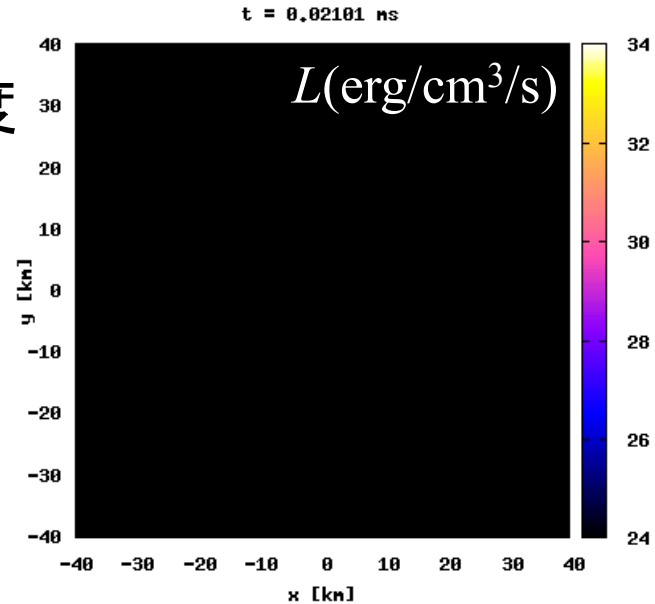
密度



y

x

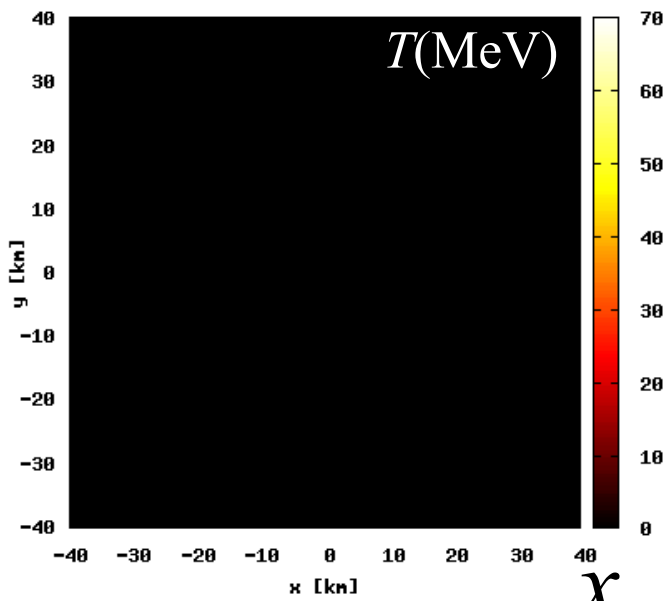
ν光度



y

x

温度



y

x

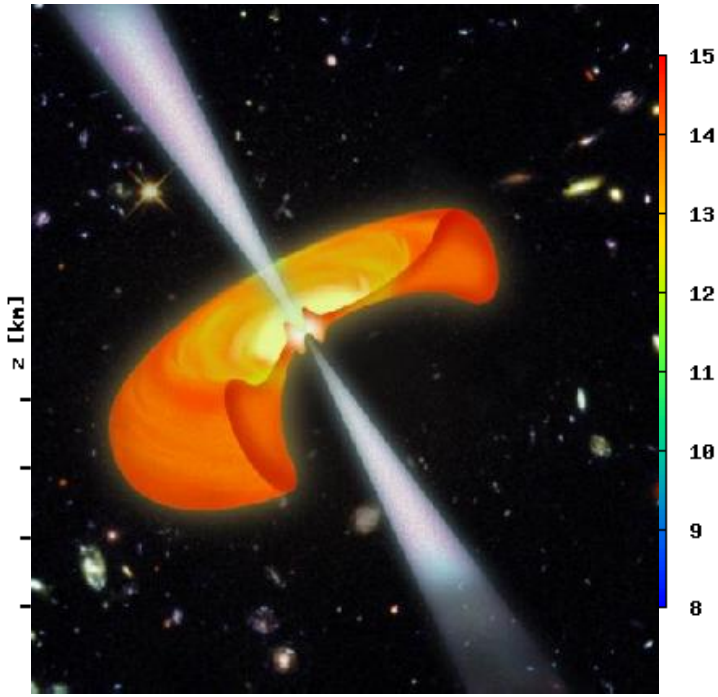
赤道面の
密度
光度
温度
を表示

1.35—1.35太陽質量

x-z面を表示：ブラックホール形成時のみ

密度

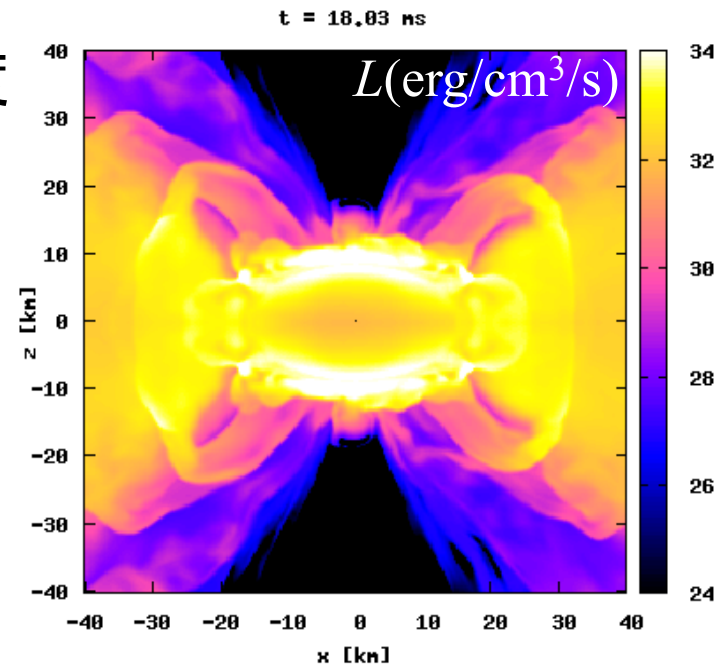
z



x

ν光度

z



x

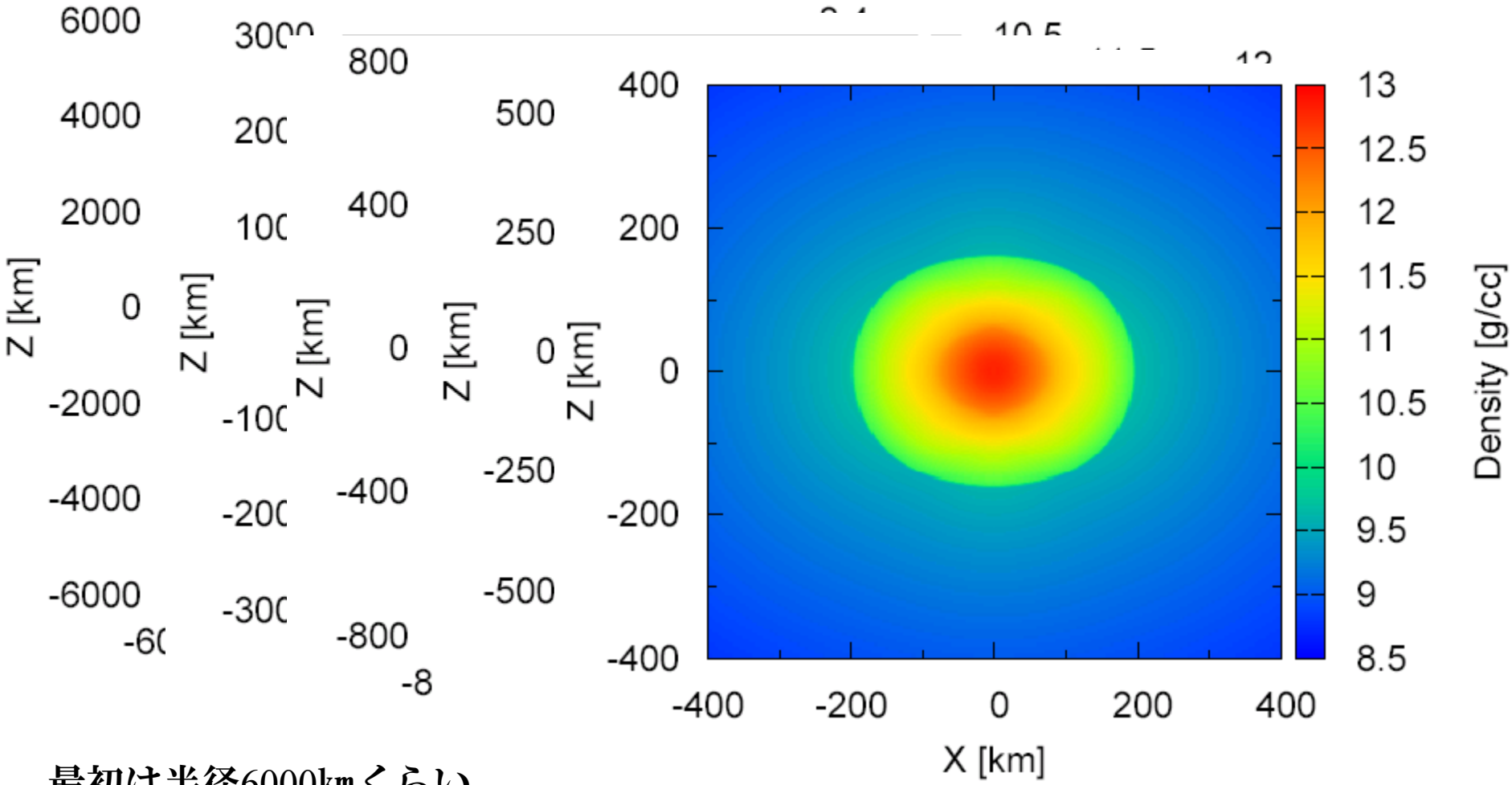
ブラックホール＋円盤が誕生
→　重力波、ジェット、ニュートリノなど
が大量に放射する

B　重力崩壊によるブラックホールの形成

関口雄一郎（京大基礎研）の計算

- 大質量星の重力崩壊：
  初期質量100太陽質量程度
- 初期条件＝星の進化理論モデルに基づく
- 一般相対論、原子核物理、ニュートリノ物理など全てを考慮した世界最先端の計算

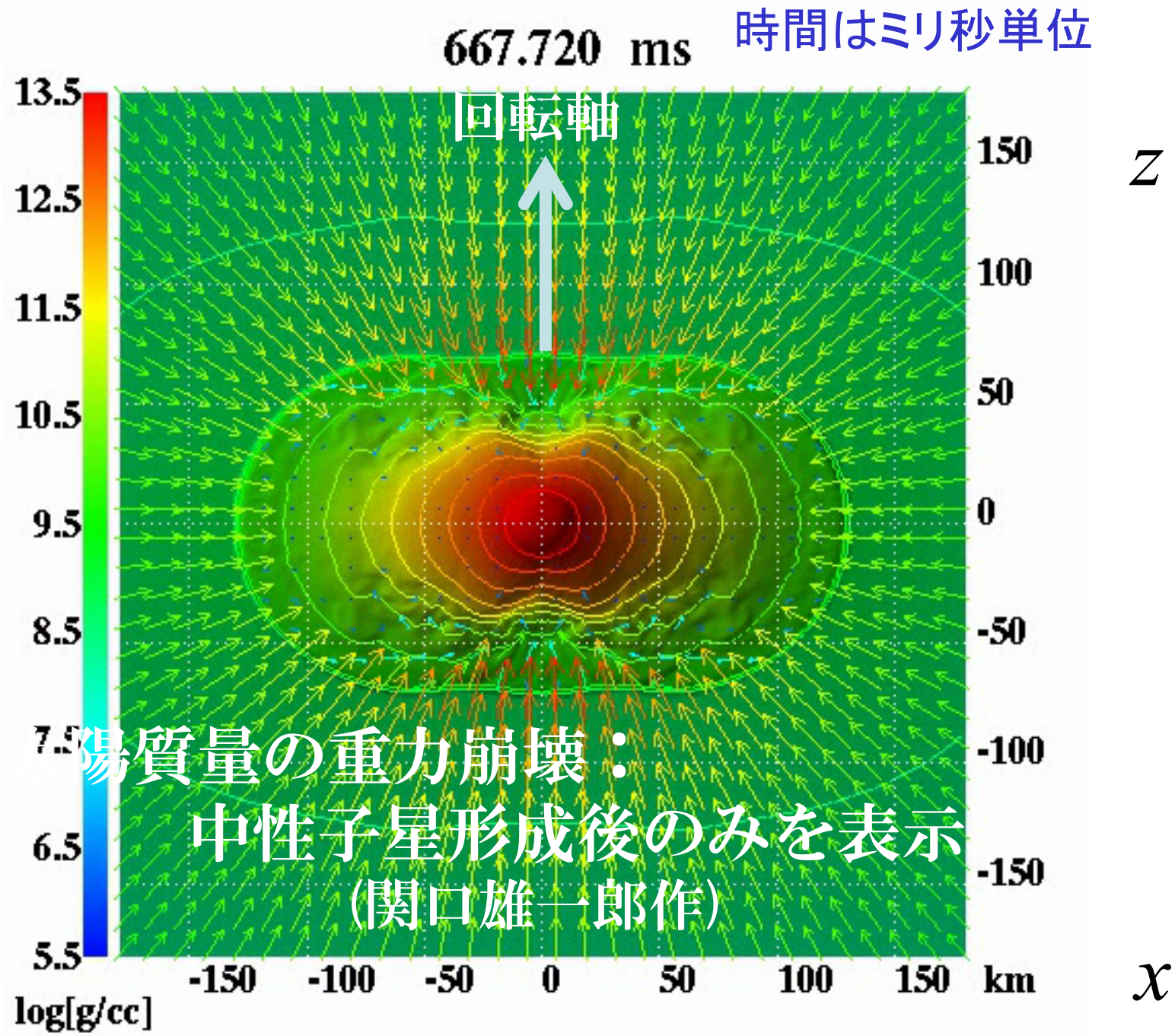
大質量星中心部の重力崩壊初期



最初は半径6000㎞くらい
地球半径とほぼ同じ

徐々に収縮

この頃に、原始中性子星が誕生。
半径は30㎞程度


667.720 ms
時間はミリ秒単位
回転軸
13.5
12.5
11.5
10.5
9.5
8.5
7.5
6.5
5.5
log[g/cc]
-150
-100
-50
0
50
100
150
km
z
x
場質量の重力崩壊：
中性子星形成後のみを表示
(関口雄一郎作)

京コンピュータ

大規模観測・実験には、巨大コンピュータも不可欠 → 京でさらなる成果が出つつある

まとめ

- 先人の努力の結果、ブラックホールの存在が明らかになってきた。
- ただし、その誕生の瞬間は未観測の現象
- 重力波による観測で、近い将来誕生過程を知ることができるであろう
- それには予言が必要　⇒　数値的一般相対論
- 数値的一般相対論＋重力波検出器の活躍で未知の宇宙現象が解明され、新たな知見が得られるだろう

終わり