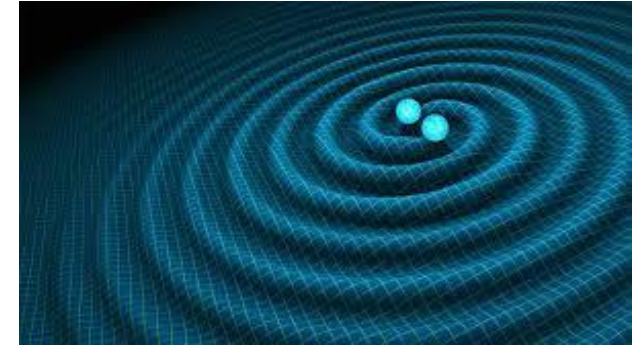


連星進化と重力波源 ～Kickが合体に及ぼす影響～

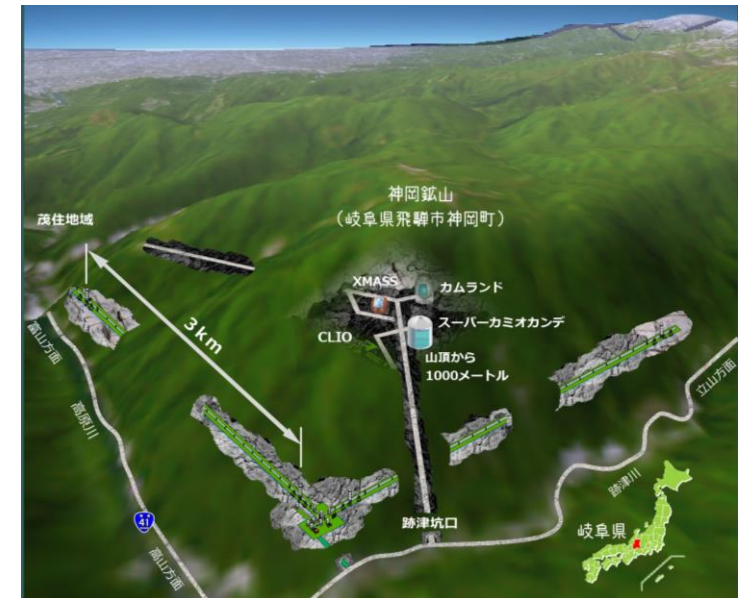
信州大学 工学部

B4 瀧本大芽

重力波とは



- 質量をもった物体が加速度運動をした時に発する波のこと。
- 2015年にアメリカの地上重力波検出器計画 LIGO により初めて直接観測された。LIGO の他にもイタリアのVirgo、日本のKAGRAが挙げられる。



KAGRA望遠鏡

[重力波について - KAGRA 大型低温重力波望遠鏡](#)

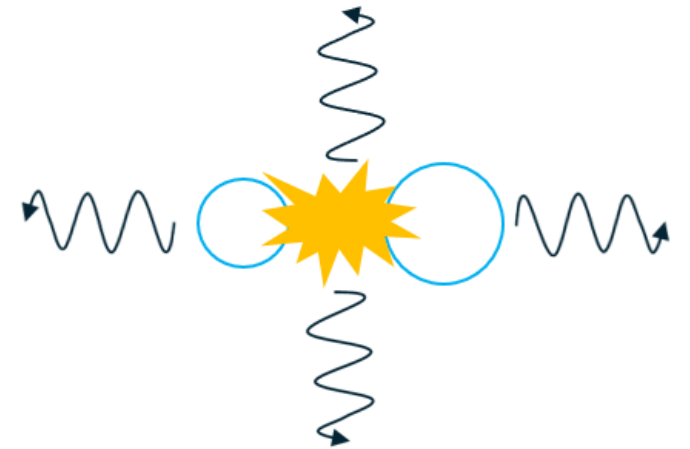
重力波源

- NS-BH(中性子星とブラックホールの連星)
NS-NS(中性子星連星)は重力が極めて大きい

コンパクト連星



近づきながら(合体時に)重力波を発する



重力波源として期待大



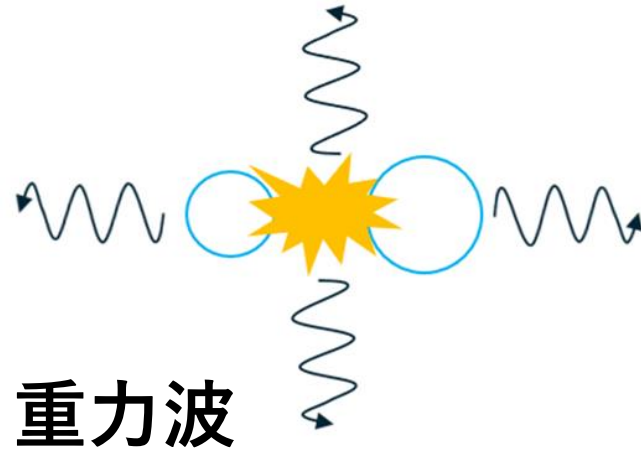
中性子星連星
の進化(合体)を調べる

中性子星：NS（恒星の進化の果て）



- 中性子の縮退圧によって支えられている天体。大質量星が超新星爆発を起こした後にできる。内部構造などについては分かっていない。

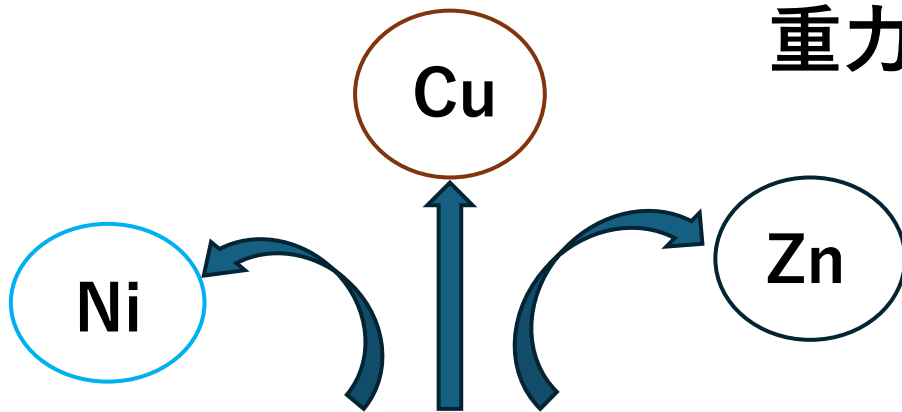
中性子星合体による影響



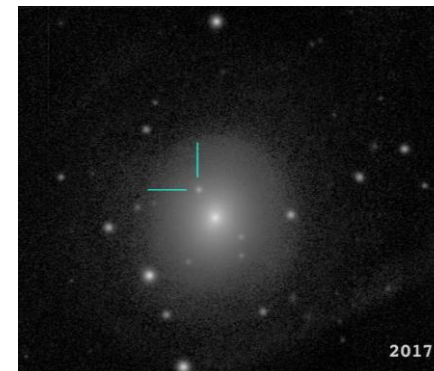
重力波



ショートガンマ線バースト



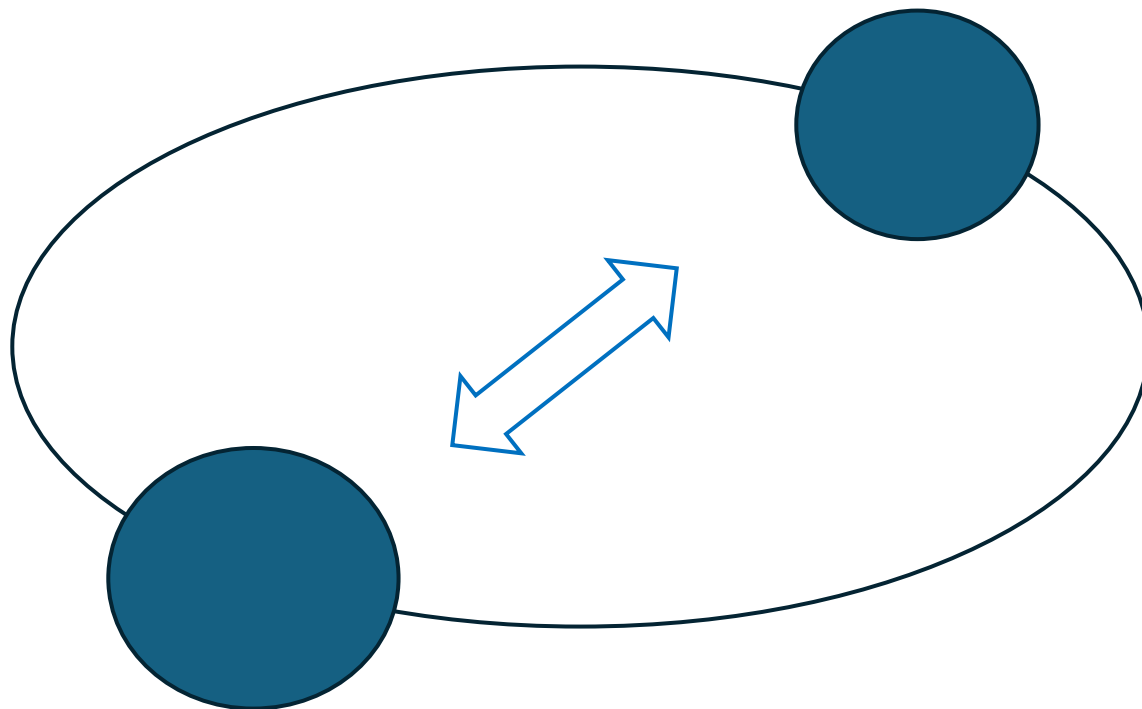
鉄より重い元素の生成
(R過程)



キロノヴァ

Credit: ESO/J.D. Lyman, A.J. Levan, N.R. Tanvir

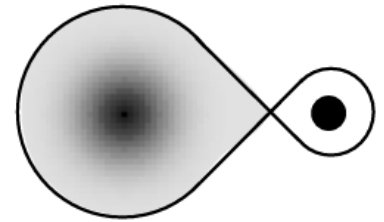
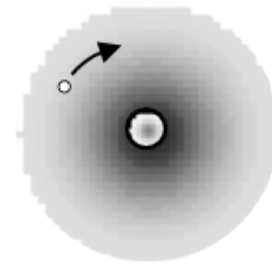
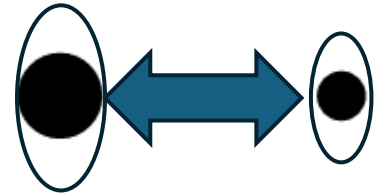
連星相互作用



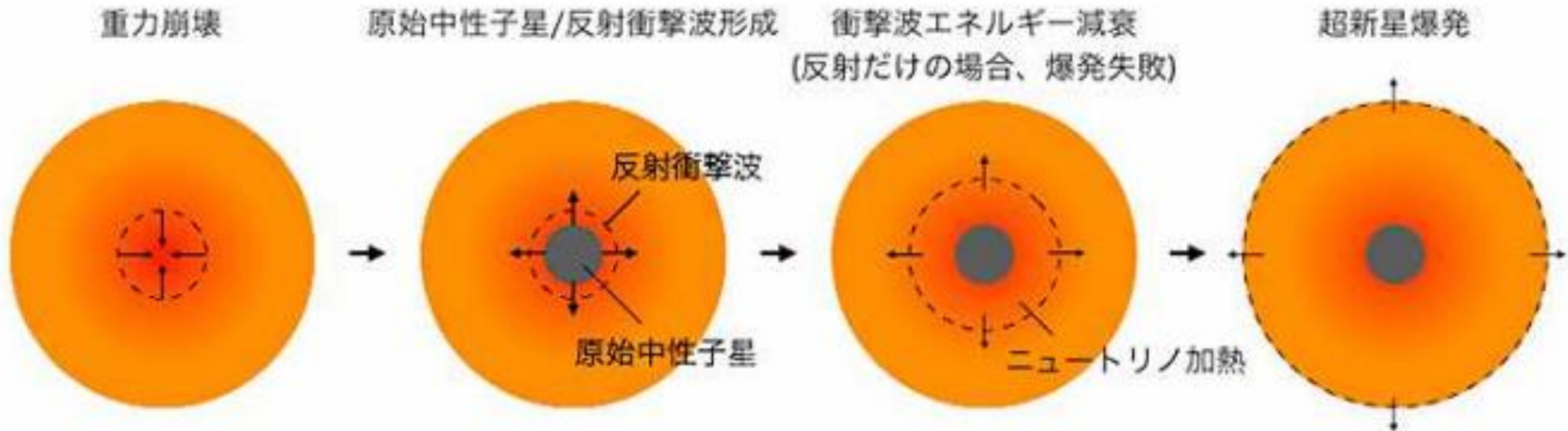
連星は互いに影響し合っている

連星相互作用

- Tidal evolution(潮汐相互作用)
- Common envelope (共通外層)
- Mass transfer (質量交換)
- Supernova effect (超新星爆發)



超新星爆発とは（II型超新星）



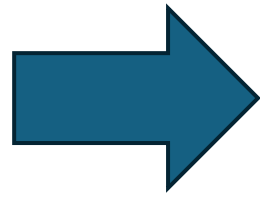
中心にできる硬い物質 (中性子星) で落下物が跳ね返る ⇒ 外側へ衝撃波

明治大学, コンパクト天体の形成と重力崩壊型超新星爆発

<https://www.isc.meiji.ac.jp/~toshiki/pdf/typeecc.pdf>, (2025,2,3)

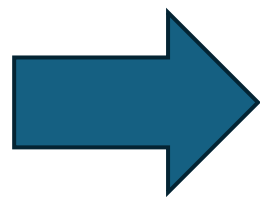
超新星爆発後、連星系はどうなるのか

1. 質量の損失による重力の低下



パチンコ効果

2. 爆発で誕生した中性子星がもつ固有の速度



パルサーキック
(pulsar kick)

(以後、Kickとする)

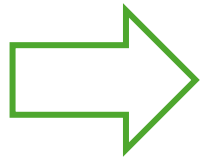
質量損失による重力低下（パチンコ効果）

超新星爆発によって質量の損失、重力の減少

$$\text{重力} : F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

大きく減少

(G:重力定数, M_1 :主星の質量, M_2 :伴星の質量, r:主星と伴星間の距離)



重力が低下し、軌道が広がる

- ・ 連星系の崩壊条件は？

エネルギー保存則から

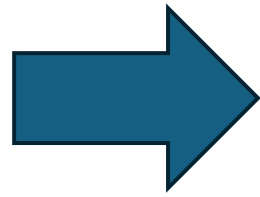
$$\frac{M'_{total}}{M_{total}} < \frac{1}{2} \quad \text{が導かれる}$$



半分以上の質量が損失すると連星系が崩壊

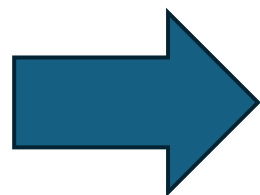
超新星爆発後、連星系はどうなるのか

1. 質量の損失による重力の低下



パチンコ効果

2. 爆発で誕生した中性子星がもつ固有の速度

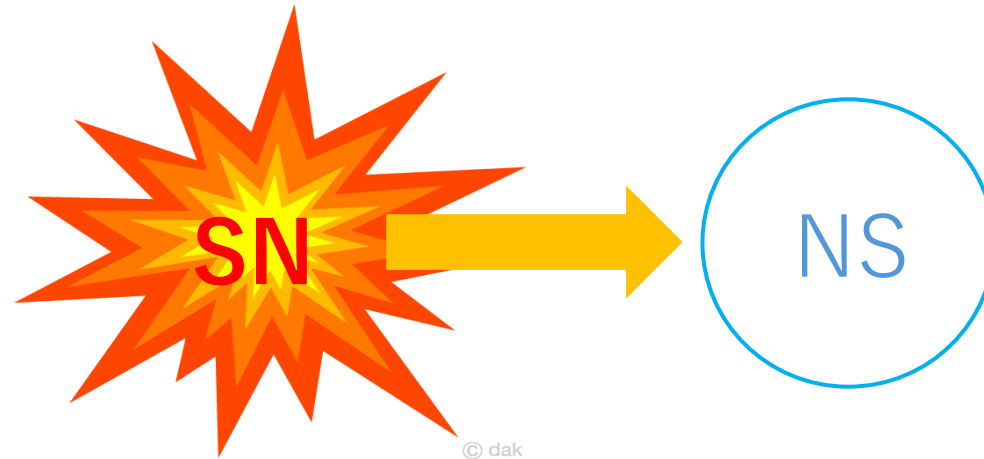


パルサーキック
(pulsar kick)

(以後、Kickとする)

Kickとは

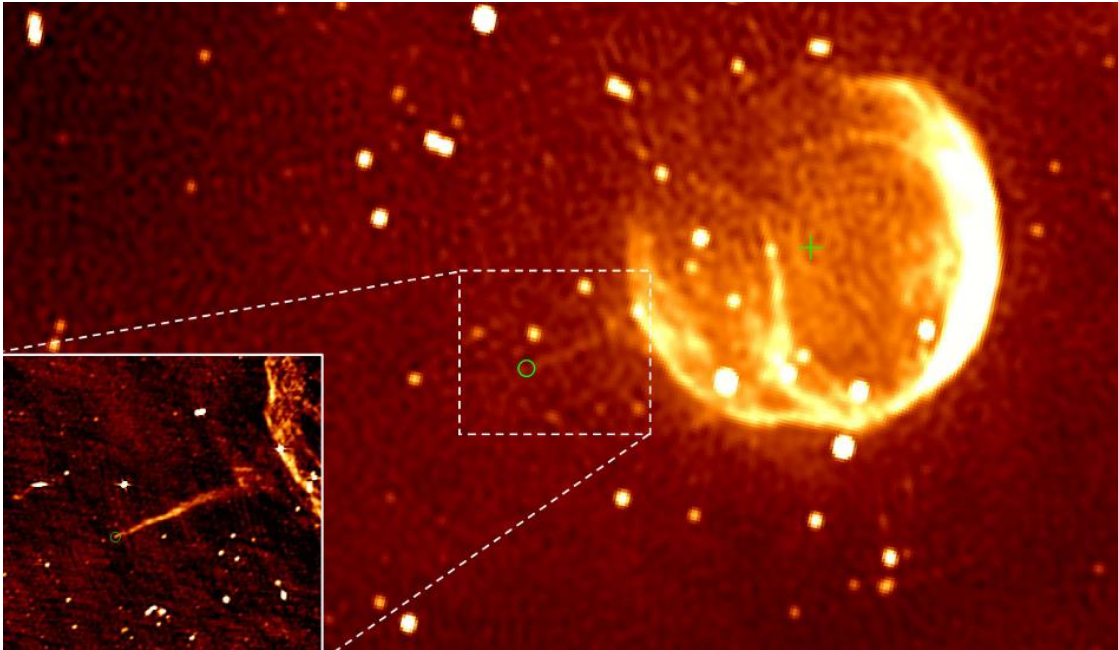
→ 星が超新星爆発を起こした後、中心にある天体がその反動で受ける速度のこと。



Kickが連星系の合体に与える影響を調べる。

Kickが見つかった経緯

- ・ Gunn&Ostrikerの研究 (1970)



図：パルサー (J0002+6216)

After Scinzel et al (2019)

パルサーとその前駆天体の
分布を比較



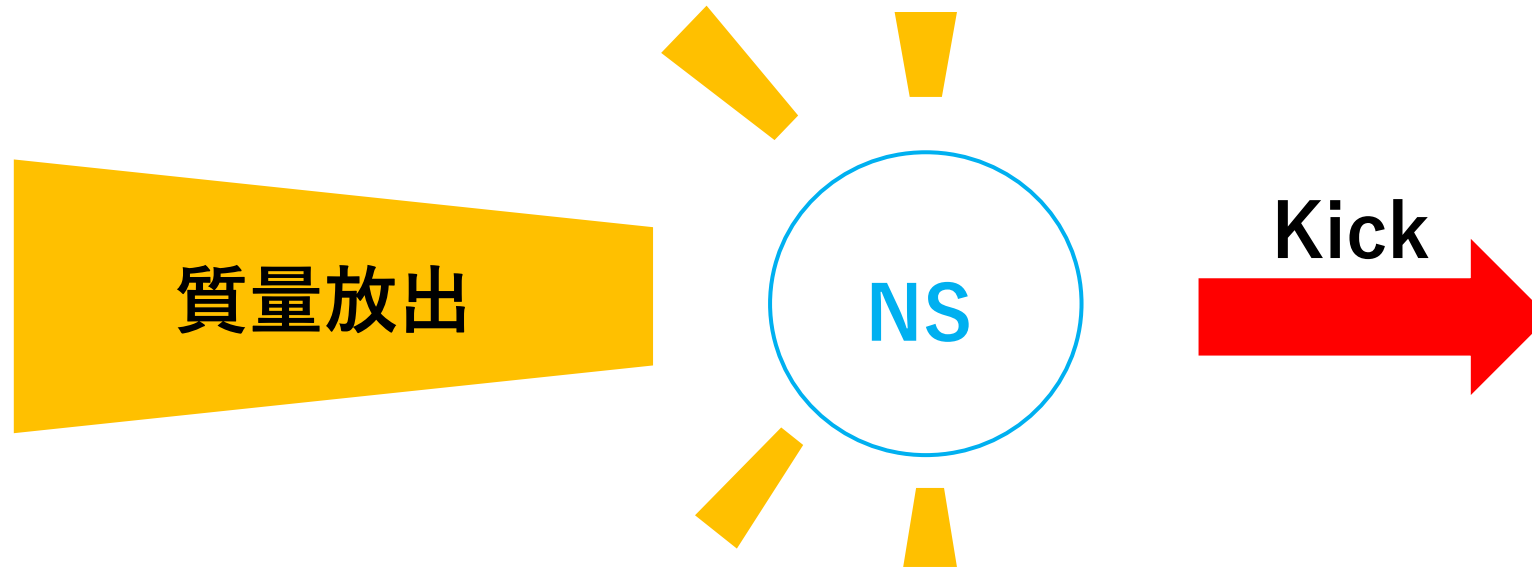
パルサーの方が広範囲に分
布していた



前駆天体よりも大きな速度
を持っている

Kickはなぜ起こる？

- ・ 超新星爆発の非対称性による反作用である



Kickの大きさは観測により200～500km/sと言われている。

Kickの向きはランダムに決まる(明確な要因は未だ分かっていない)。

- kickが連星系を崩壊させる条件

エネルギー保存より、

爆発後の全エネルギーが正になると連星系が崩壊

$$\frac{1}{2}M_1'v'^2 - \frac{GM_1'M_2}{a} > 0$$

$\langle = \rangle$

$$v' > \sqrt{\frac{2GM_2}{a}}$$

手法：連星進化計算

- **モンテカルロ法を用いた連星進化計算**

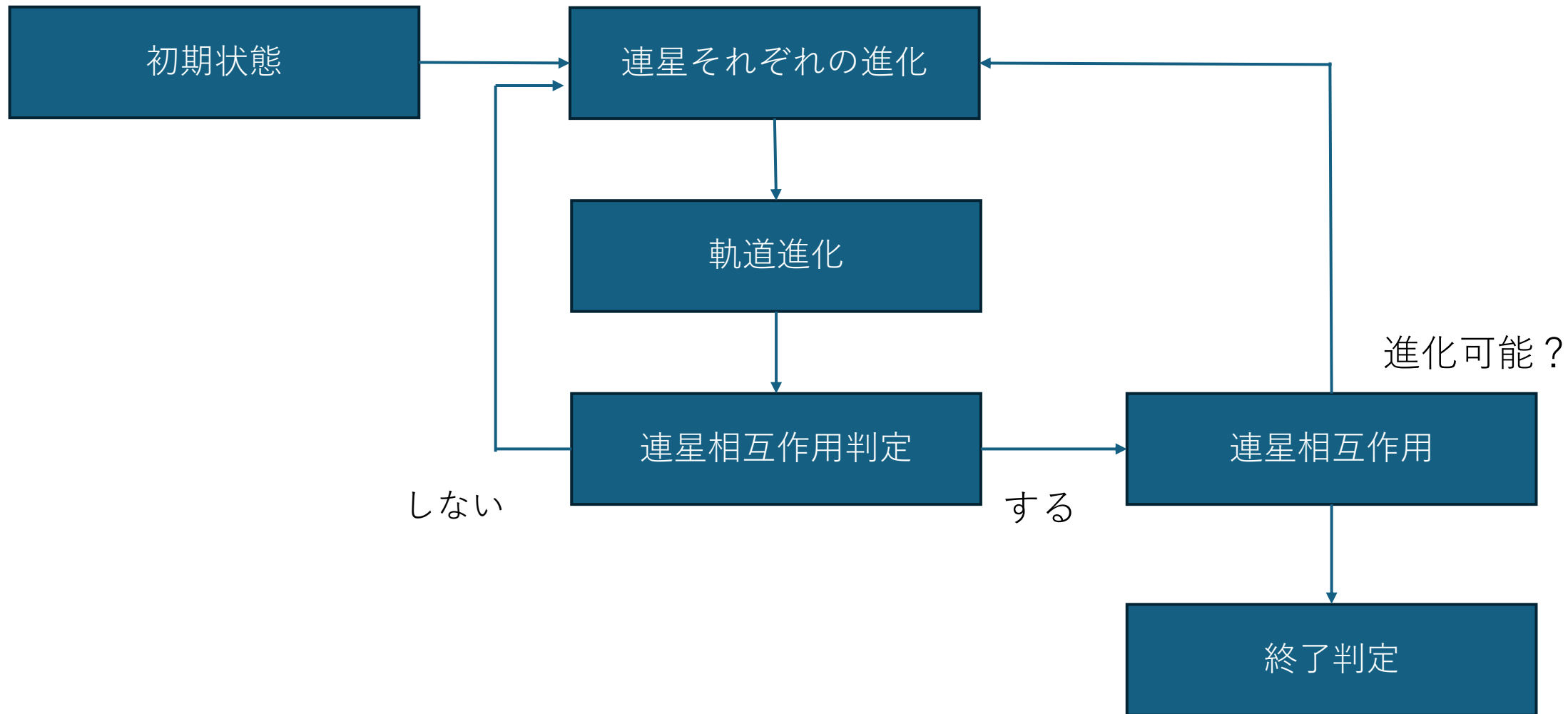
初期条件を確率分布に従って生成

進化を確率的に分岐させる

- **既存の連星進化コードを利用**

(Hurley, J. R., Tout, C. A., & Pols, O. R. 2002, MNRAS, 329, 897)

フローチャート



初期値の設定

- 主星と伴星の初期質量 M_1, M_2
- 軌道離心率 e , 軌道長半径 a
- 金属量 $Z=0.02$
- 質量移動効率 $\beta = 0$, 共通外層進化効率 $\alpha\lambda=1$
- $Kick = 0, 250, 500 \left[\frac{km}{s} \right]$

結果 1

表1 コンパクト連星の個数

kick[km/s]	NSBH	NSNS
0	2415	2931
250	12	86
500	2	28

表2 合体個数

kick[km/s]	NSBH	NSNS
0	0	346
250	3	79
500	0	26

表3 合体割合

kick[km/s]	NSBH[%]	NSNS[%]
0	0	12
250	25	92
500	0	93

- ・ Kickを与えることによって、コンパクト連星の数が大きく減った
- ・ Kick有りでコンパクト連星になった個体のほとんどは合体

結果 2

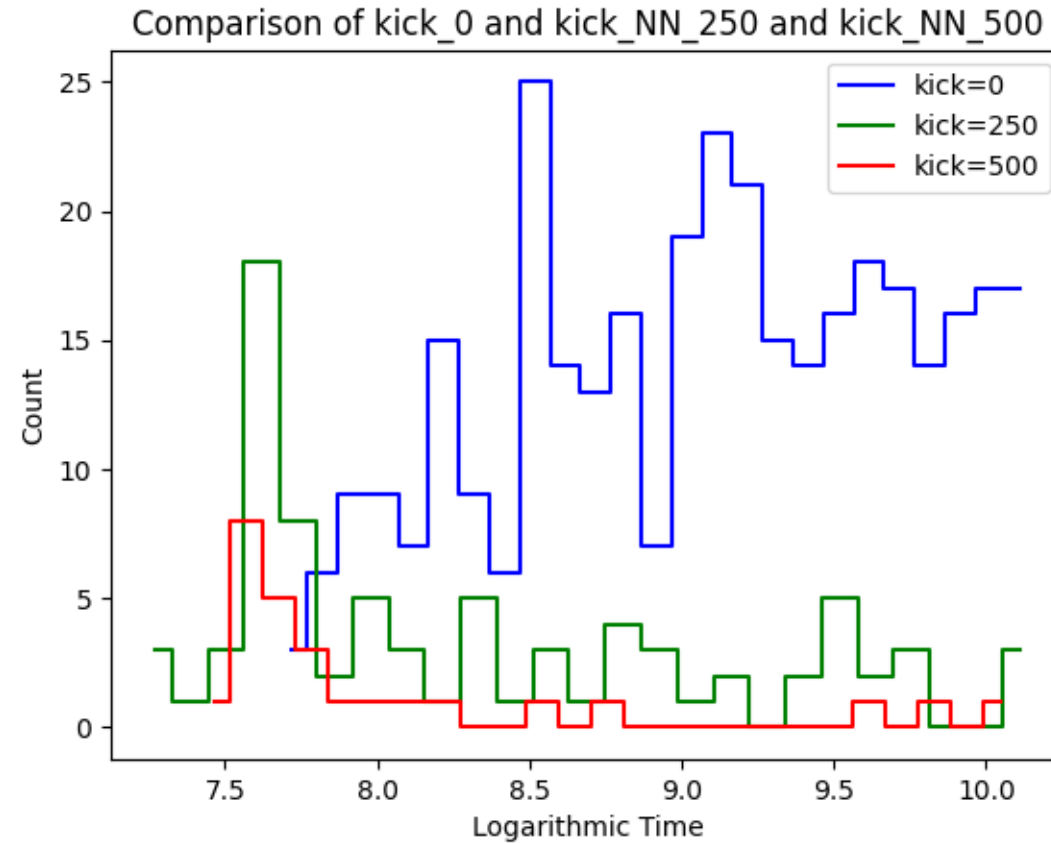


図1 合体時間の分布

- ・ Kickがあると、合体時間が短いものが多い

考察①

- Kickが 0 [km/s]のとき = 形成個数 大
合体個数 大
ただし、合体割合は低い(12%)
- 超新星爆発の影響が爆発による質量損失だけとなり、束縛エネルギーが減少することによって、連星系が解体してしまうか宇宙年齢以内に合体しない可能性が高い。しかし、合体した個数だけで見ると一番多くなっている。

考察②

Kickがある(kick=250,500[km/s])とき

- **NS連星の数が大きく減った**
 - Kickにより、多くの連星系で軌道速度が脱出速度を超えてしまい解体する。
- **合体割合がとても高い(92%,93%)**
 - NS連星として残ったものの多くは、Kickが軌道速度を弱める方向に働いたと考えられる。それにより軌道が小さくなり、合体する確率が高くなると同時に、合体までの時間が短くなっている。

まとめ

- 中性子星連星の合体に観測できる重力波を調べるために、Kickが合体に与える影響を考慮した連星進化の数値計算を行い、中性子星連星の合体個数と割合を求めた。
- Kickが加わると連星系は解体しやすいが、連星系を維持したものは合体しやすく、合体時間も短くなる

今後の展望

- 重力波の観測において、銀河内のどこで連星合体が起こったかという情報は重要なため、Kickを用いて連星の固有速度を調べていきたい。
- 各連星の個体ごとに進化の仕方によってKickの大きさや向きを決められるようにしたい。