

連星周りのガス円盤の長時間進化

-永年摂動を使った解析解-

今枝 佑輔

神戸大学自然

花輪 知幸

千葉大先進

犬塚 修一郎

京大理

小久保 英一郎

国立天文台理論

話の内容

どんな状況を考えているか？

円盤進化に伴う様々なタイムスケール -長時間進化とは？-

連星の周りのテスト粒子の軌道進化

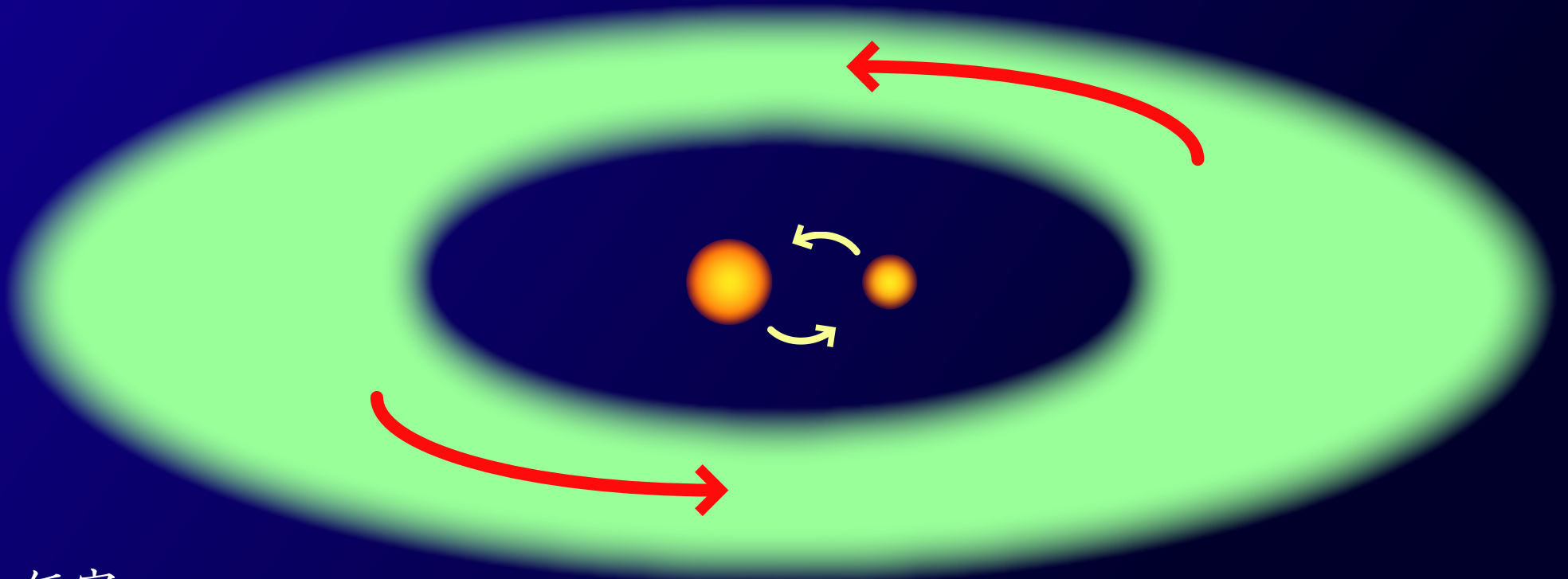
連星周りのガス円盤の軌道進化

まとめ

状況設定

連星の周りをまわるガス円盤が長時間にわたってどのような時間進化をたどるかを知りたい。

密度？速度？



仮定

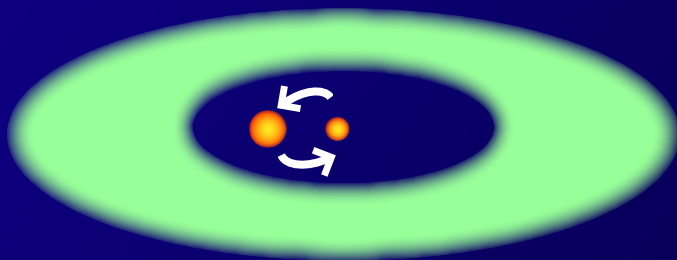
円盤は連星に比べて十分軽い

円盤は幾何学的に薄い (運動エネルギーに比べて熱エネルギーが小さい)

円盤運動に存在する 様々なタイムスケール

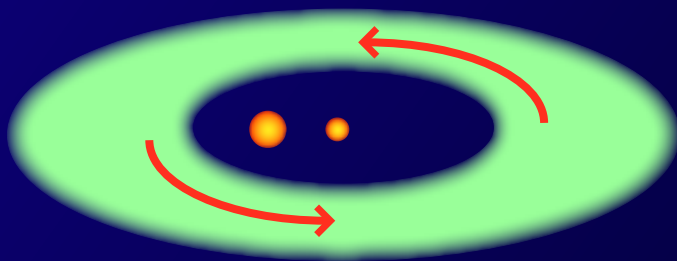
長時間進化

連星が公転するタイムスケール



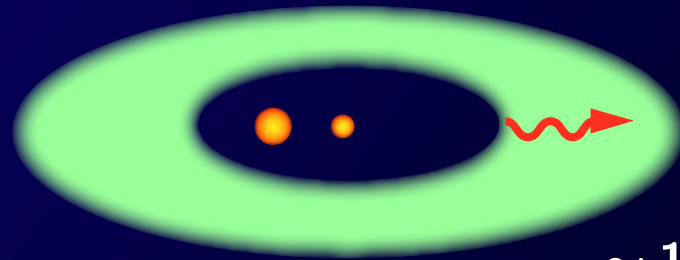
連星間距離が数十AUだと $\sim 10^2$ 年

ガス円盤が公転するタイムスケール



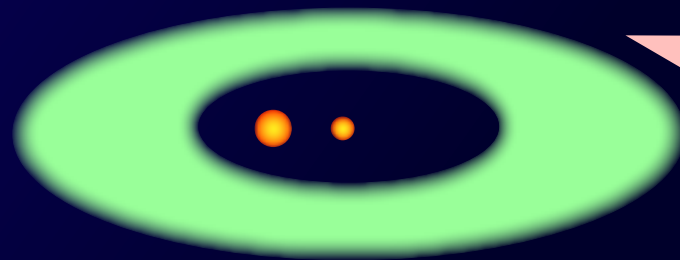
$\sim 10^3$ 年

音波が伝わる時間



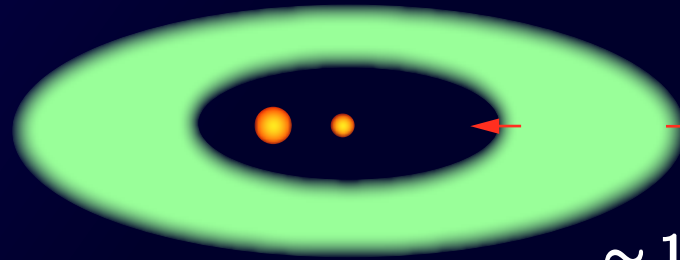
$\sim 10^4 \sim 5$ 年

歳差運動の時間



$\sim 10^5 \sim 6$ 年

粘性進化の時間

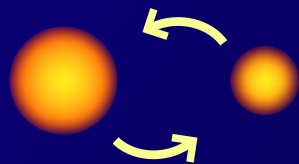


$\sim 10^6 \sim 7$ 年

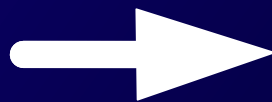
短時間平均した軌道進化の方程式

連星が $\sim 10^3$ 回転もする時間進化を数値的に直接時間積分するのは困難

短時間については時間平均して進化を考える



時間変動する連星ポテンシャル



リングポテンシャル

流体素片の運動方程式



流体素片が連星の周りを1周回る間に軌道がどの程度変化するか？
軌道進化の方程式

ガス1回転あたりの Δe など

ガス円盤の長時間進化を考える前に、、、まず

連星周りのテスト粒子の 軌道進化を調べる

$$\text{連星重力} = -\frac{G(M_1 + M_2)}{r^3}\vec{r} + \vec{F}'$$

連星であることの効果を摂動力として取り扱って
摂動計算を行う

テスト粒子の長時間軌道進化

$$h \equiv e \sin \omega$$

$$k \equiv e \cos \omega$$

として

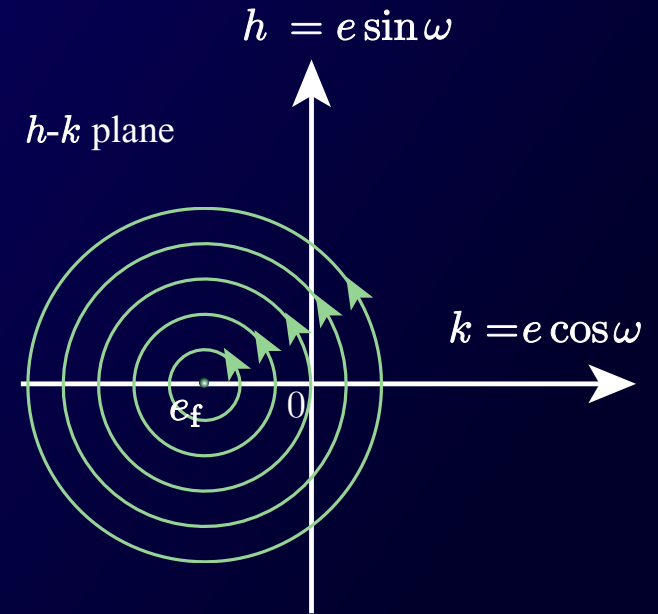
$$\left\langle \frac{da}{dt} \right\rangle_G = 0$$

$$k = C \cos(At) - e_f$$

$$\left\langle \frac{dh}{dt} \right\rangle_G = Ak + B \longrightarrow h = C \sin(At)$$

$$\left\langle \frac{dk}{dt} \right\rangle_G = -Ah$$

$$e_f = \frac{5}{4}(q_1 - q_2) \left(\frac{a_B}{a} \right) \frac{\left(1 + \frac{3}{4}e_B^2 \right)}{\left(1 + \frac{3}{2}e_B^2 \right)} e_B$$

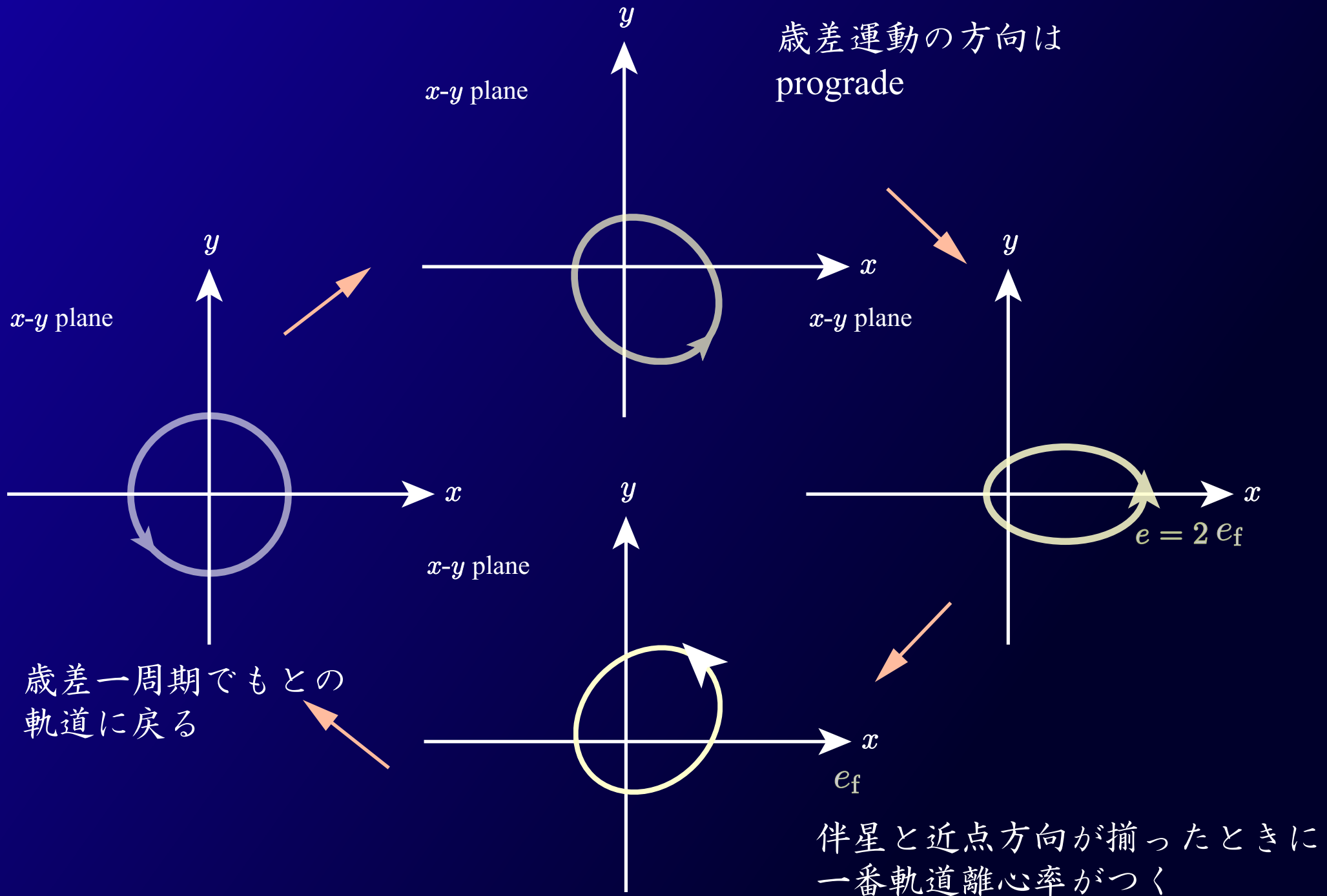


強制離心率 $(-e_f, 0)$ の周りを初期値に応じて単振動する時間進化

$$A \equiv \frac{3}{4} q_1 q_2 \left(\frac{a_B}{a} \right)^2 \left(1 + \frac{3}{2} e_B^2 \right) \Omega$$

$$B \equiv \frac{15}{16} q_1 q_2 (q_1 - q_2) \left(\frac{a_B}{a} \right)^3 \left(1 + \frac{3}{4} e_B^2 \right) e_B \Omega$$

実際の軌道で描くと



The role of each perturbation potential

定常な $m=0$ の摂動は近点方向を precession させる。

$$m=0 \quad \Phi_{2,0} = -\frac{1}{4} \frac{GM}{a_B} q_1 q_2 \left(\frac{a_B}{r}\right)^3 \left(1 + \frac{3}{2} e_B^2\right) < 0$$

摂動がなければ流体素片はケプラー運動をする。

$$\kappa = \Omega$$

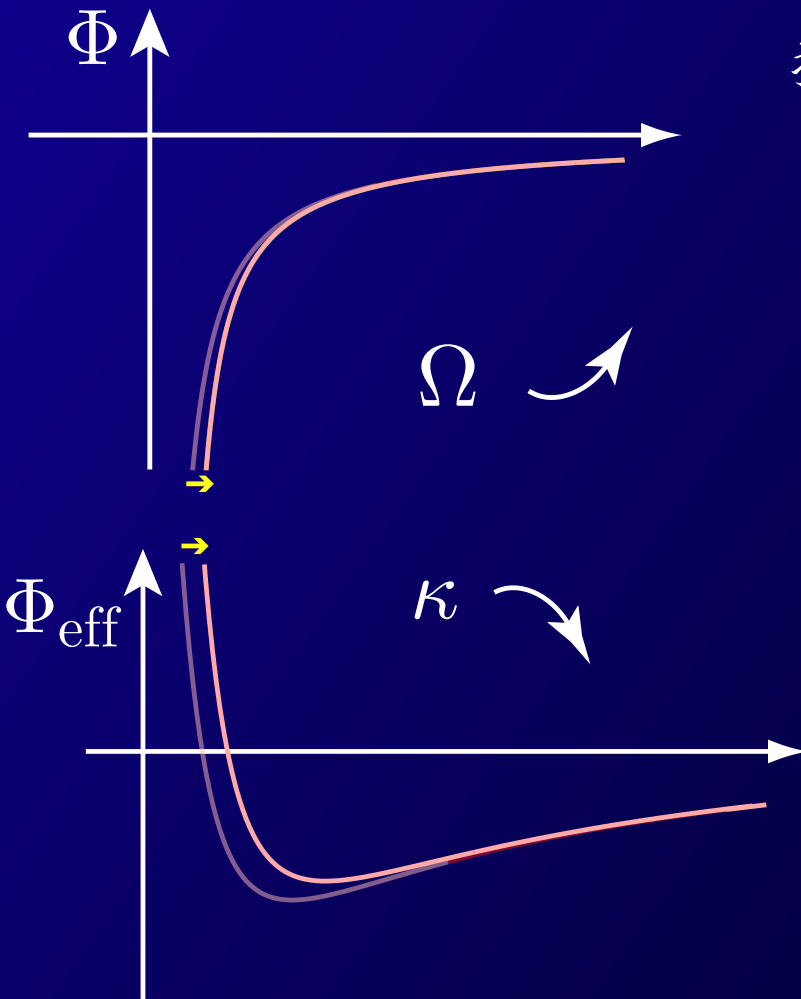
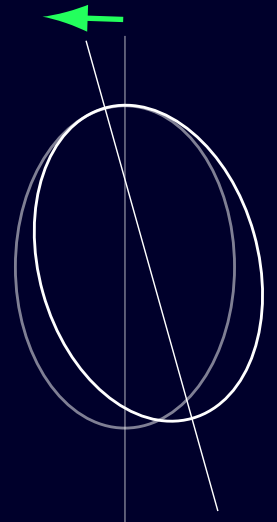
$m=0$ があると

$$\Omega \curvearrowright \quad \kappa \curvearrowleft$$

Thus $\kappa < \Omega$

r 方向に一回振動する間に、方位角方向には 2π 以上回転する。

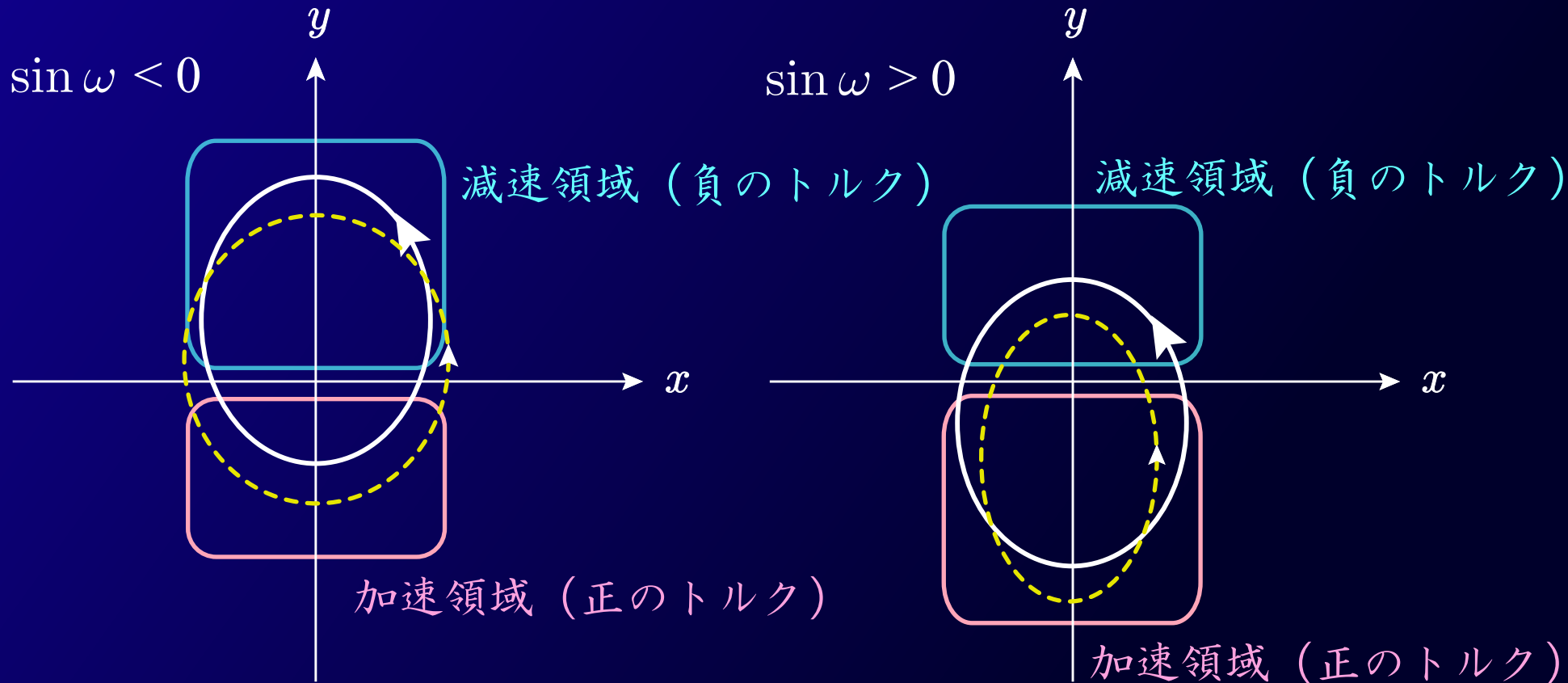
Precession!!



The role of each perturbation potential

$m=1$ の摂動は、角運動量を一方的に抜く (加える)

$$m=1 \quad \Phi_{3,1} = -\frac{15 GM}{16 a_B} q_1 q_2 (q_1 - q_2) \left(\frac{a_B}{r}\right)^4 e_B \left(1 + \frac{3}{4} e_B^2\right) \cos \varphi$$



加速領域と減速領域では加速領域のほうが原点に近いため、1周平均で加速が勝つ



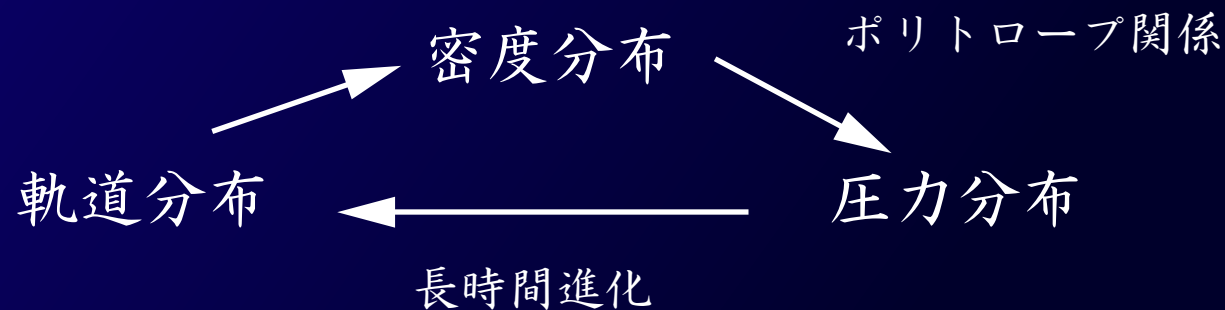
加速領域と減速領域では減速領域のほうが原点に近いため、1周平均で減速が勝つ



圧力による効果を考慮し ガス円盤の長時間進化を調べる

摂動力として圧力項を考慮に入れて
粒子の場合と同じ議論をする。

$$-\frac{G(M_1 + M_2)}{r^3} \vec{r} + \vec{F}' - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P$$

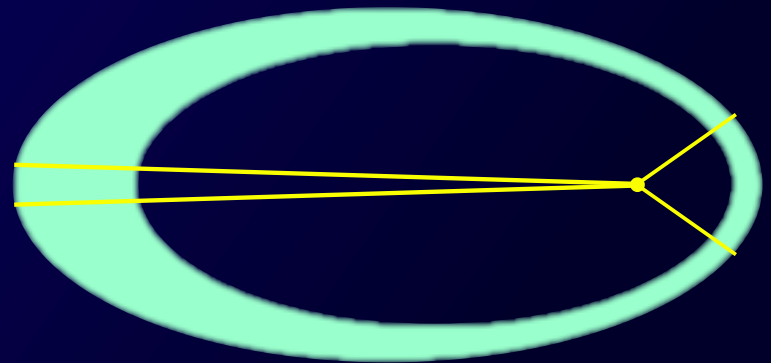


ガス円盤の面密度分布と軌道分布

$$\rho = \frac{\rho_0}{\sqrt{1-e^2}} \left[1 - \frac{2e + (1+e^2)\cos f}{(1-e^2)^2} re' - \frac{e \sin f}{1-e^2} r\omega' \right]^{-1}$$

ガス円盤の面密度は軌道要素の勾配で決まる。

軌道離心率と近点方向が一致している場合、ガス円盤内には密度の粗密は現れない (面積速度一定の法則)



→ pressure 分布も軌道要素の空間 1 階微分で決まる

→ pressure force は 軌道要素の空間 2 階微分で決まる

軌道進化の方程式は時間 1 階空間 2 階の微分方程式になることが予想される。

様々な変数変換の後、

ガス円盤の長時間進化

$$\frac{1}{i\Omega_B} \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} + U(\xi)\psi$$

$$\psi \longleftarrow (e \cos \omega + e_f) + i e \sin \omega$$

$$\xi \longleftarrow a$$

$$U(\xi)$$

原点を強制離心率の位置にシフトした、軌道離心率

軌道長半径

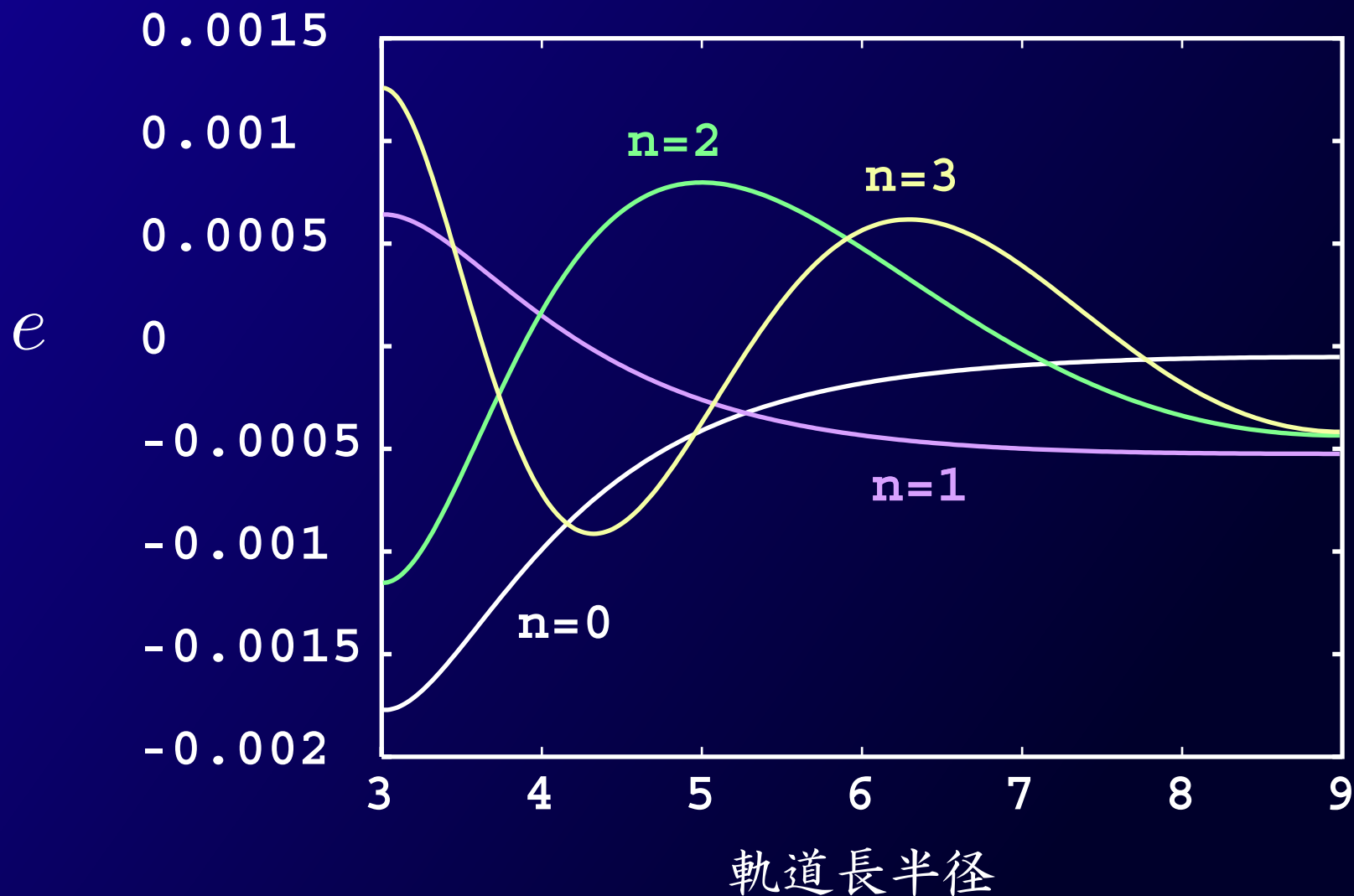
重力と圧力による摂動

時間依存するシュレディンガー方程式

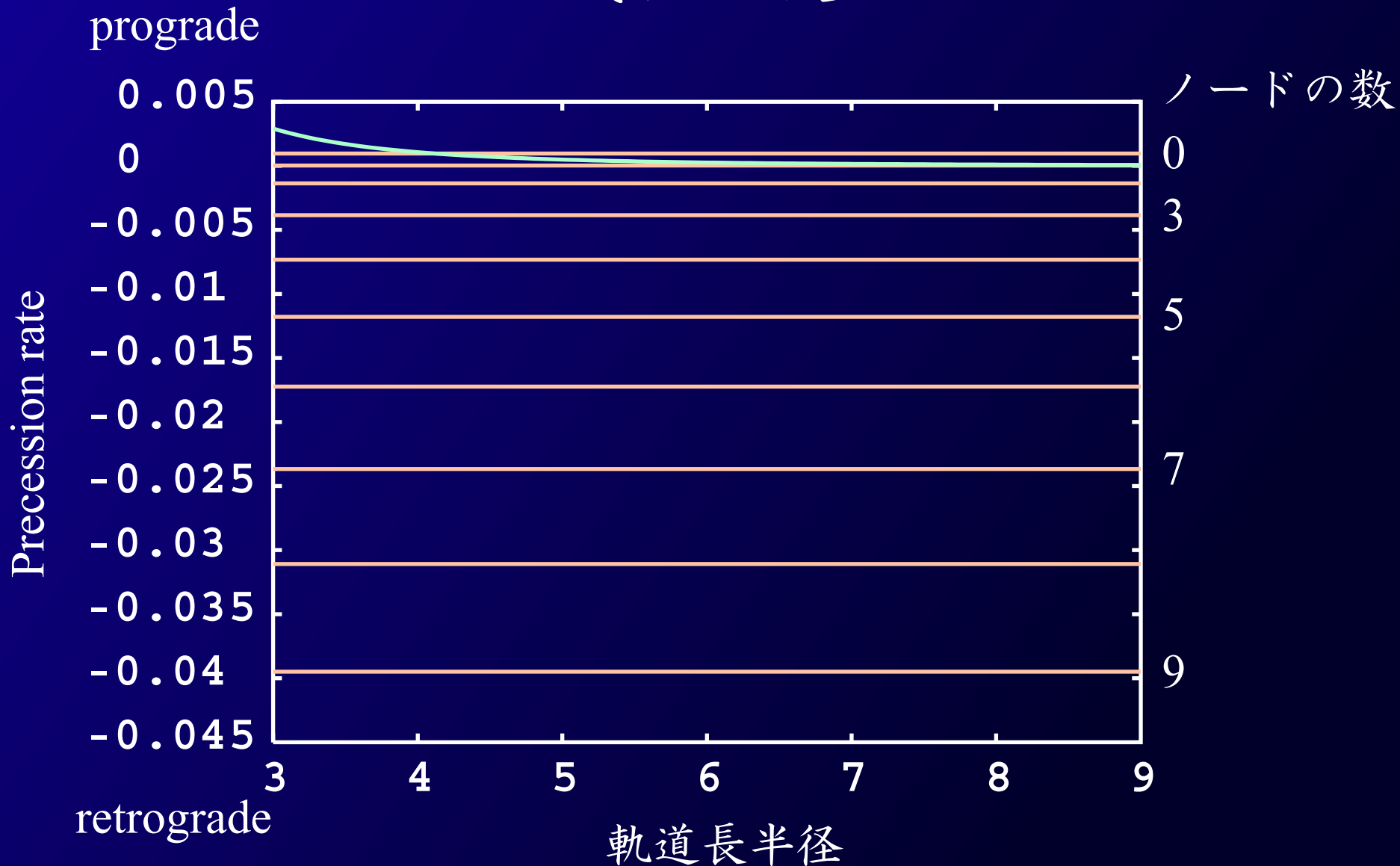
連星周りのガス円盤の長時間軌道進化は、強制離心率周りを振動し、円盤の内縁と外縁の間でn個の節を持つような波の重ね合わせであらわされる。

一様密度、マッハ数20、円盤内径3、円盤外径9の場合の固有関数

固有関数



歳差速度



短い波長の波ほど retrograde に歳差する

まとめ

連星の周りの粒子の長時間進化は、軌道離心率が強制離心率の周りを振動するような時間進化になる。歳差速度は連星に近い粒子ほど速く **prograde**。

連星の周りのガス円盤の長時間進化は、軌道離心率が強制離心率の周りを振動する様々な波数を持った波の重ねあわせであらわされる。
最も長い波長の波は **prograde** に歳差運動する。
短い波長の波ほど **retrograde** に歳差運動する。

→ 密度分布の時間進化