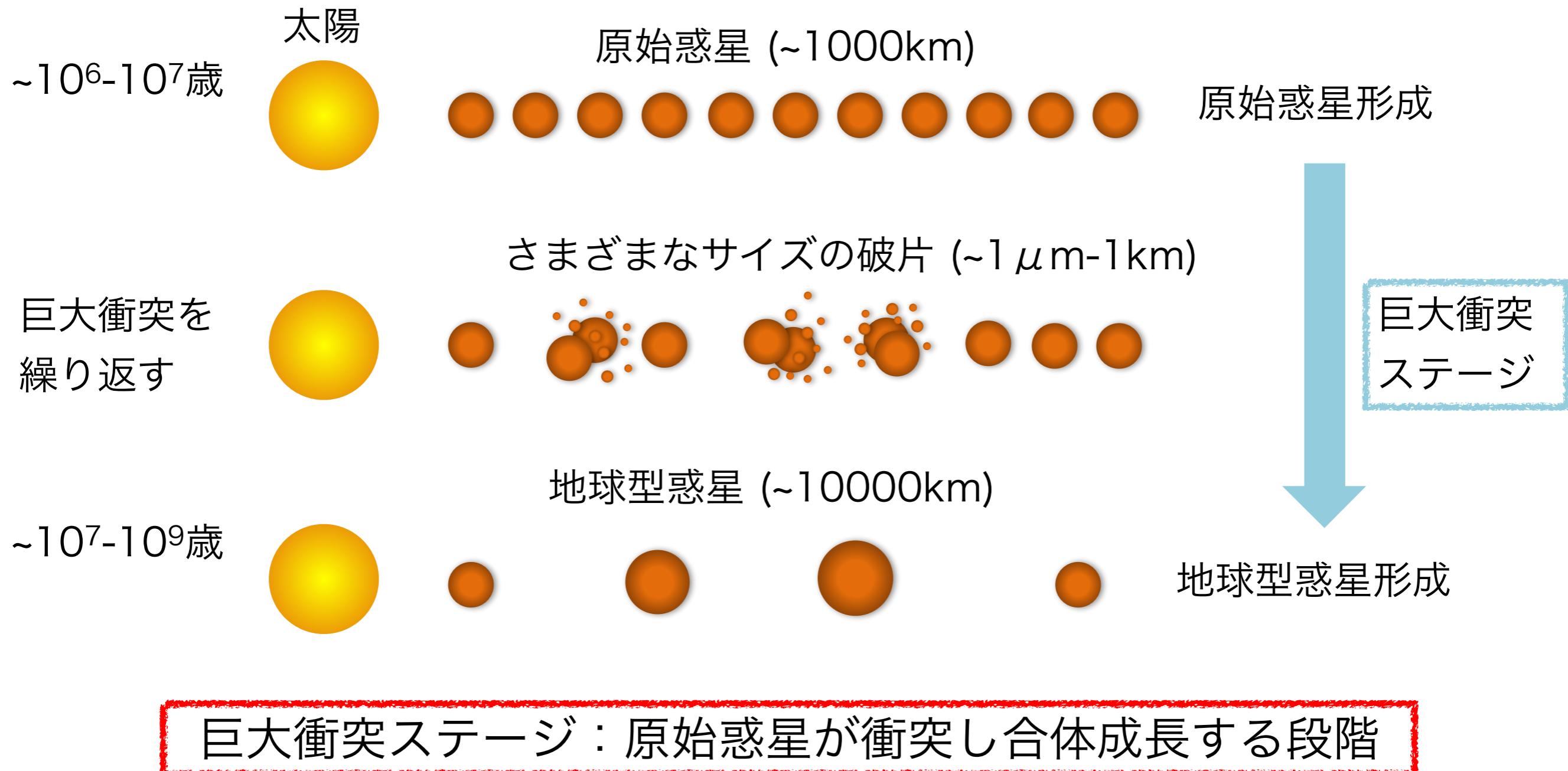


原始惑星同士の衝突合体を含めた N体計算と 惑星による重力散乱の効果

Ta研 M1 磯谷和秀

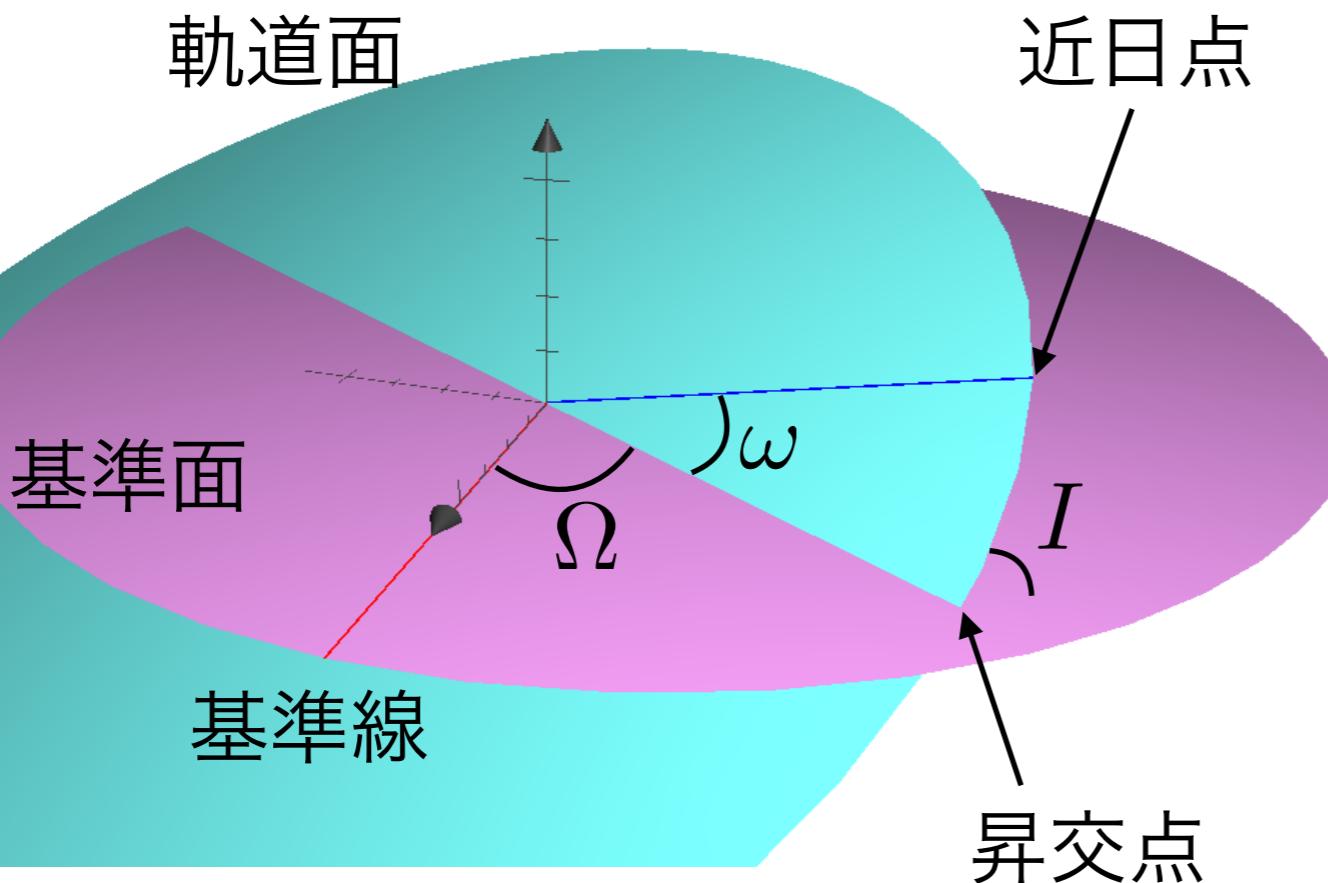
太陽系における巨大衝突ステージ

- 太陽誕生（0歳）から 10^6 - 10^7 年ほどで火星サイズ（~1000km）の原始惑星が形成



軌道要素

橍円軌道の場合



橍円の形を決定

軌道長半径

a
 e

離心率

軌道面の位置を決定

昇交点経度

Ω
 ω
 I

近日点引数

軌道傾斜角

位置と速度の 6 変数



軌道要素 6 つ

天体の位置を決定

離心近点離角

E

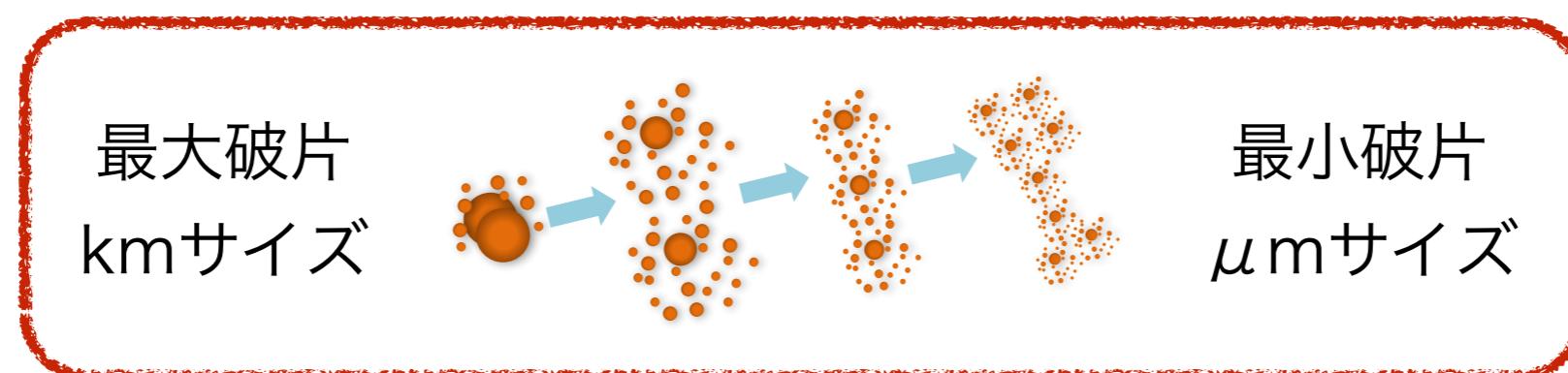
または

近点通過時刻

T

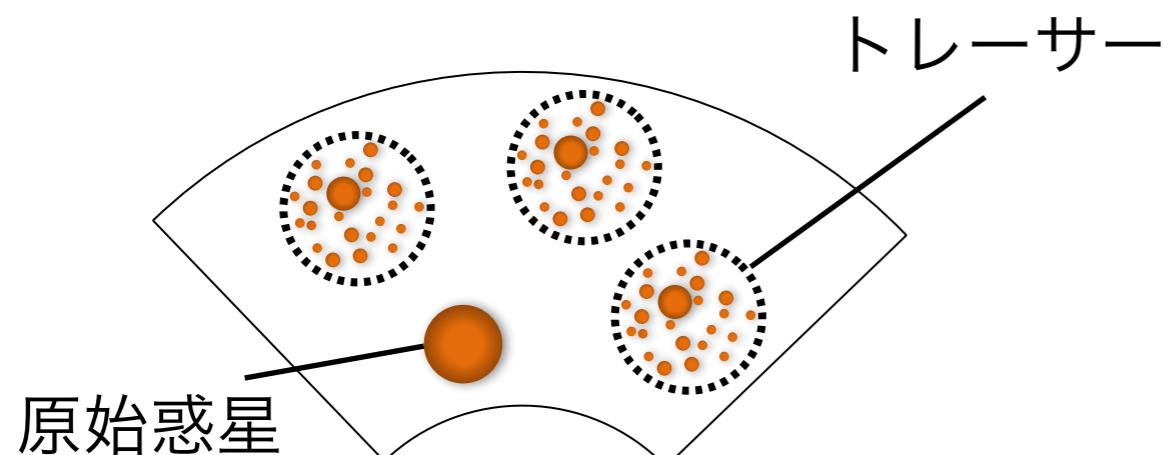
夏の学校までの内容

- ・ 巨大衝突ステージにおける破片同士の**衝突破壊**の重要性
- ・ デブリ円盤内：破片同士の衝突破壊が次々に起こる（衝突力スケード）



- ・ μm サイズ以下 → 中心星の輻射圧による吹き飛ばし
→ 破片が消失
→ **総質量が減少する**
- ・ デブリ円盤の起源：巨大衝突の際に放出される破片 (Genda et al. 2015)

夏の学校までの数値計算コード

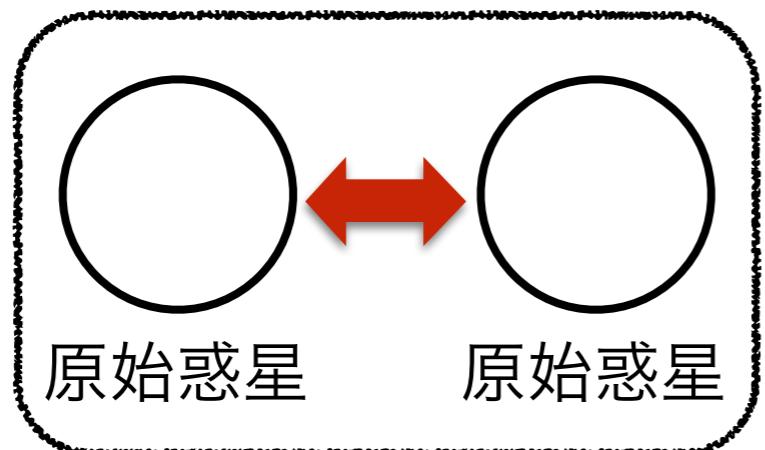


似た軌道をとる複数の破片を1つの
粒子とみなす（スーパー粒子近似）

→ N体計算のコストを削減

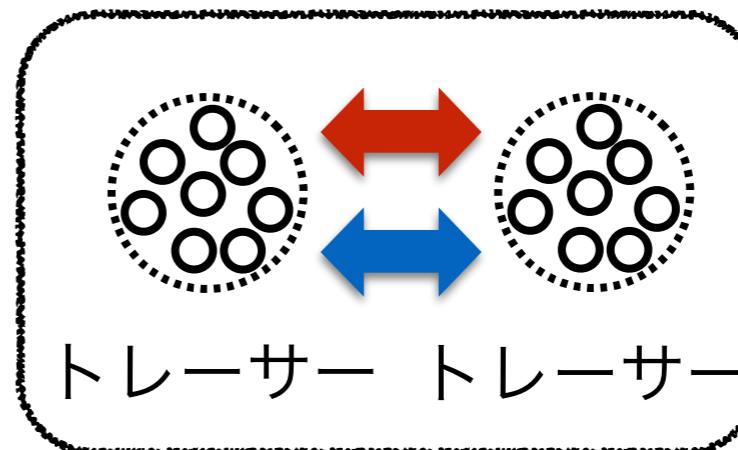
N体計算 (4次のエルミート法)

重力相互作用を取り扱う

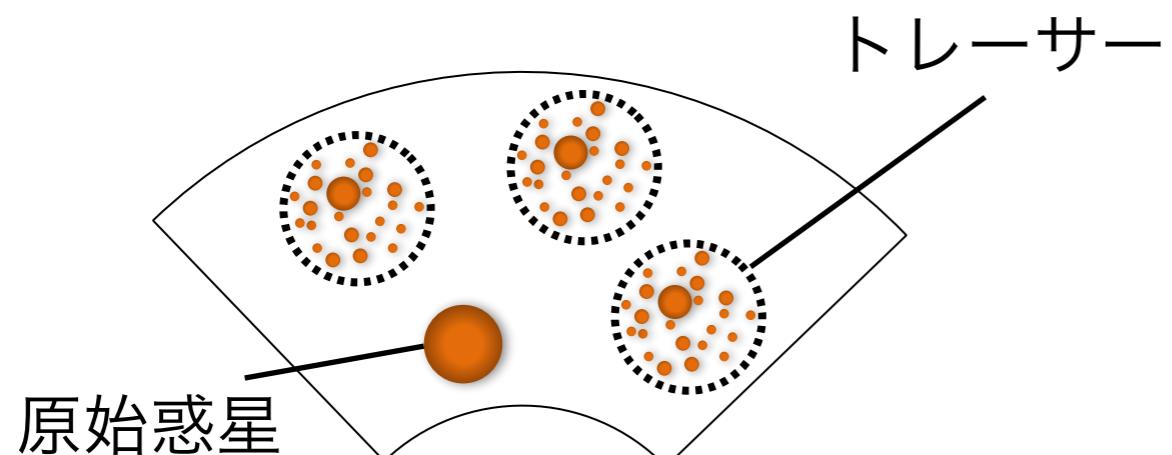


統計的計算

衝突破壊を取り扱う



夏の学校までの数値計算コード



似た軌道をとる複数の破片を1つの
粒子とみなす（スーパー粒子近似）

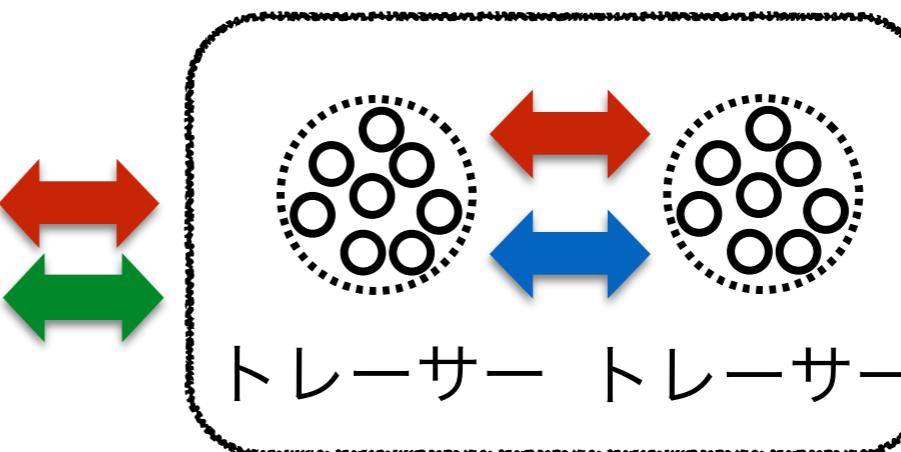
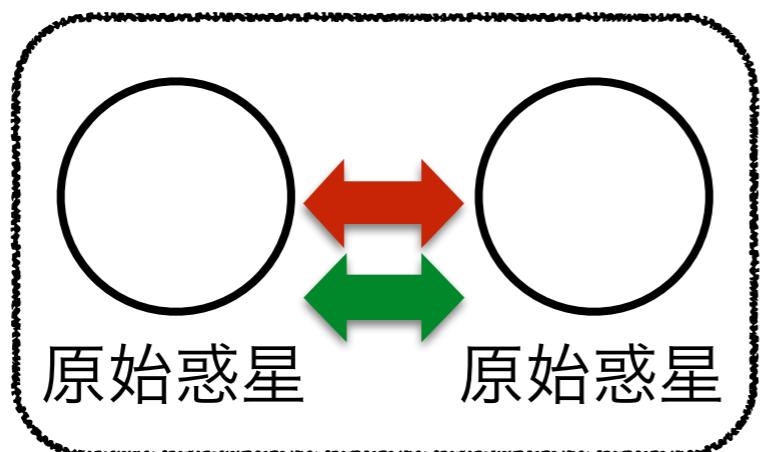
→ N体計算のコストを削減

N体計算 (4次のエルミート法)

重力相互作用を取り扱う

統計的計算

衝突破壊を取り扱う



目標

巨大衝突ステージの一連の計算を行いたい

原始惑星同士、原始惑星-破片の 衝突合体・破壊 を新たに取り入れる！

N体計算での粒子の大きさ・形

N体計算を用いた軌道計算では…

- ・ 基本的に「質点-質点間」の重力相互作用を解いている
- ・ 全粒子の力学的エネルギーは保存する
(丸め誤差などはここでは無視)

粒子が大きさを持つ&質量分布が球対称な場合…

- ・ 各粒子の重心間の重力相互作用は、質点の場合と全く同じ
- ・ 同様に全粒子の力学的エネルギーは保存する

球対称でない、スピンあり、潮汐力による変形、などを扱う場合…

- ・ 力学的エネルギーは、変形に伴う「熱エネルギー」などへと変化するため保存しない

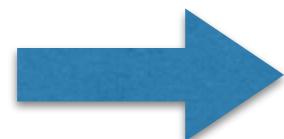
N体計算での粒子の大きさ・形

N体計算を用いた軌道計算では…

- 基本的に「質点-質点間」の重力相互作用を解いている
- 全粒子の力学的エネルギーは保存する
(丸め誤差などはここでは無視)

粒子が大きさを持つ&質量分布が球対称な場合…

- 各粒子の重心間の重力相互作用は、質点の場合と全く同じ
- 同様に全粒子の力学的エネルギーは保存する



物理的衝突の扱いが可能

球対称でない、スピンあり、潮汐力による変形、などを扱う場合…

- 力学的エネルギーが「**今回扱わないエネルギー**」などへと変化するため保存

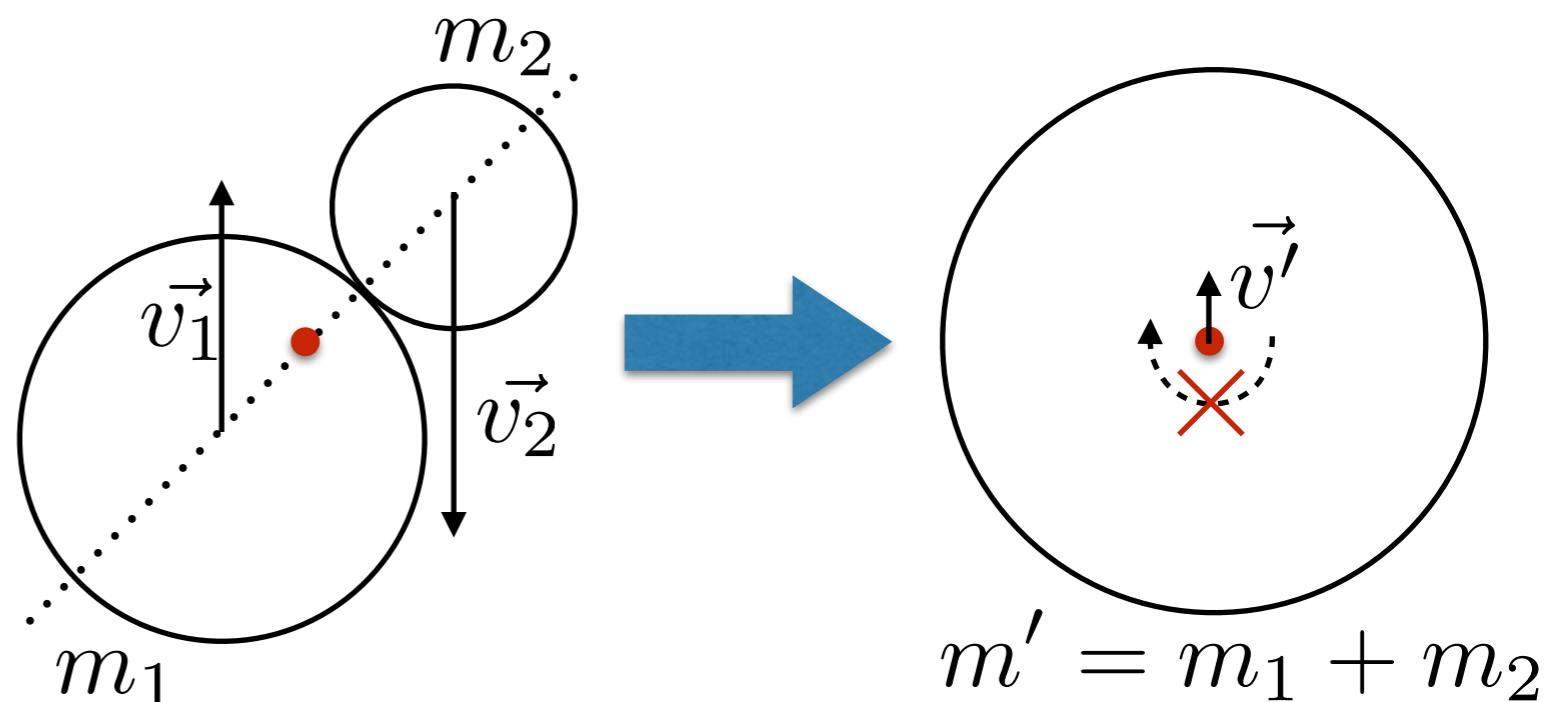
衝突完全合体を含んだN体計算

まずは簡単な衝突合体

(衝突結果の種類： **合体** 反発 破壊)

仮定

1. 完全合体
2. スピンは考えない



- 運動量を保存させる

$$\vec{v}' = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}$$

- : 2粒子の重心
- ↑ : 速度ベクトル

- 軌道角運動量は保存しない
(スピン角運動量分を失う)

- 完全合体では**力学的エネルギー**は保存しない (次のページ)

完全合体に伴うエネルギー変化量

中心星と粒子1, 2の3天体が存在すると仮定

衝突前 :

$$E = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 - \frac{Gm_1m_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$$
$$- \frac{GM_*m_1}{r_1} - \frac{GM_*m_2}{r_2}$$

変化量 :

$$\Delta E = -\frac{1}{2} \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2} (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)^2$$
$$+ \frac{Gm_1m_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$$
$$+ GM_* \left[-\frac{m'}{r'} + \frac{m_1}{r_1} + \frac{m_2}{r_2} \right]$$

衝突後 :

$$E' = \frac{1}{2}m'v'^2 - \frac{GM_*m'}{r'}$$

$$\vec{r}' = \frac{m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2}{m_1 + m_2}$$

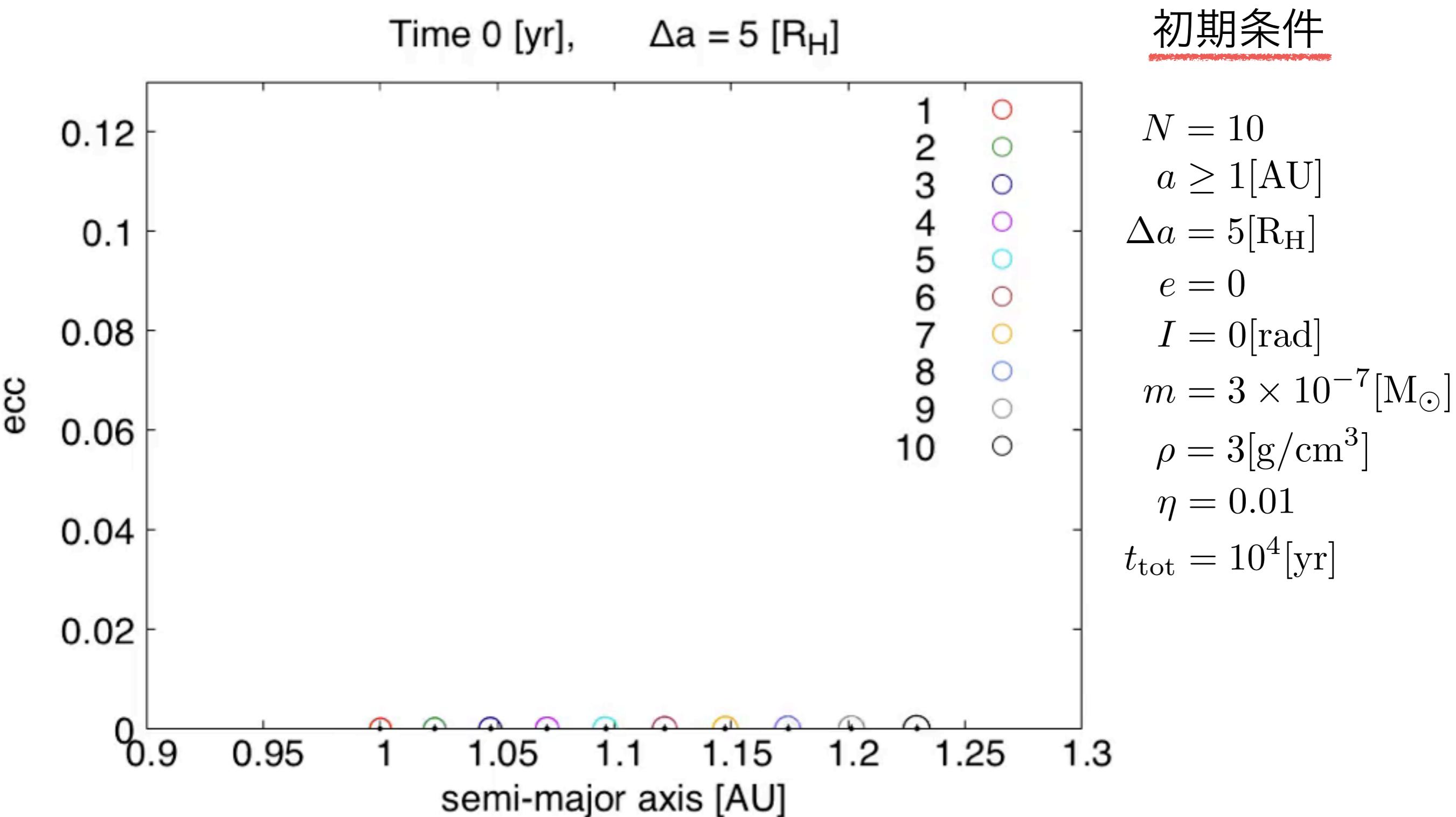
相対速度分の運動エネルギーが散逸する
(熱、変形など)

相互重力エネルギーが消える

中心星重力エネルギーが変化する

計算精度のチェックのため、 ΔE を補正する

原始惑星10体 軌道長半径-離心率



衝突速度とエネルギー変化量

- ・N体計算で衝突させたところ、 ΔE の3つの項のうち、第1項と第2項の寄与が大きく、またこれらの絶対値はほぼ等しかった

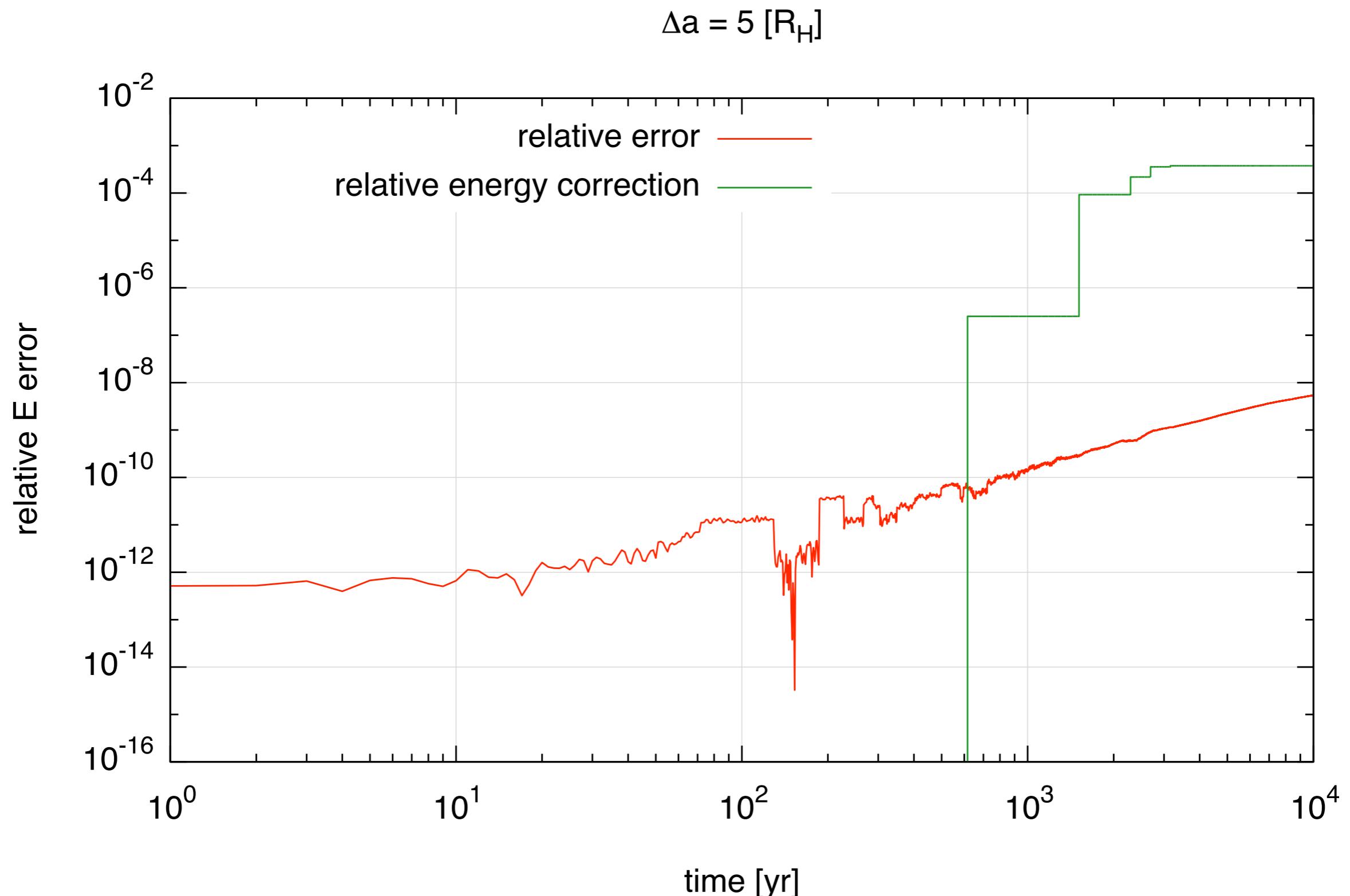
$$\text{第1項と第2項} \sim 10^{-9} [\text{M}_\odot \text{AU}^2 / (\text{yr}/2\pi)^2]$$

$$\text{第3項} \sim 10^{-16} [\text{M}_\odot \text{AU}^2 / (\text{yr}/2\pi)^2]$$

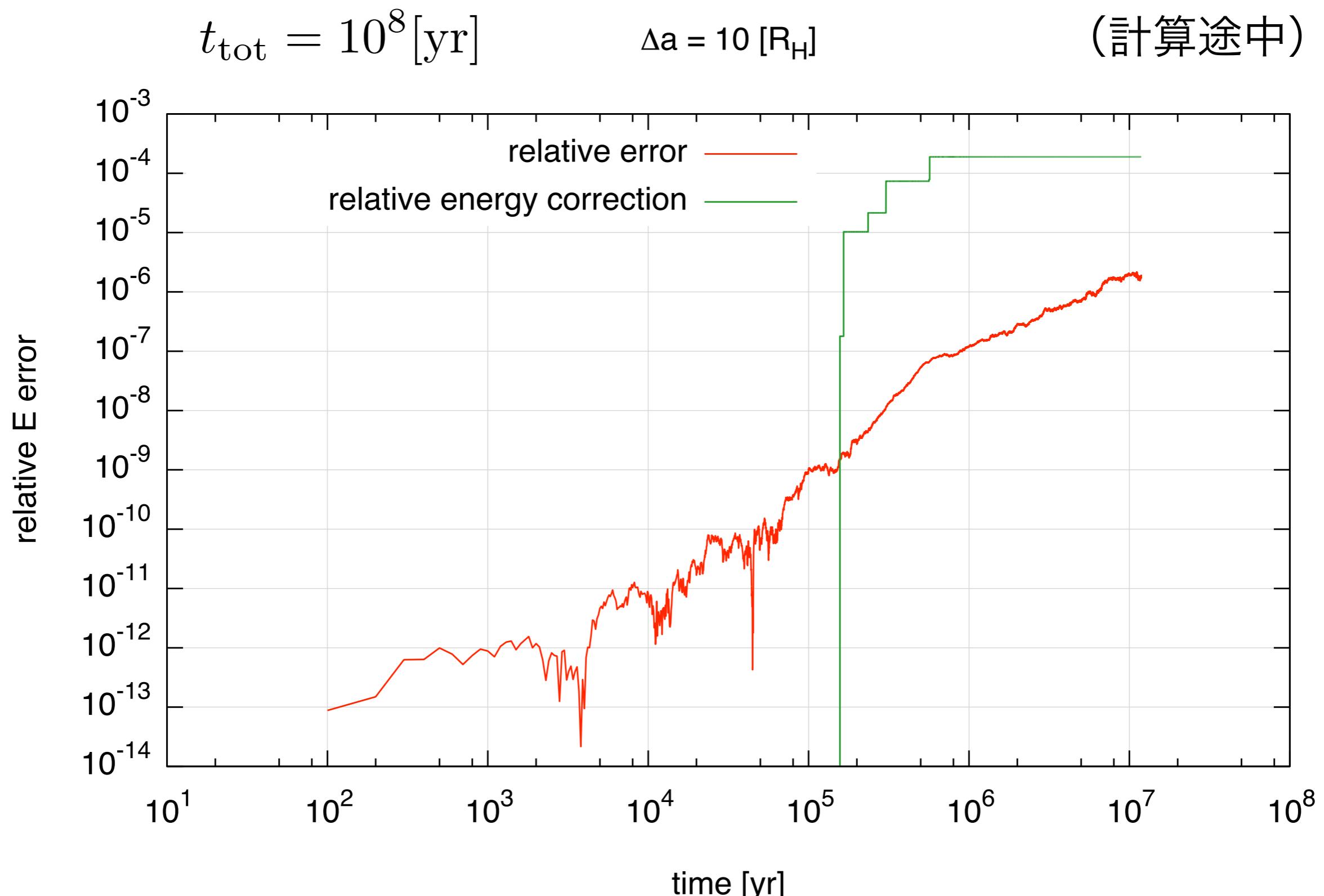
$$\begin{aligned}\Delta E &\simeq -\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)^2 + \frac{G m_1 m_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} \\ &= -\frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_{\text{imp}}^2 - v_{\text{esc}}^2)\end{aligned}$$

→ 衝突エネルギーと脱出に必要なエネルギーの差

相対エネルギー誤差と補正 5Hill



相対エネルギー誤差と補正 10Hill



前半まとめ

- ・自分のN体計算コードでできることを増やし、巨大衝突ステージの一連の計算を行いたいため、今回は衝突合体を取り入れた
- ・相対エネルギー誤差の様子から、衝突時の補正は正確にできている
- ・原始惑星が近接遭遇を繰り返す巨大衝突ステージにおいて、1億年のような長時間積分を行うと、4次精度のエルミート法であっても相対エネルギー誤差が $10^{-4} - 10^{-5}$ 程度になってしまう

放出破片と微惑星の軌道

夏の学校まで…

- ・ 巨大衝突の際に、惑星表面から放出される破片を扱っていた
- ・ 破片は惑星のヒル圏からどのように出ていくのかを確かめていなかった

現在の考え方

- ・ ヒル圏を脱出しやすいような破片の放出速度・角度を知りたい
- ・ 破片とは逆に、ヒル圏へ入ってくる微惑星の軌道がヒントになるかもしれない

目標

微惑星が惑星に衝突するときの軌道を確かめる！

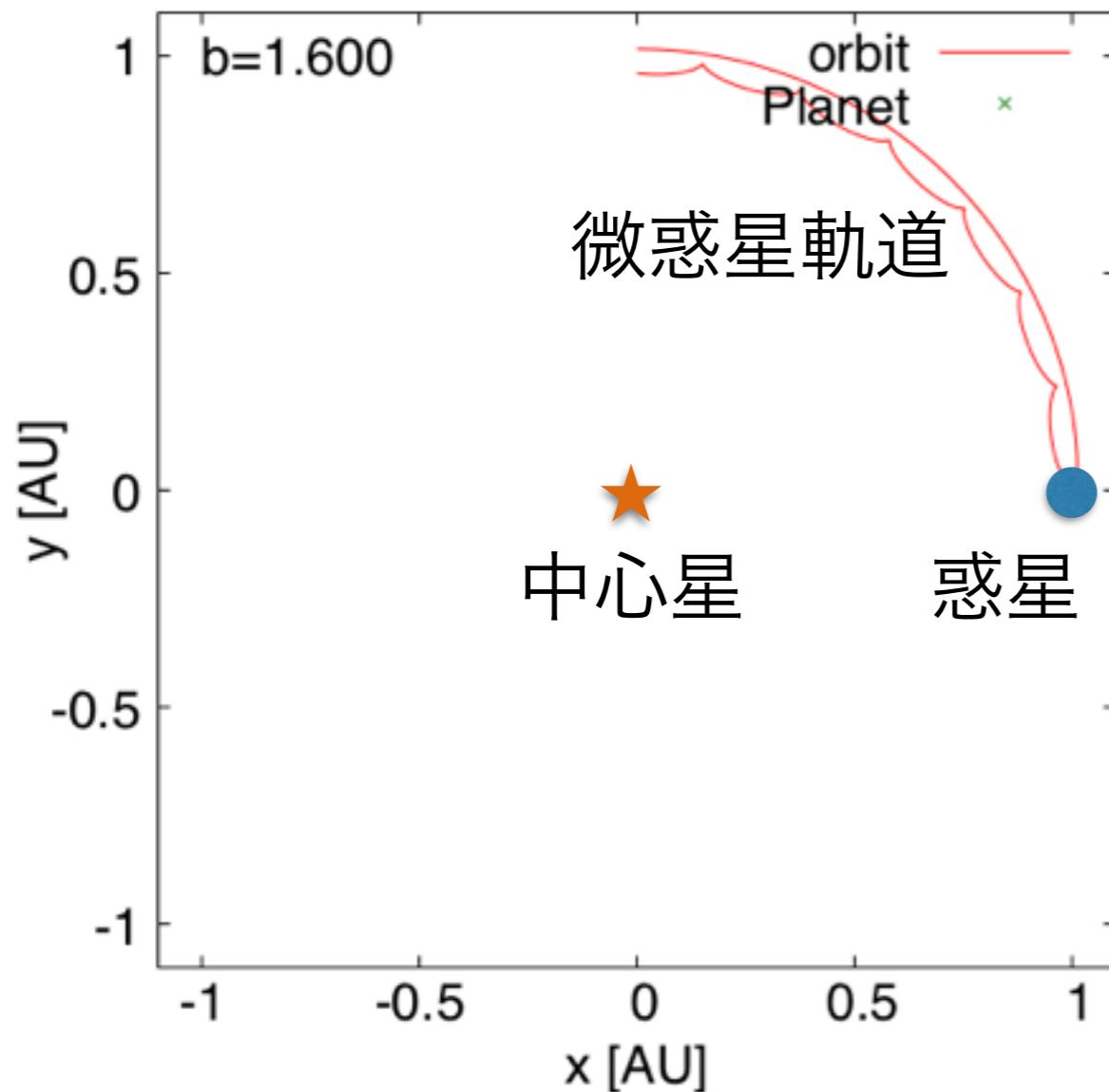
微惑星の重力散乱

初期条件

惑星	$m_1 = 3 \times 10^{-6} M_c$	a_1
中心星 M_c	微惑星 $m_2 = 1 \times 10^{-15} M_c$	a_2

$$a_2 > a_1$$

規格化衝突パラメータ： $b = (a_2 - a_1)/r_H = (a_2 - a_1)/a_1 \times 10^2$



$$r_H = (m_1/3M_c)^{1/3}a_1 = 10^{-2}a_1$$

- ・惑星の回転座標系でプロット
- ・惑星-中心星-微惑星が90度の位置で開始・終了

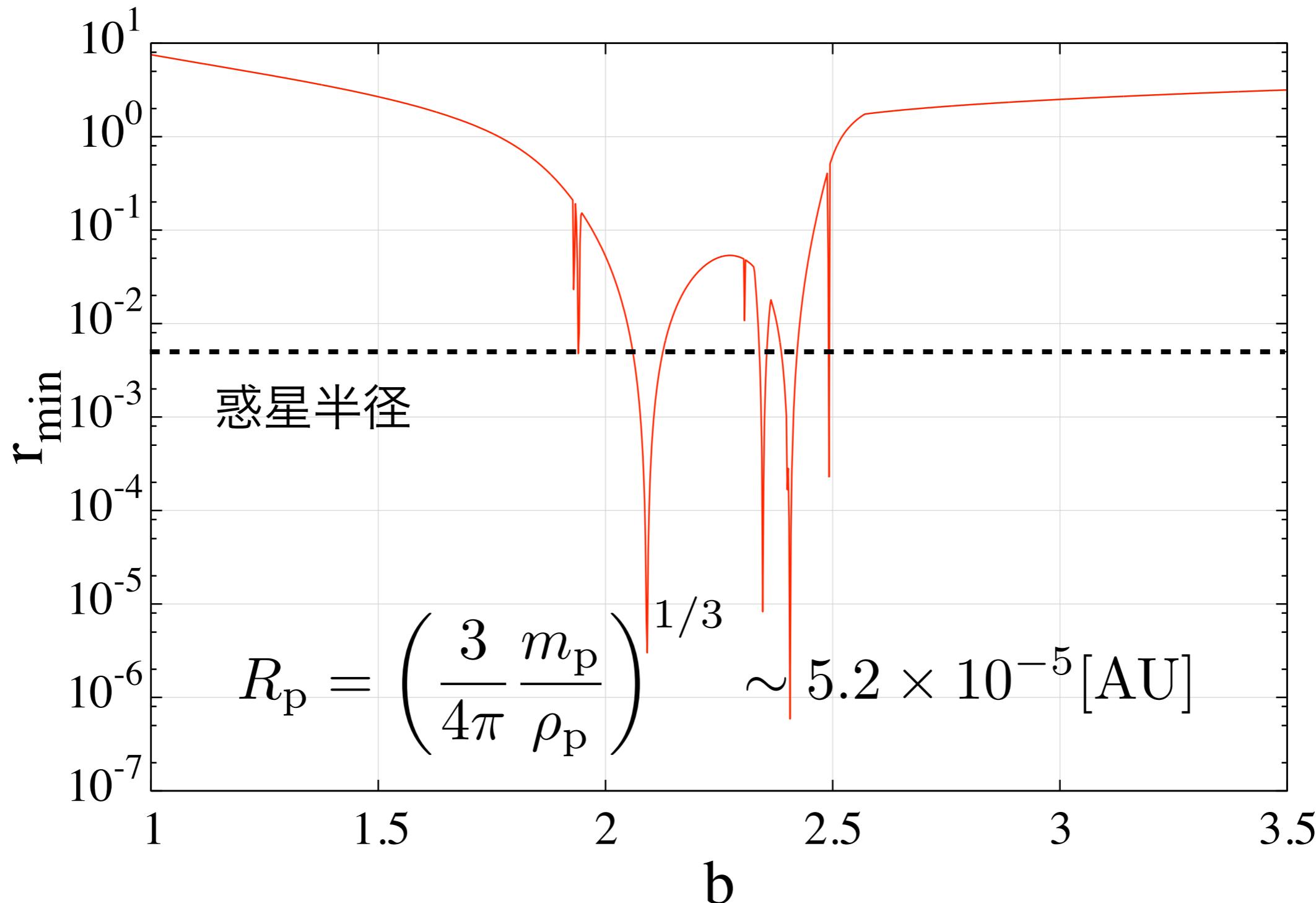
$$1.000 \leq b \leq 3.000$$

0.001 ずつ変化させる

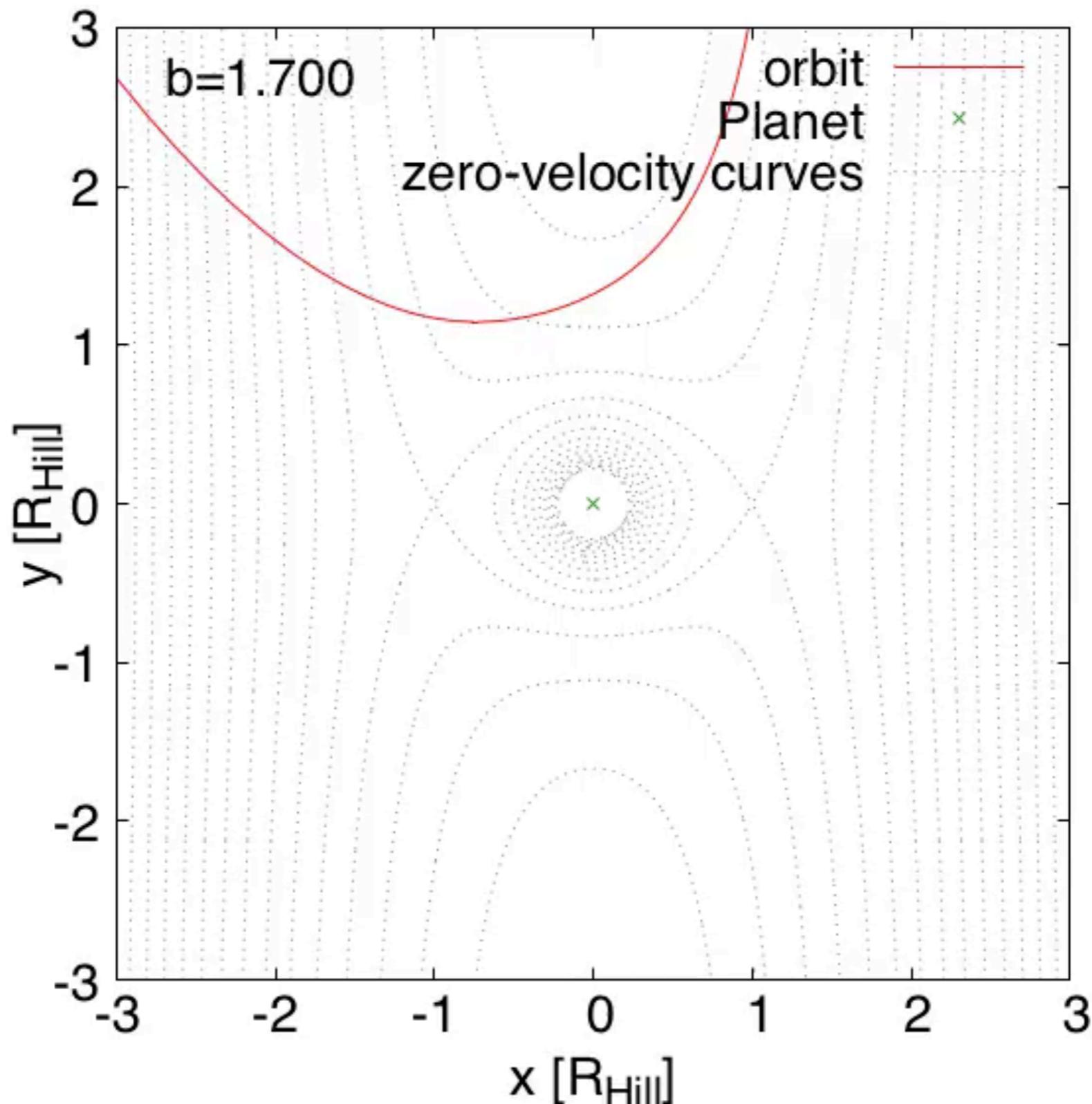
$$\eta = 0.05$$

最接近距離

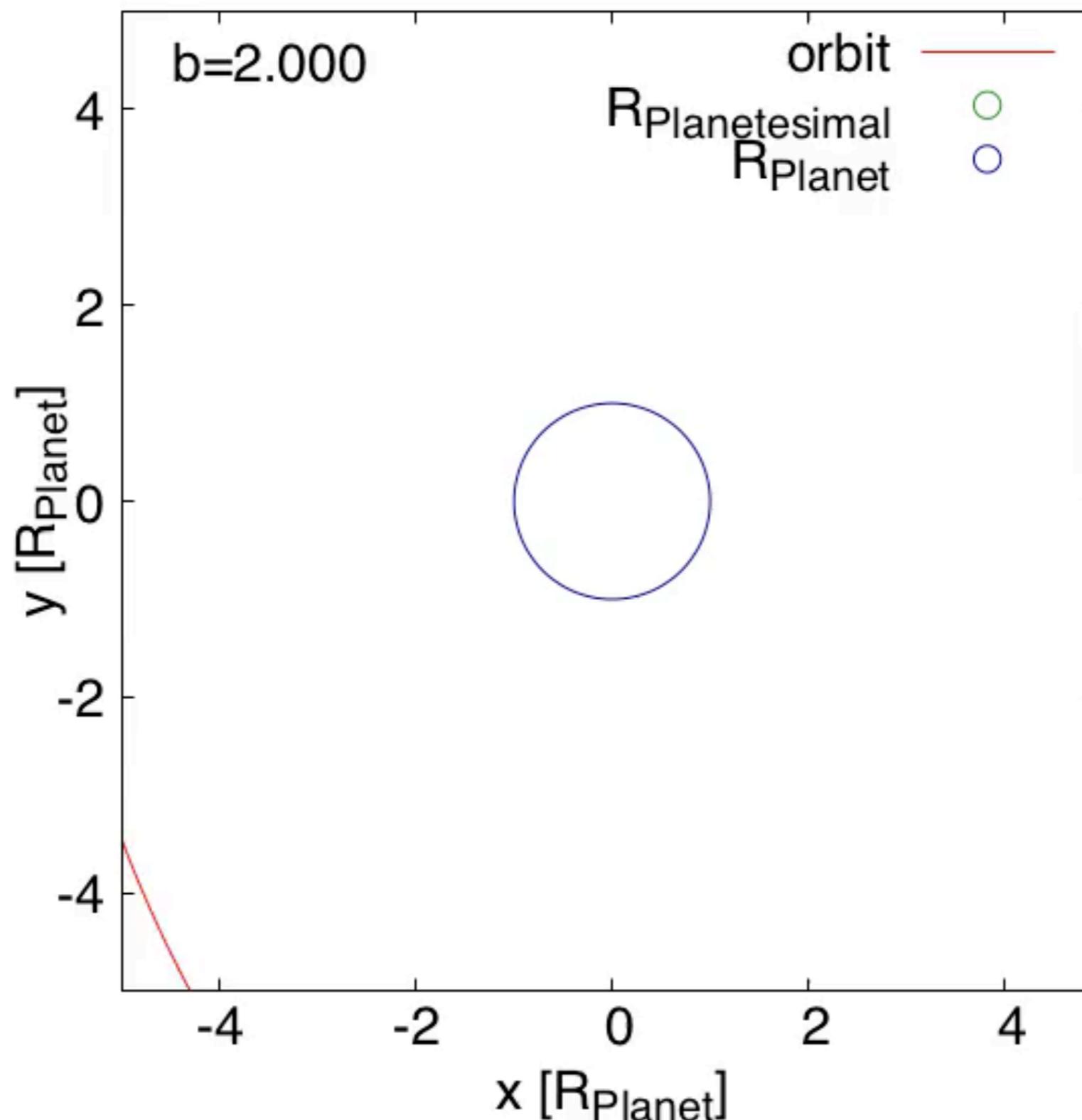
ヒル半径で規格化した最接近距離



ヒル巻付近を通過する微惑星



惑星と衝突する微惑星



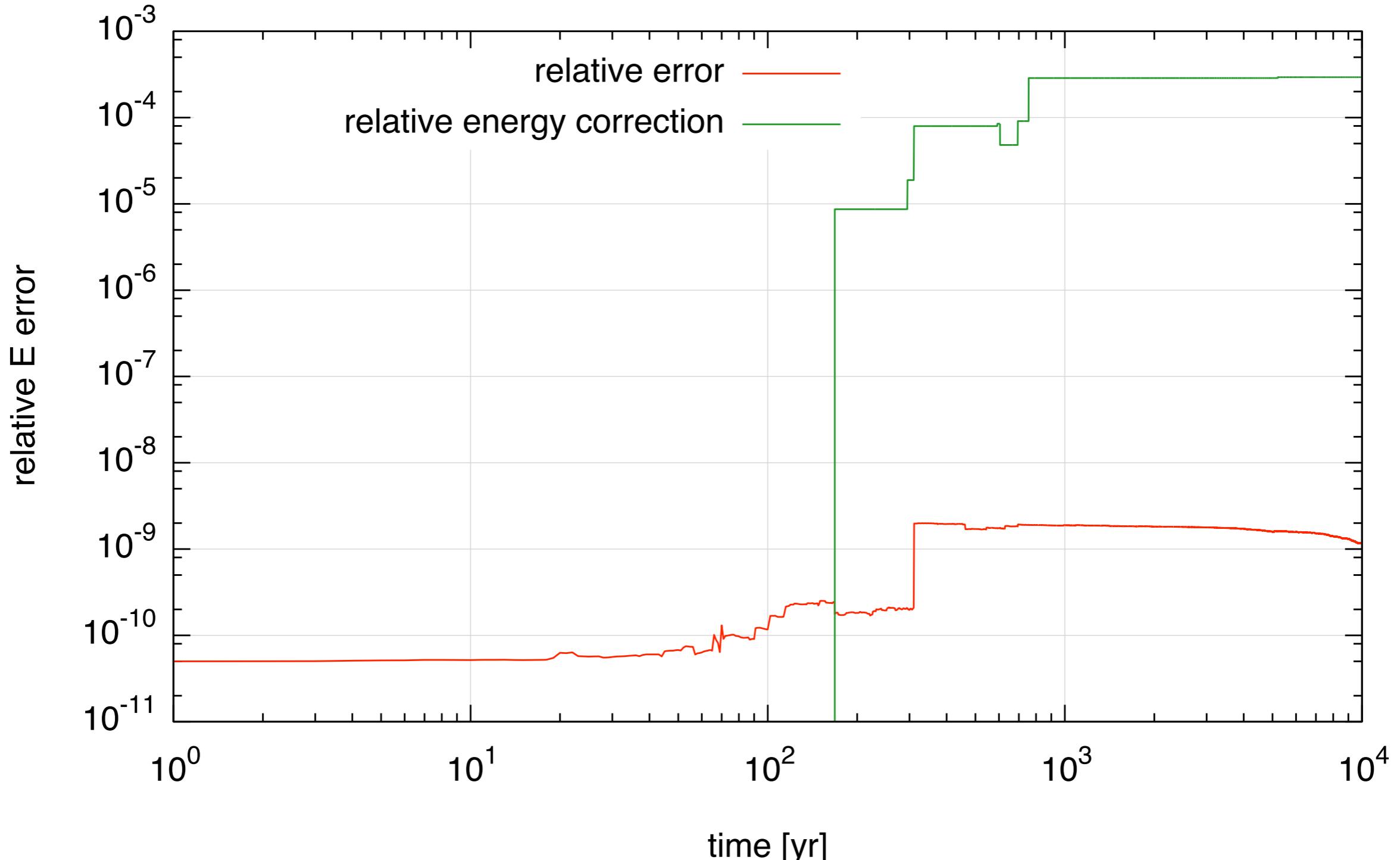
後半まとめ

- ・惑星から受ける重力散乱により微惑星の軌道が変化する
- ・衝突するときの微惑星は、ラグランジュ点近くからヒル圏に侵入していることが多い
- ・ヒル圏に入ってもすぐに出で行ってしまうものも多い
- ・微惑星が初期に内側の円軌道をとる場合、ヒル座標系において今回の結果と点対称なものになりそう（確認していない）
- ・ヒル圏から出やすい破片の放出速度・角度については、ラグランジュ点の近くを破片が通ると良さそうだが、それ以上はわからなかった

今後の課題

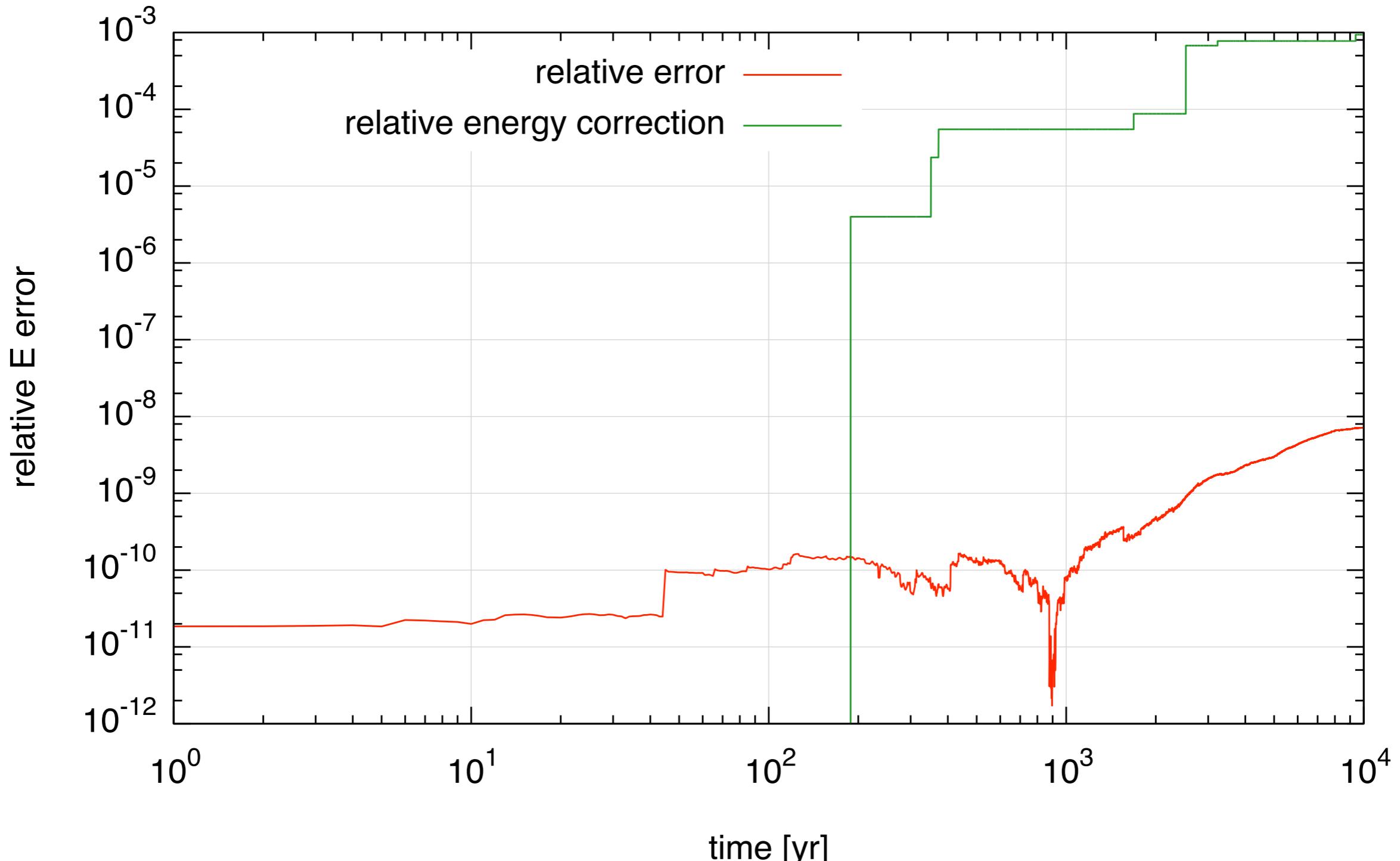
- ・ 完全合体の次は、衝突体の一部（10%程度）を破片として放出し、残りを合体や反発させたい
- ・ 破片が原始惑星に再集積することも起こり得るので、原始惑星に大気がある場合と無い場合を比べられるようにしたい
- ・ 天体のスピンドル運動量を計算する必要はまだなさそう
- ・ 破片の放出速度・角度については、衝突速度・角度をパラメータとしたモデルがあるのなら、それを勉強して取り入れようと考えている

Appendix

$\Delta a = 1 [R_H]$ 

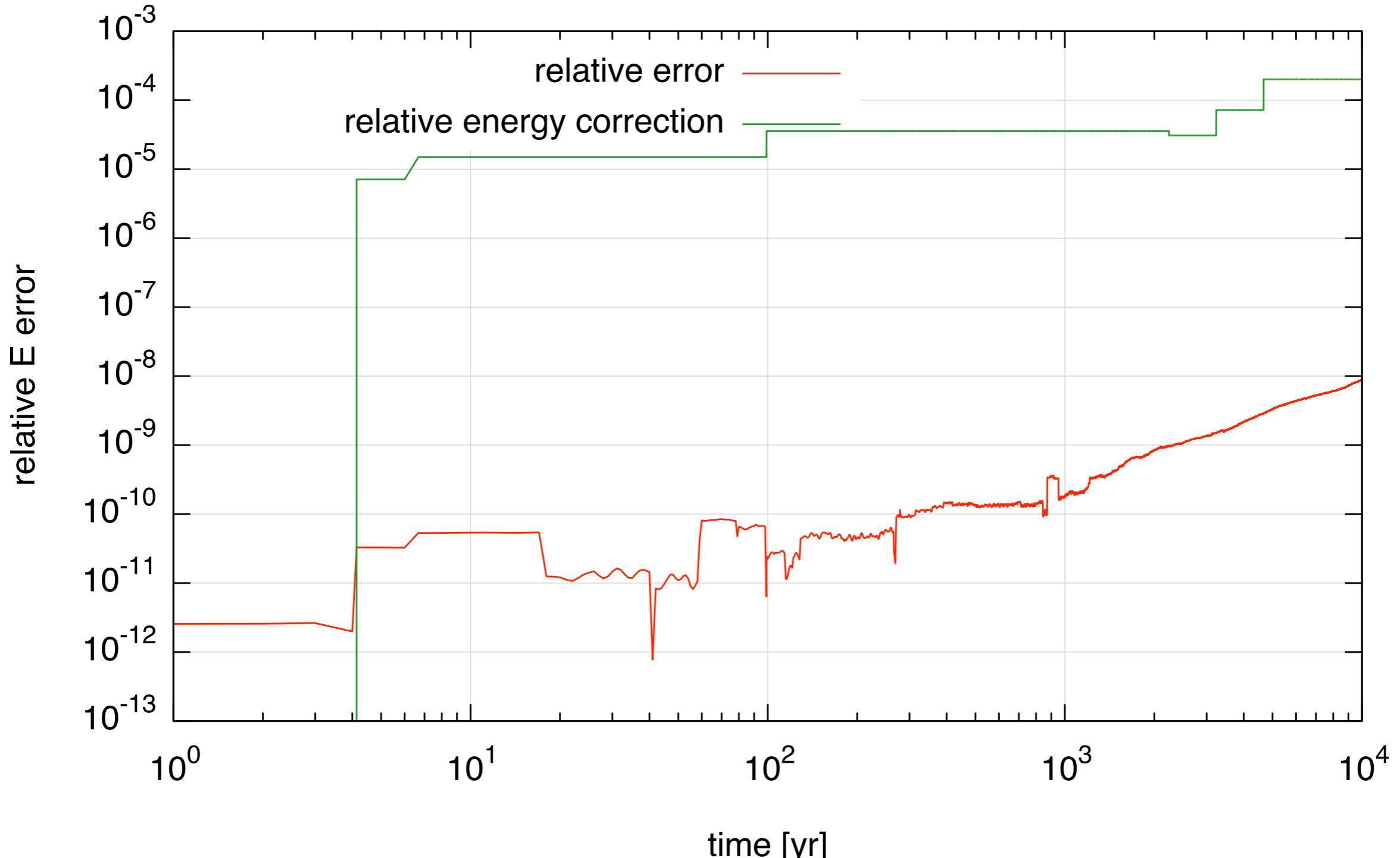
2 Hill

$\Delta a = 2 [R_H]$



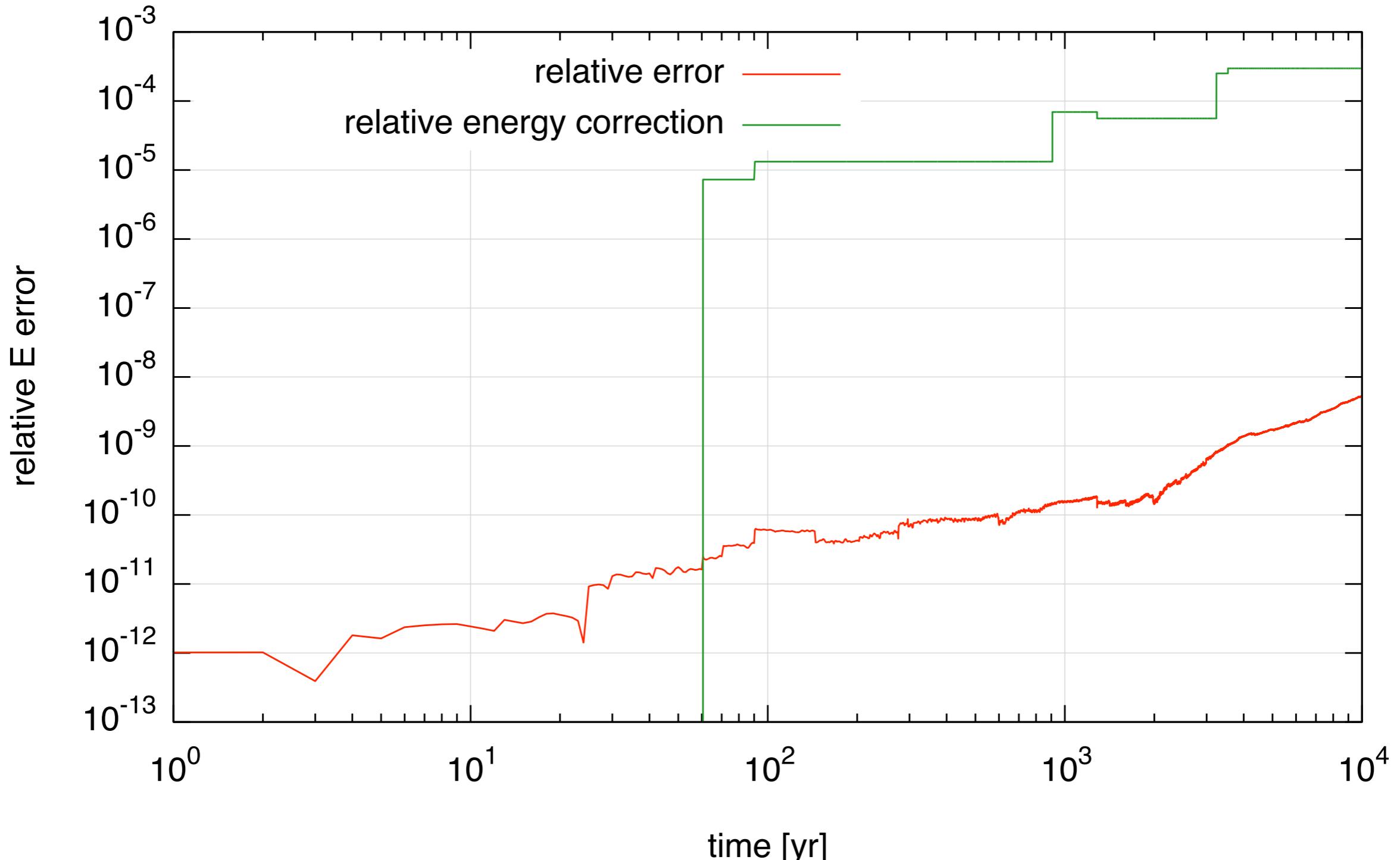
3 Hill

$\Delta a = 3 [R_H]$

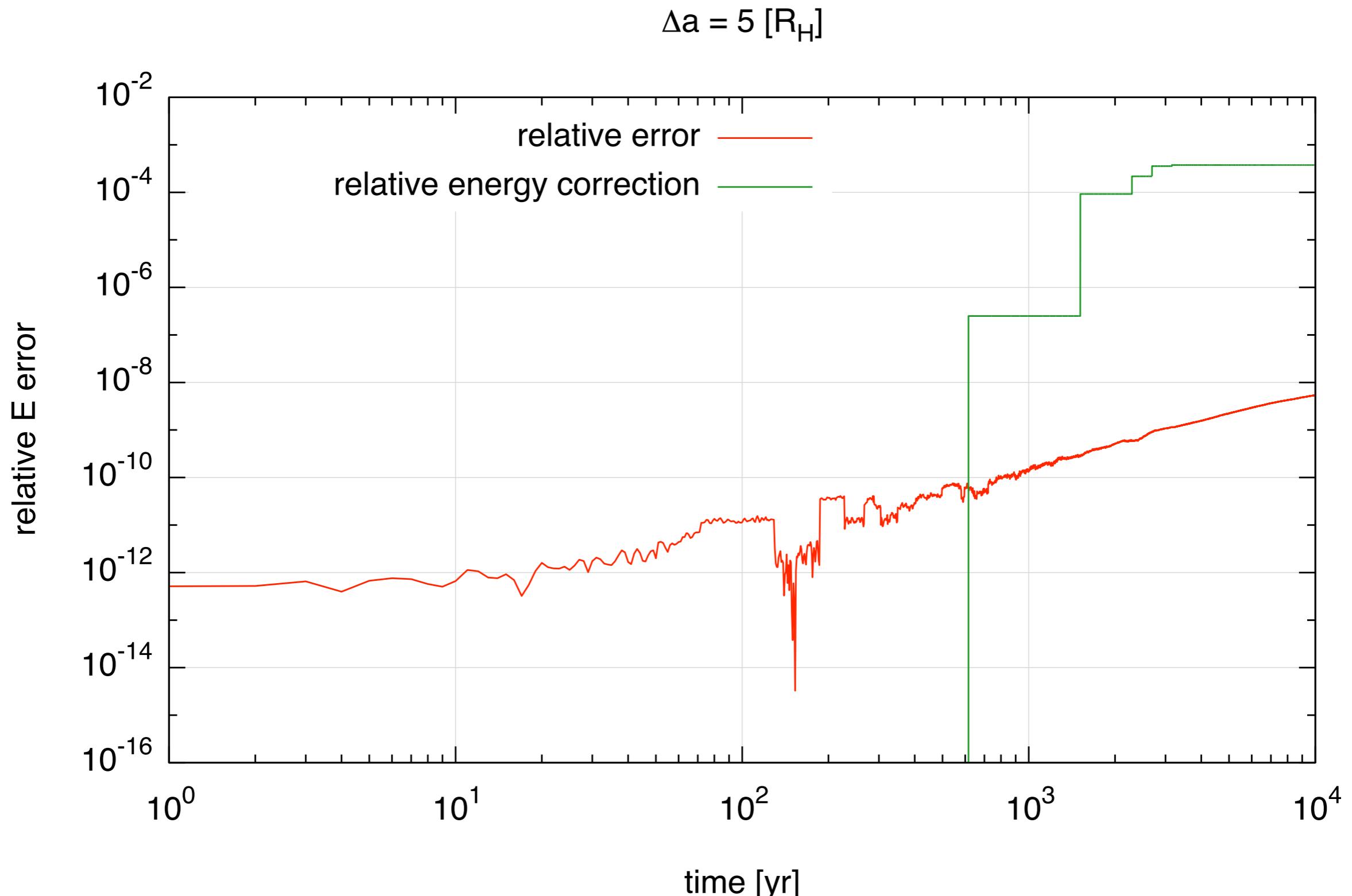


4 Hill

$\Delta a = 4 [R_H]$

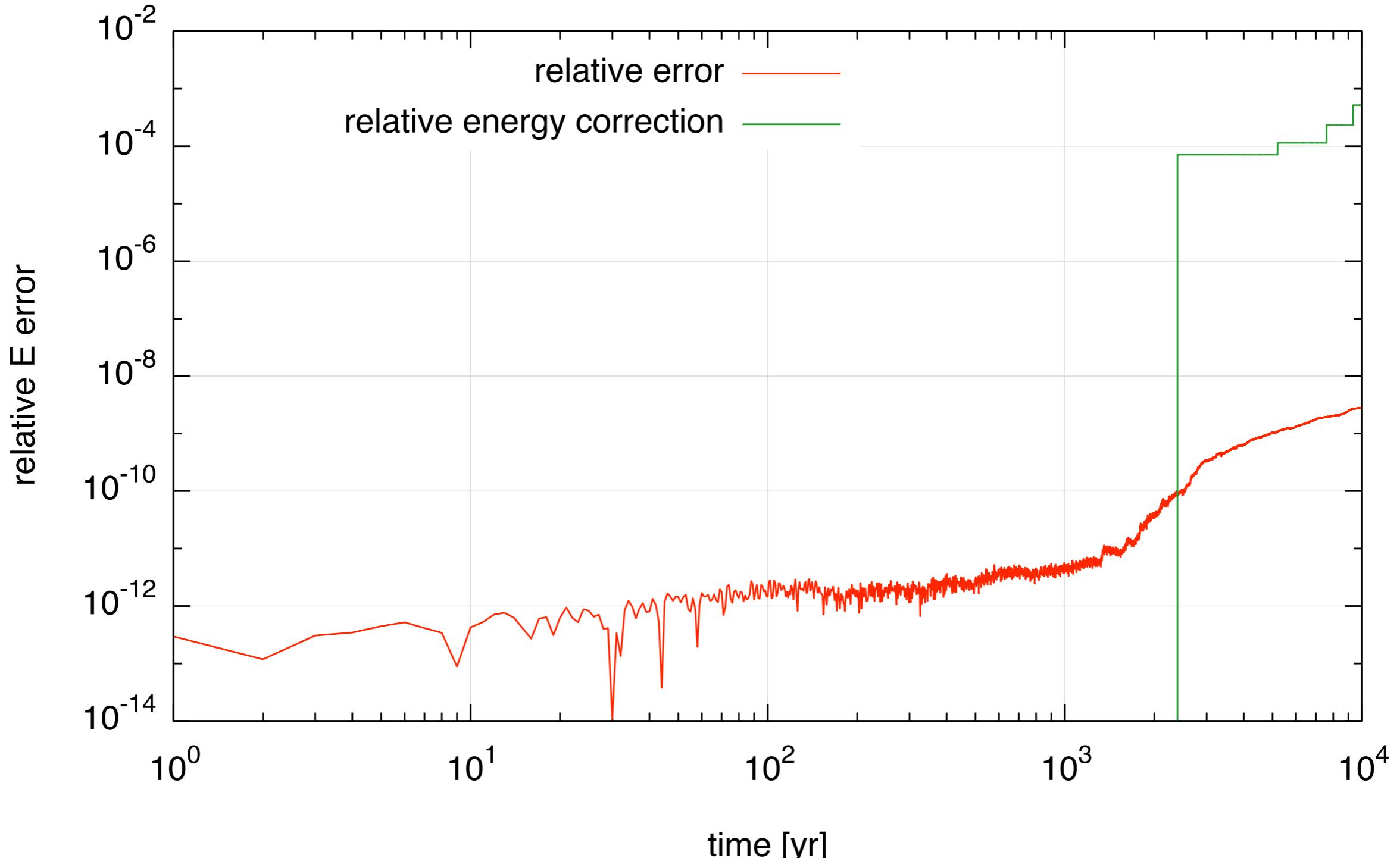


5 Hill



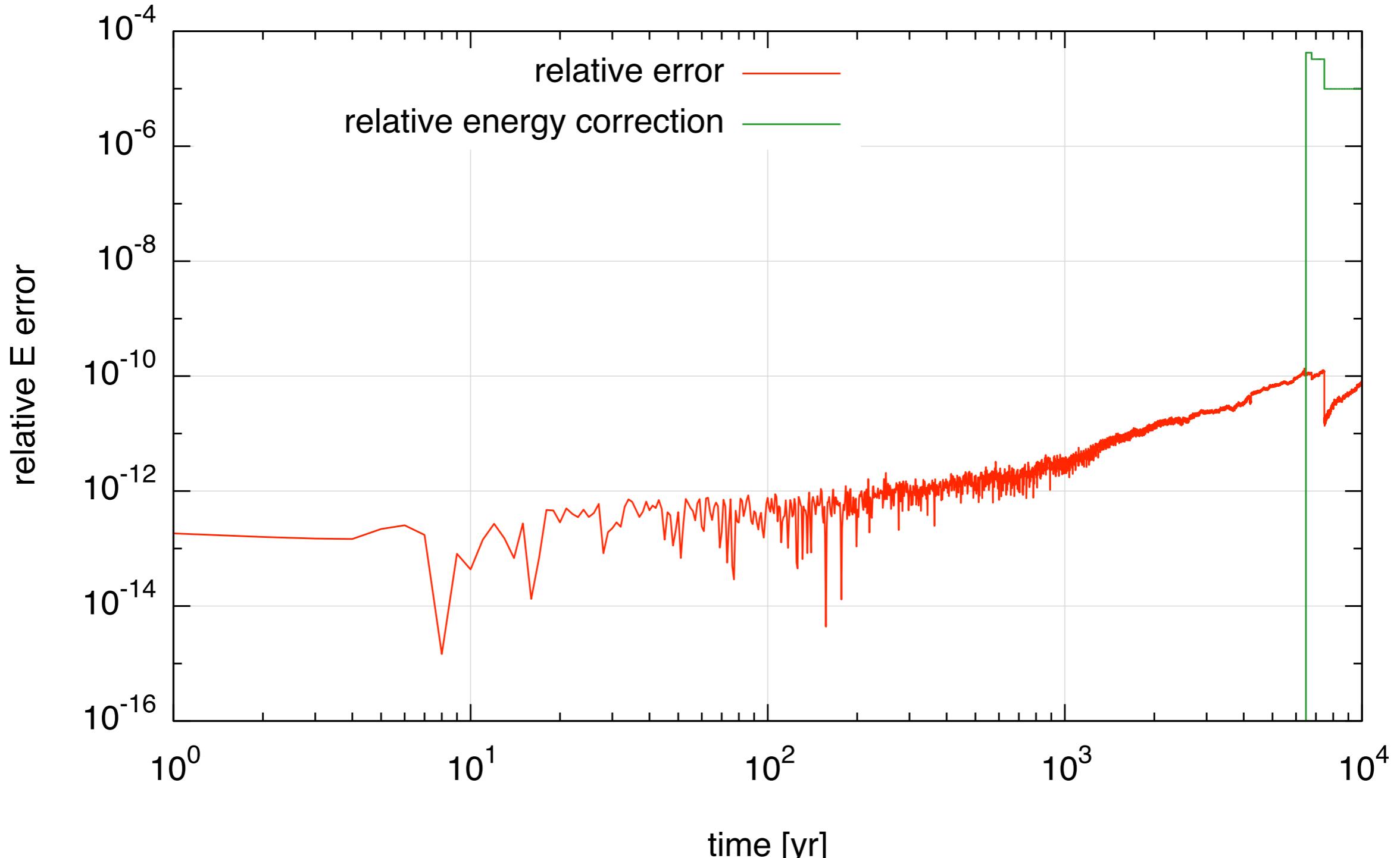
6 Hill

$\Delta a = 6 [R_H]$

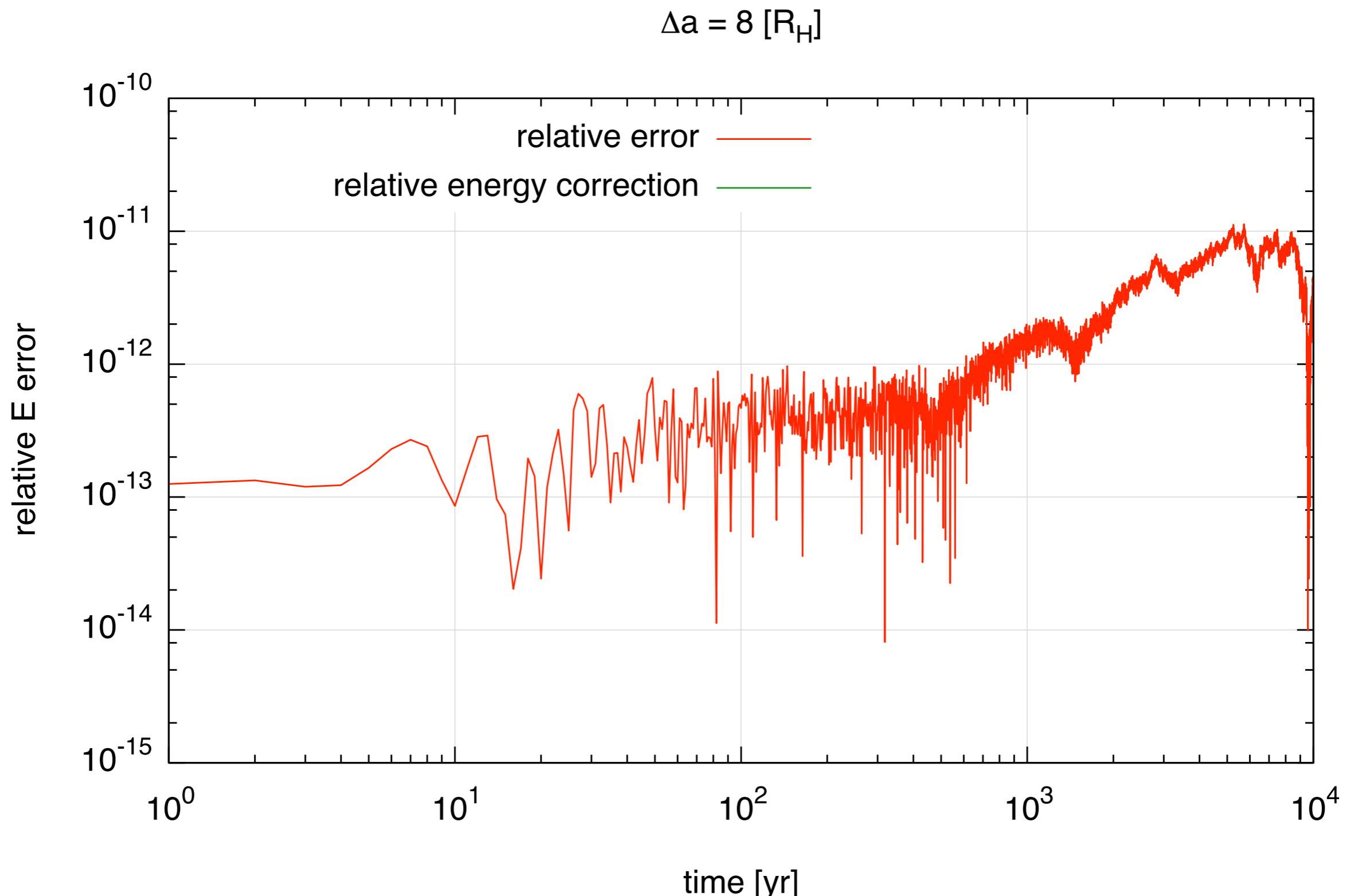


7 Hill

$\Delta a = 7 [R_H]$

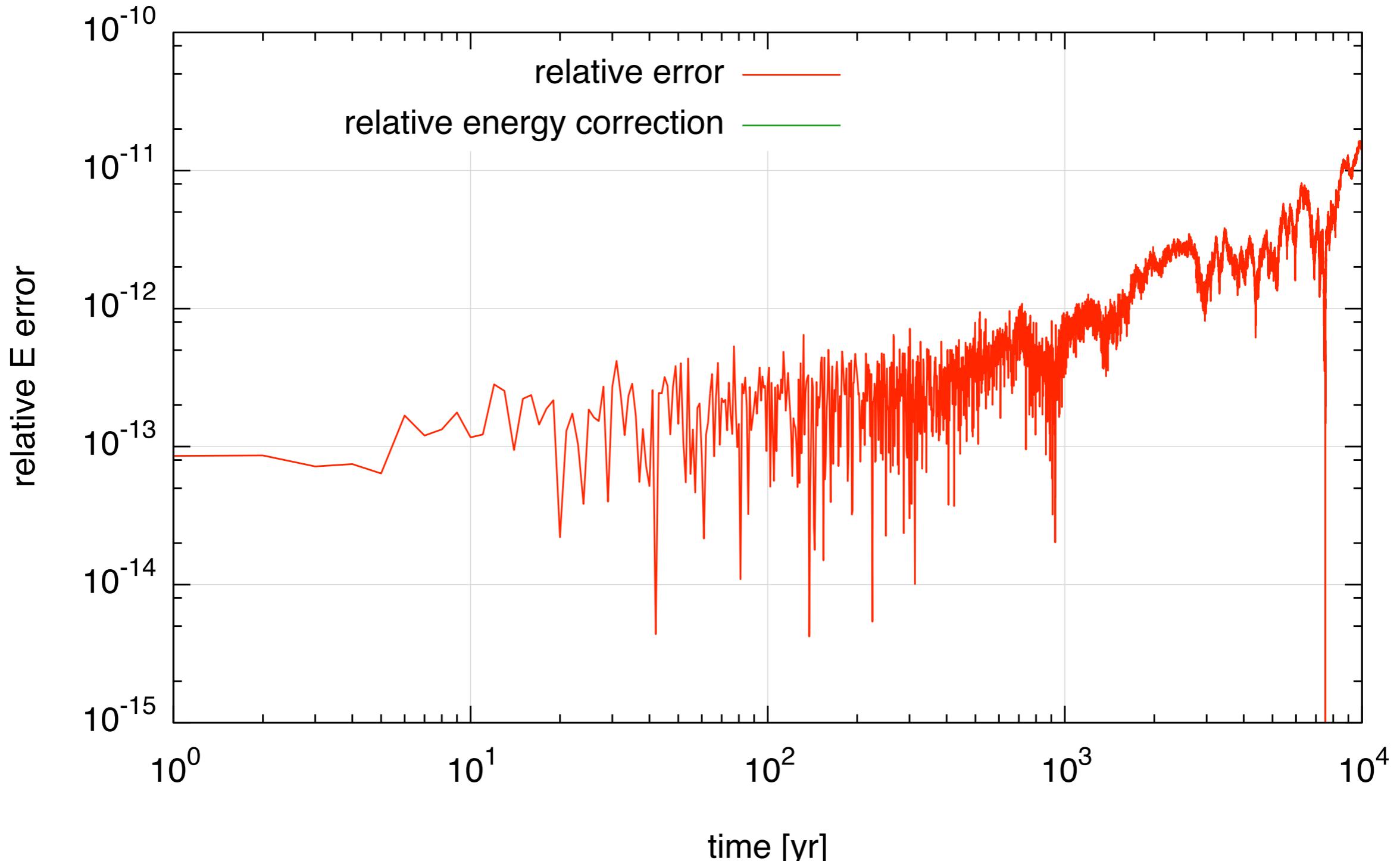


8 Hill



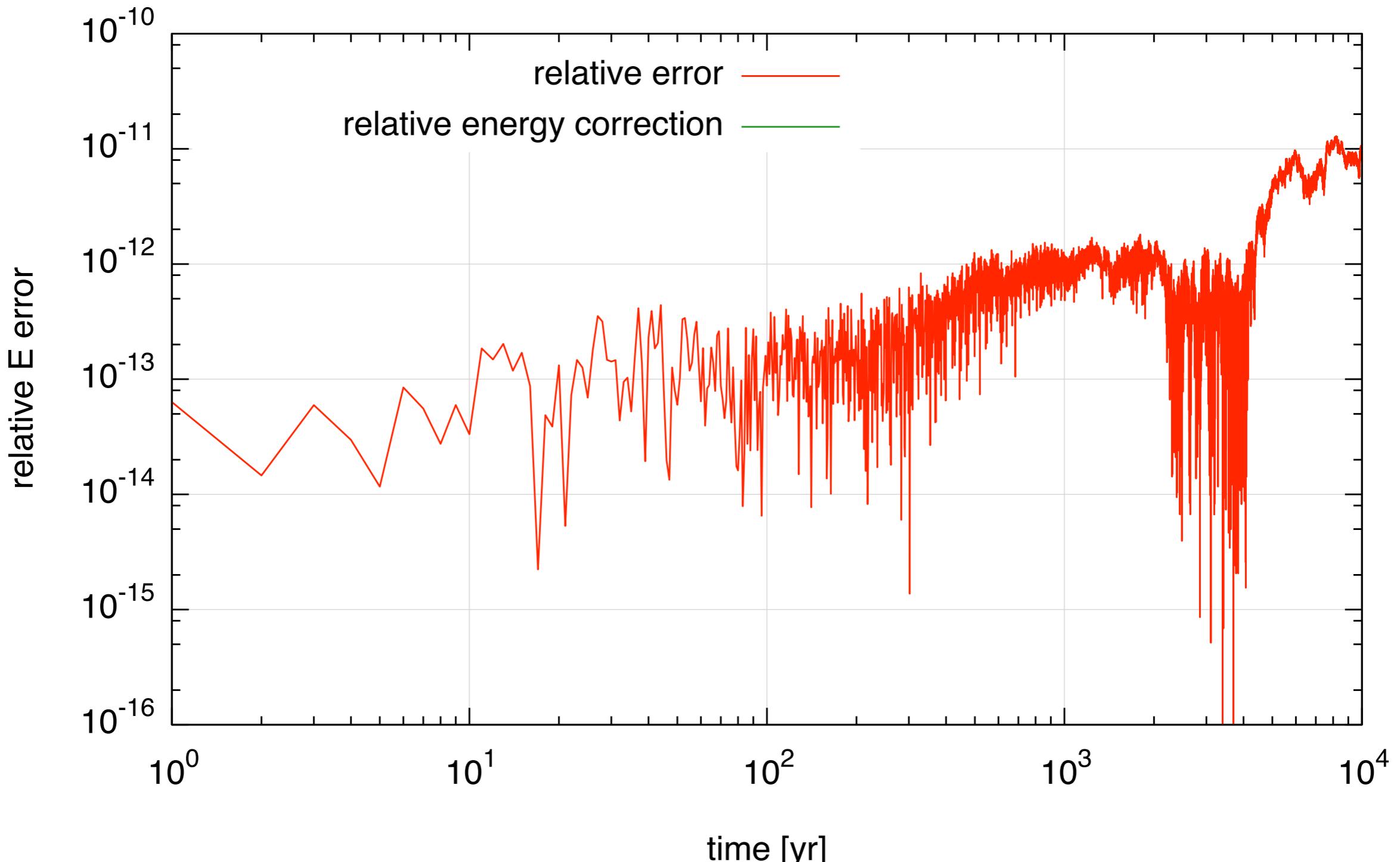
9 Hill

$\Delta a = 9 [R_H]$

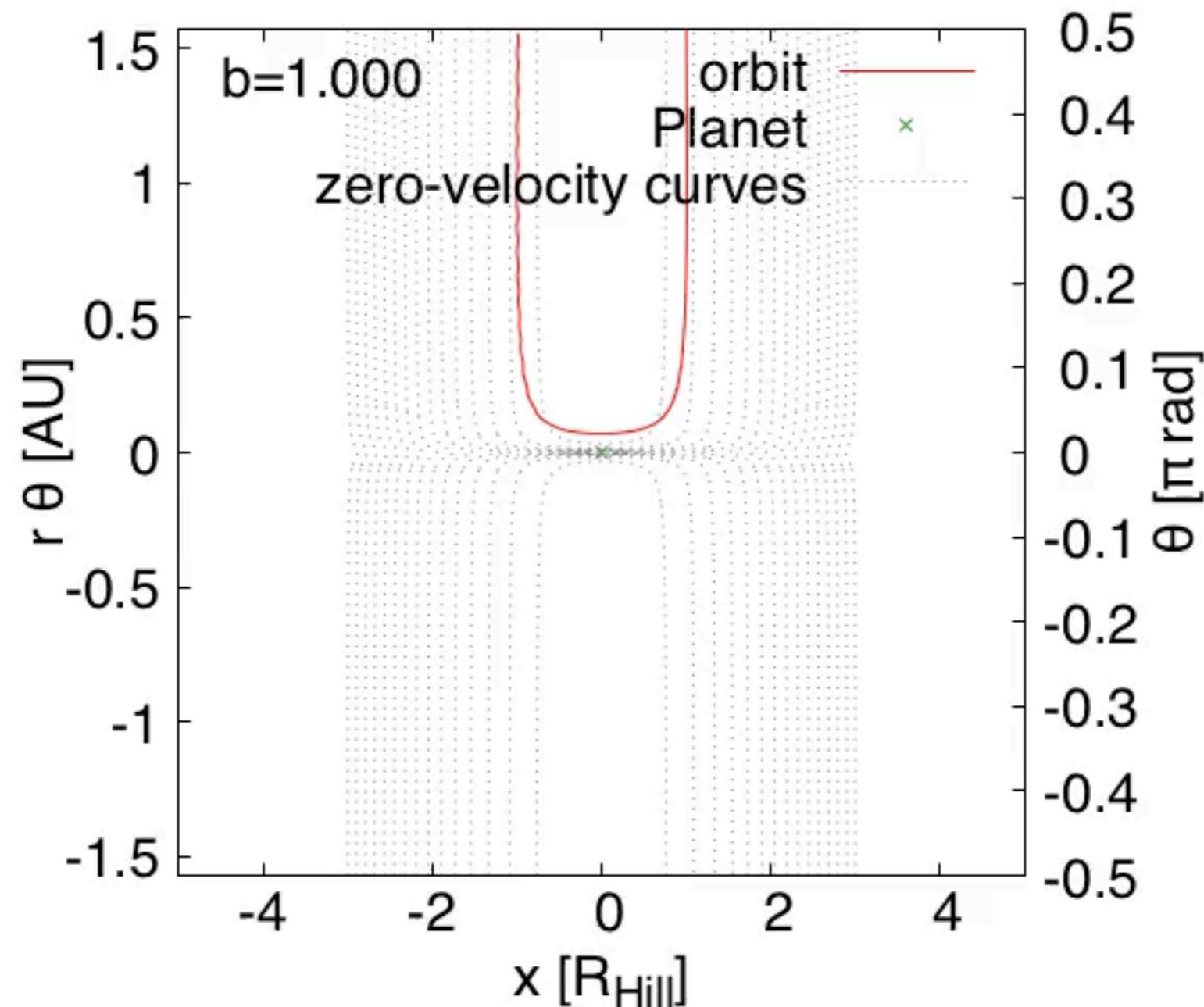


10 Hill

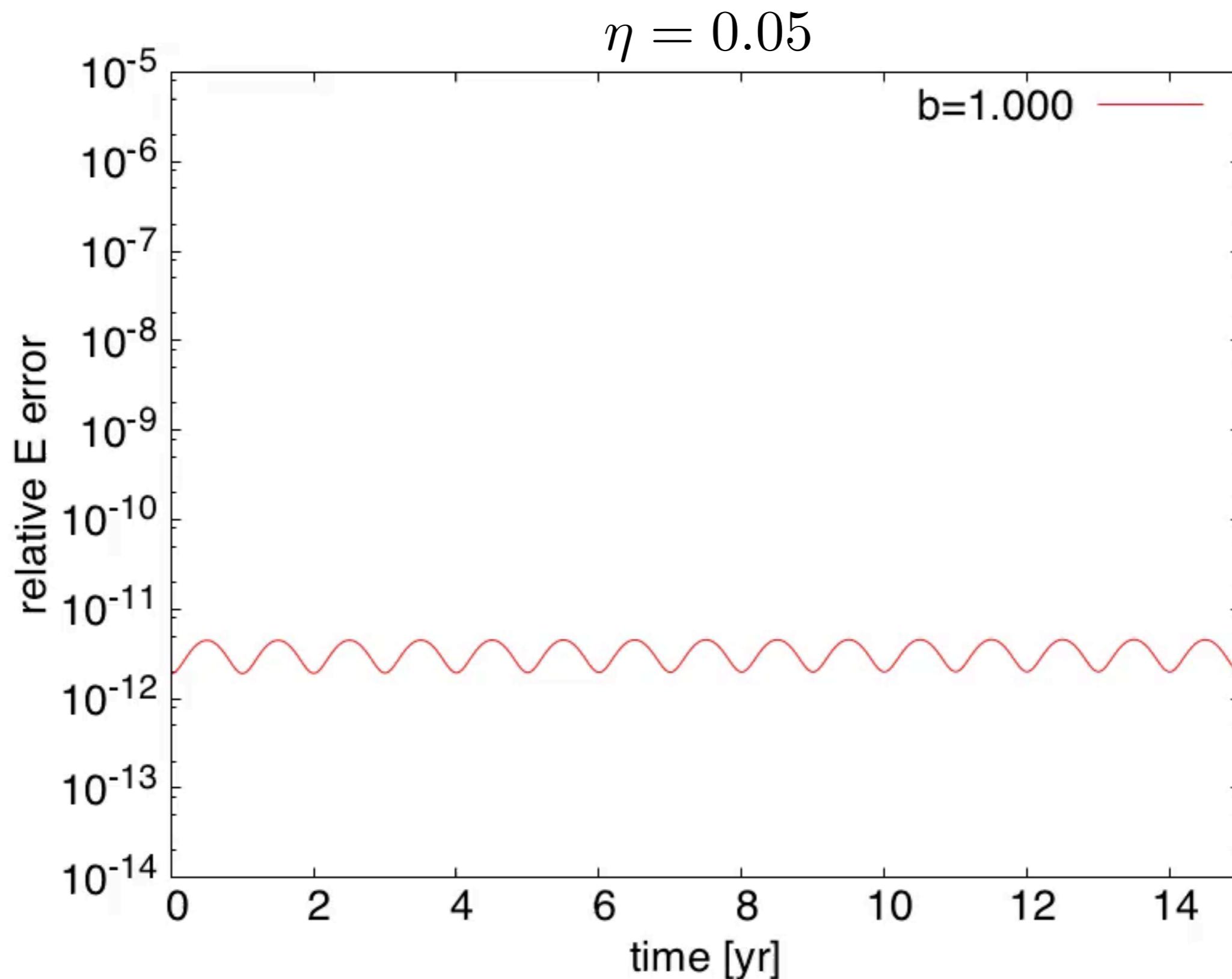
$\Delta a = 10 [R_H]$



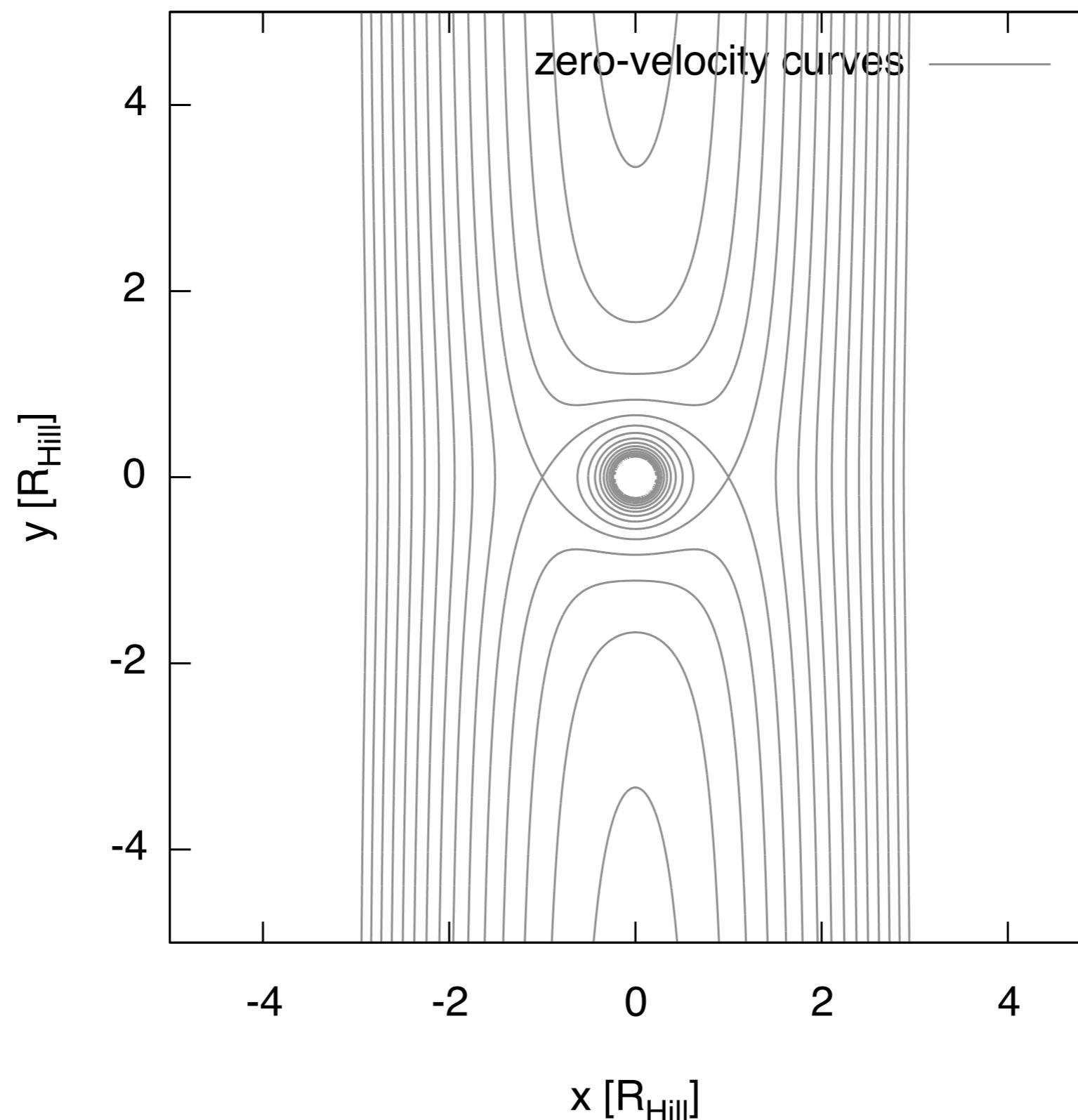
角度方向に長いヒル座標での微惑星



重力散乱前後の相対エネルギー誤差



ヒル巻とゼロ速度曲線



角度方向に長いヒル座標でのゼロ速度曲線

