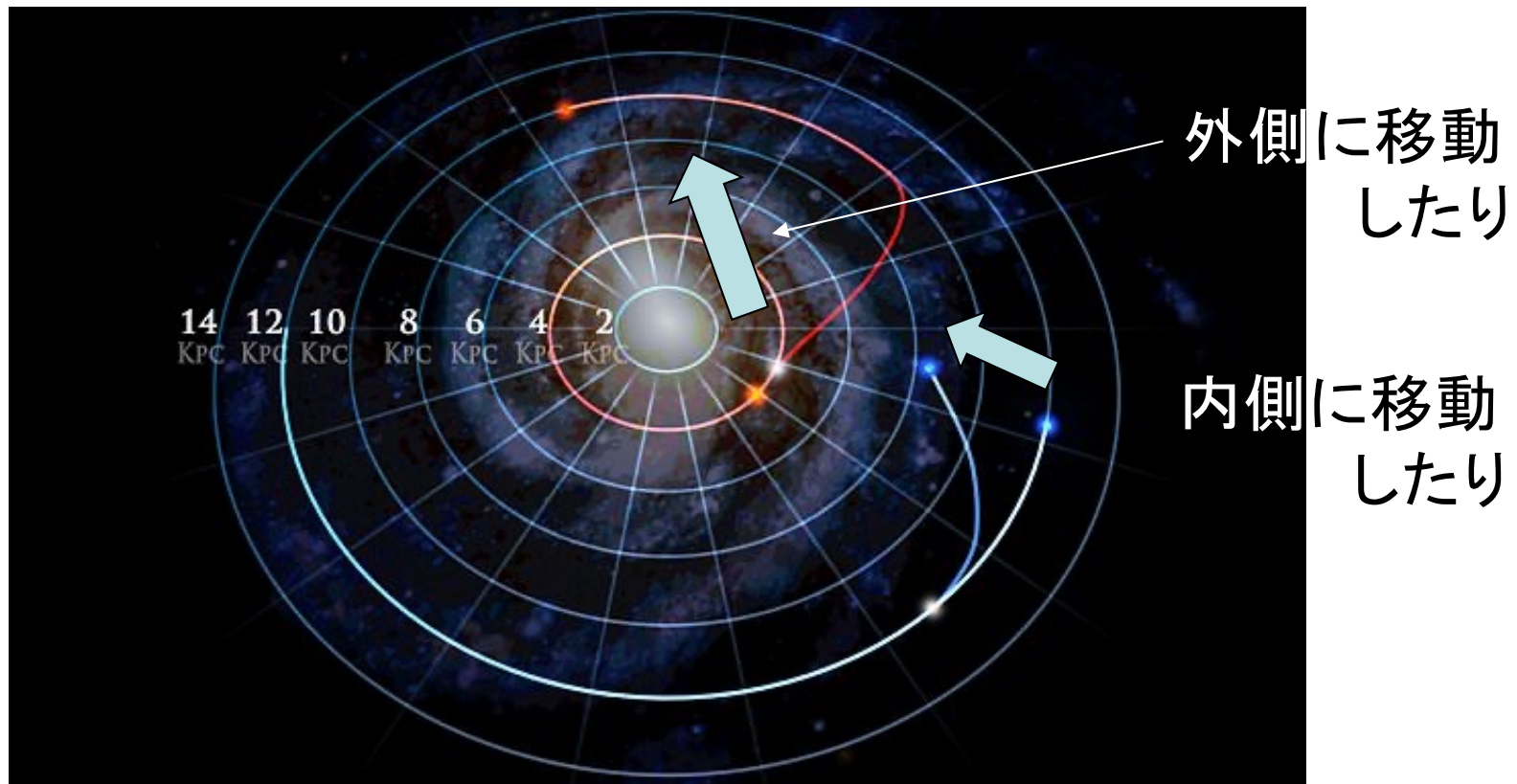


太陽系の銀河内軌道変化と地球の寒冷化

辻本拓司(国立天文台)

星は銀河面を動径方向に移動する(: radial migration)



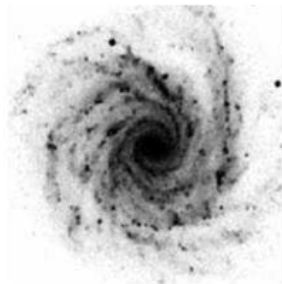
@Danna Berry

我々の銀河(銀河系)



銀河系の仲間達

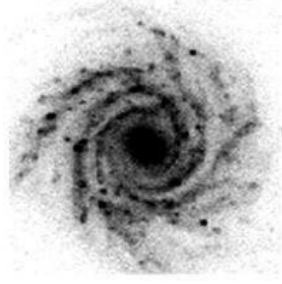
Sc(rs)



NGC 1232

SBbc(r)

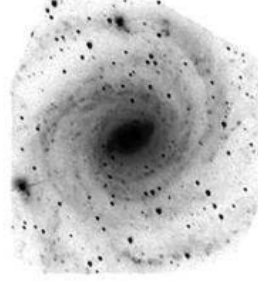
Sb(r)



NGC 1288

SBbc(r)

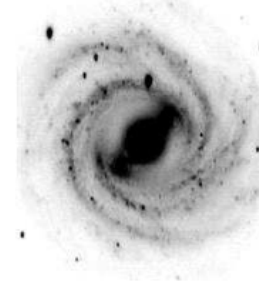
Sb(r)



NGC 6384

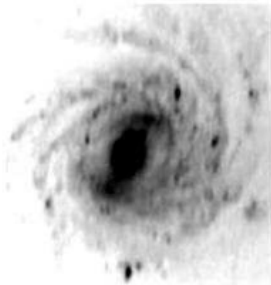
SBc(rs)

SBb(rs)

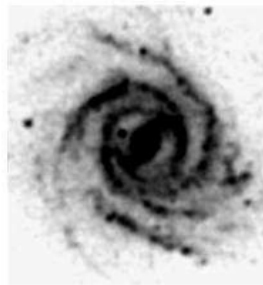


NGC 3992

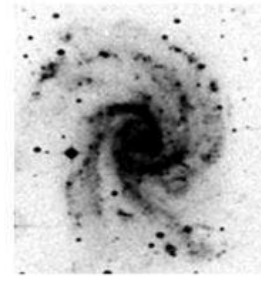
SBbc(r)



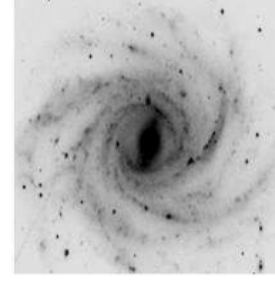
NGC 3953



NGC 3124



NGC 2835



NGC 2336

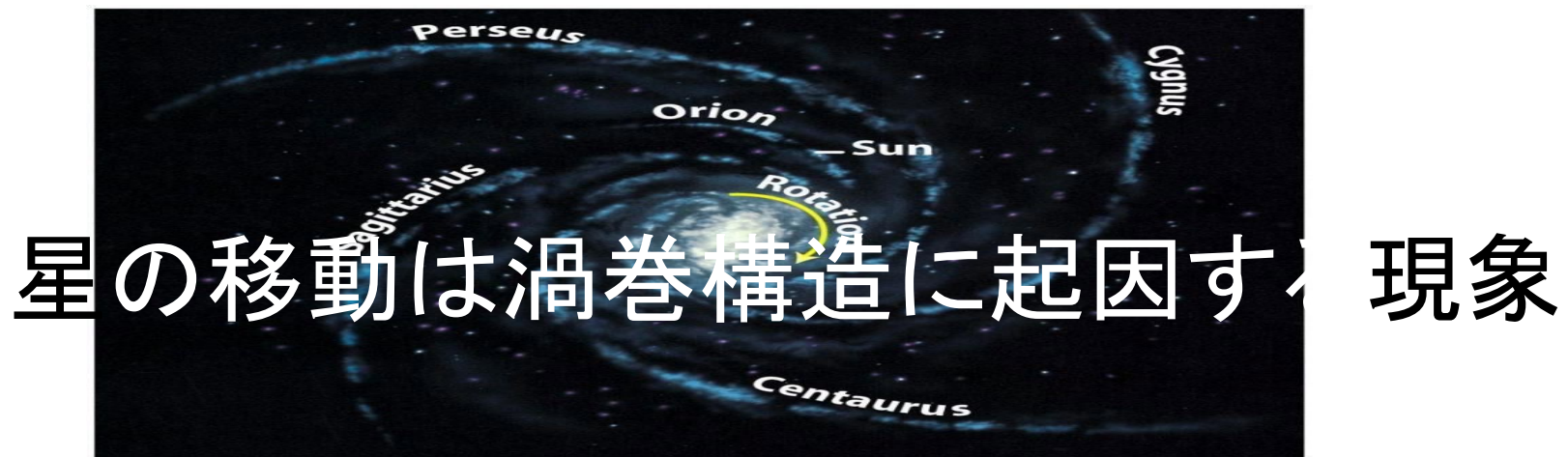
銀河ディスク

バルジ

渦状腕

(spiral arm)

は顕著な力学構造



- ✓ 最初に指摘されたのは1970年頃 (Lynden-Bell & Kalnajs 1972)

“星の移動が起こりうる”

- ✓ spiral armへの理解の転換 (Sellwood & Binney 2002)

“星の移動は普通に起きる”. radial migration

- ✓ radial migrationが“市民権を得る” (Roskar+ 2008)

何故か？

化学進化へのインパクトを確認

+ 銀河形成進化数値シミュレーションの飛躍的な進

新しいspiral arm (渦状腕)の描像

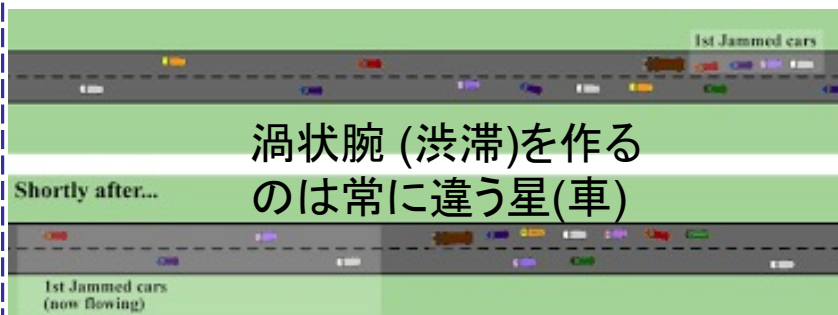
ここ10年における大きな進展

その多くが数値シミュレーションの高精度化による

古典的な描像: spiral arm = density wave: 密度波理論

(Lin & Shu 1964~)

銀河の渦巻腕は、その時点での星の粗密を反映している



✓ 渦状腕は長い時間(数10億年)維持される

✓ 星は渦状腕を通過するだけ

渦状腕: 実体のあるもの = 自己重力で形成された星の高密度領域が
差動回転で引き延ばされた構造

渦状腕は一時的(短寿命 \approx 1億年)で生成消滅を繰り返す

星は渦状腕と遭遇すると角運動量の獲得 / 損失が起きて移動する

星の大移動の重要性

I. 銀河化学進化へのインパクト

銀河の化学進化の基本は太陽近傍の化学進化

(太陽近傍星の化学組成の進化)

“太陽近傍星は様々なディスク上の場所で生まれた星の集合体

II. 太陽系の起源(どこで生まれたか)と進化(移動)への論点

太陽系は現在の位置で生まれたのではなく、
大移動した可能性が高い

太陽組成&太陽系物質の起源を考える上で重要

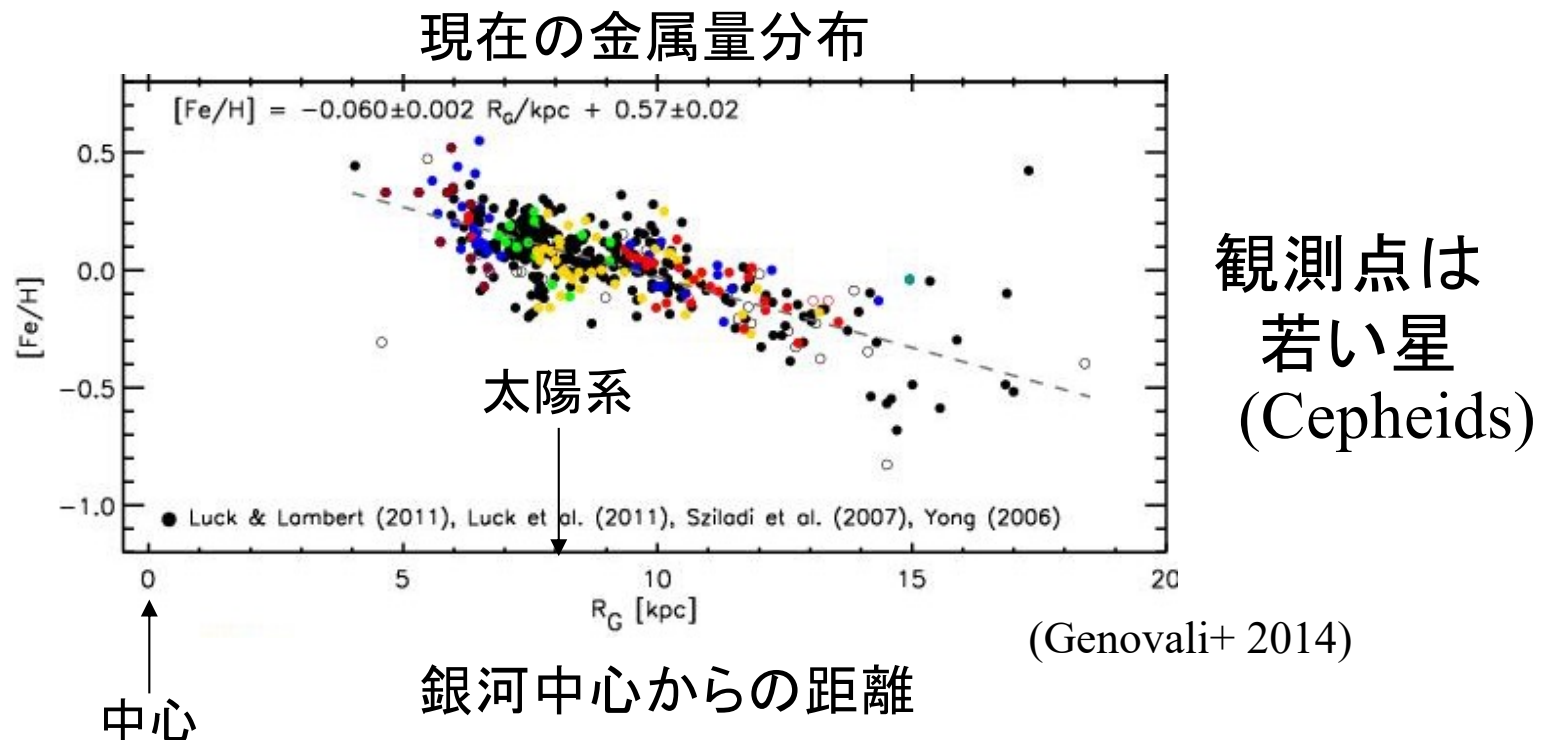
地球ニュートリノ生成源であるU, Thの含有量は如何にして決まったの

I. 化学進化へのインパクト

化学進化はディスクの場所(銀河中心からの距離の違い)によって異なる

“観測的証拠”

金属量勾配がある: 銀河の中心に近いほど、金属量が高い



金属量勾配の理論的解釈



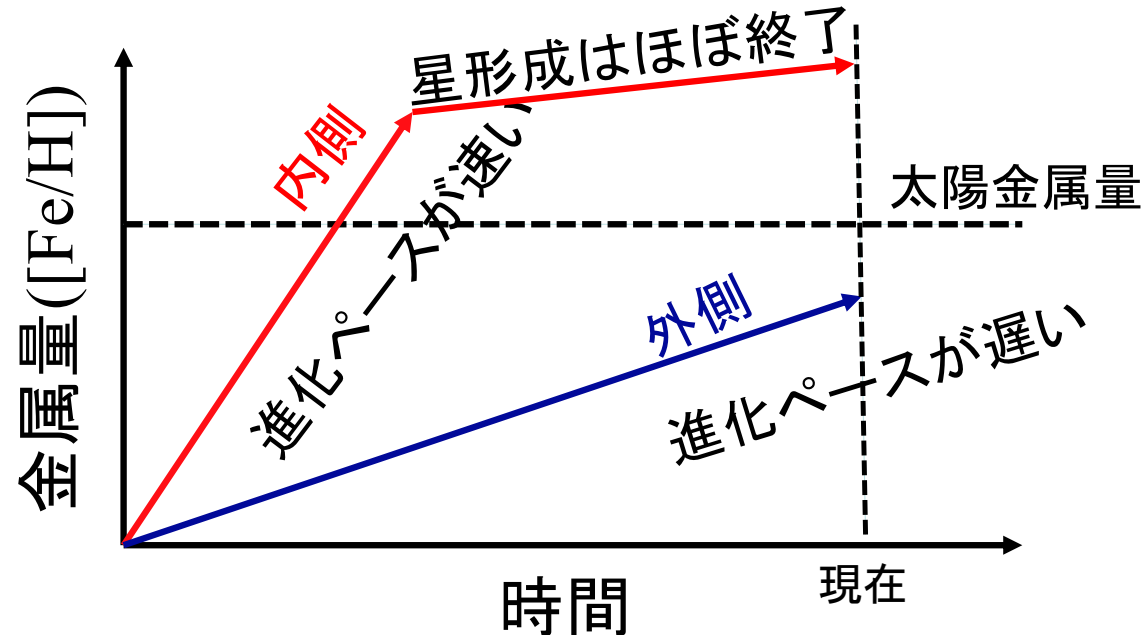
“inside-out scenario”

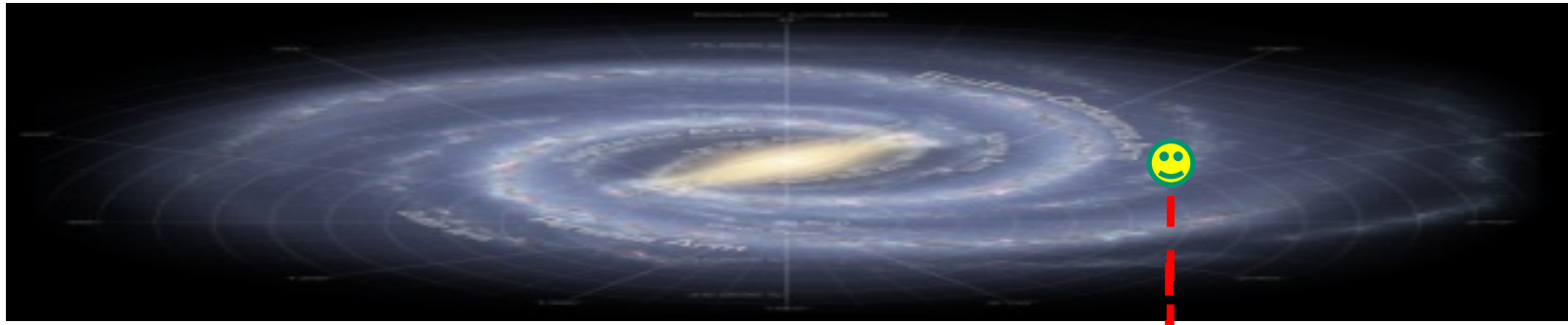
銀河系の内側ほど星形成が活発な中、速く形成され金属量が高くなっ

異なる化学進化パス

内側ディスク: 昔に短いタイムスケールで形成され金属量が高くまでい

外側ディスク: ゆっくりと現在にわたって形成され、現在の金属量は低

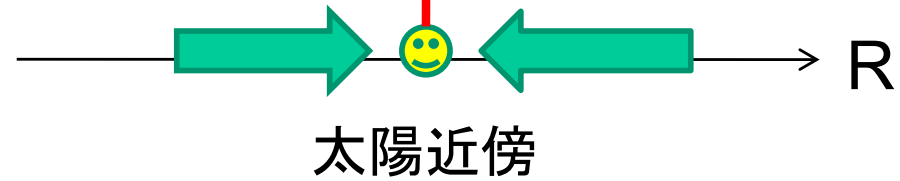




角運動量を得た星

角運動量を失った星

太陽近傍には内側からも
外側からも星が移動してくる

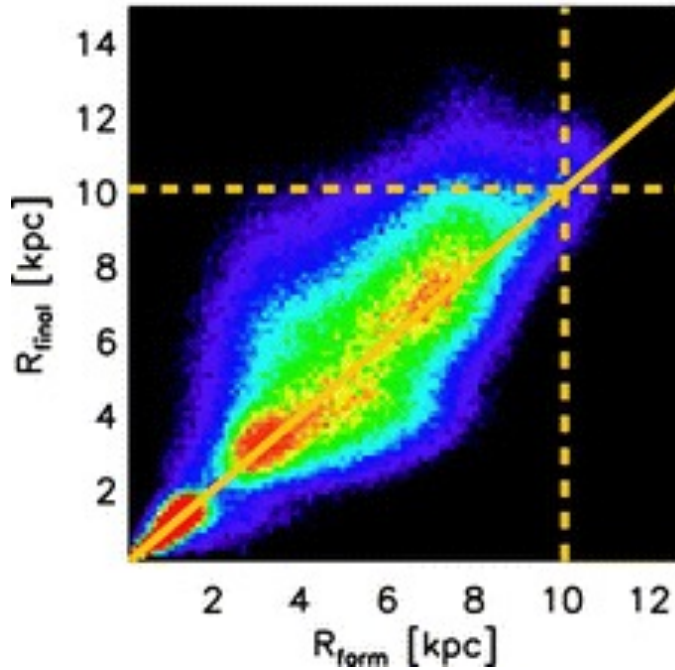


太陽近傍

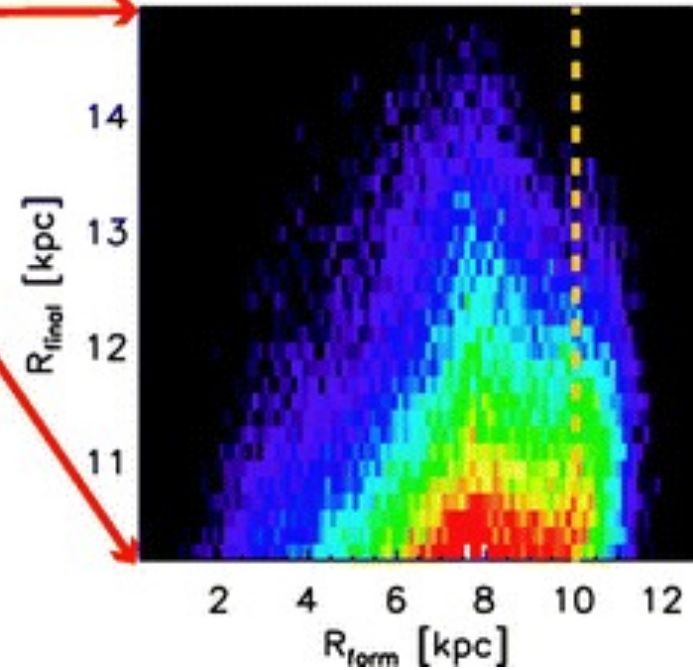
数値計算結果の一例

化学進化パス
が異なる

現在位置



生まれた位置

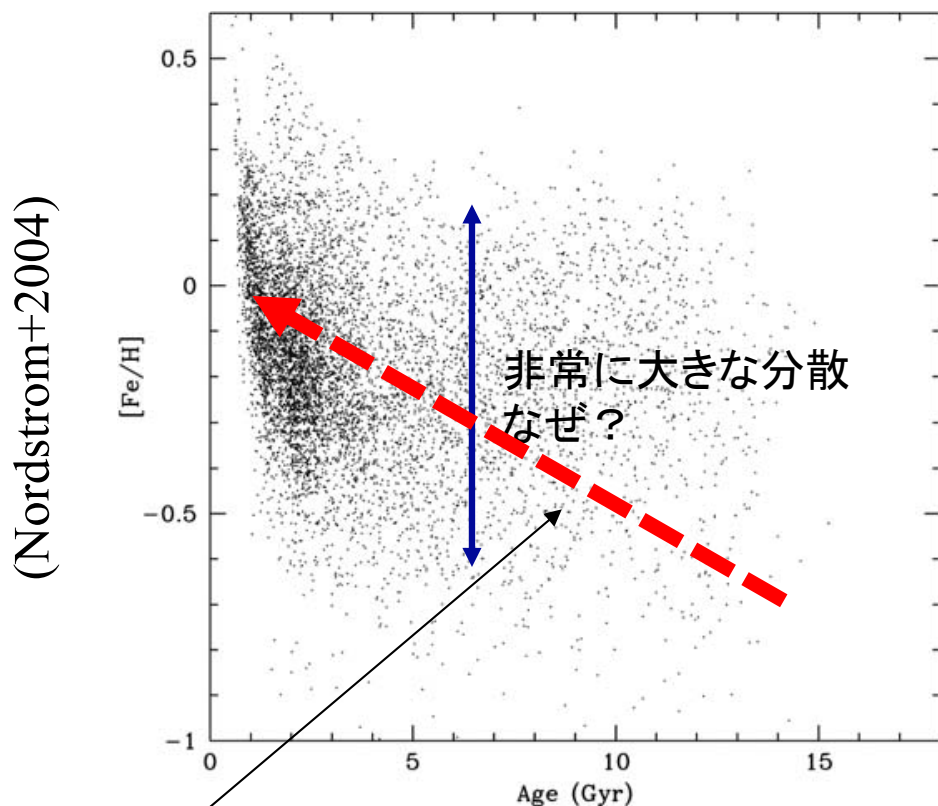


(Roskar+ 2008)

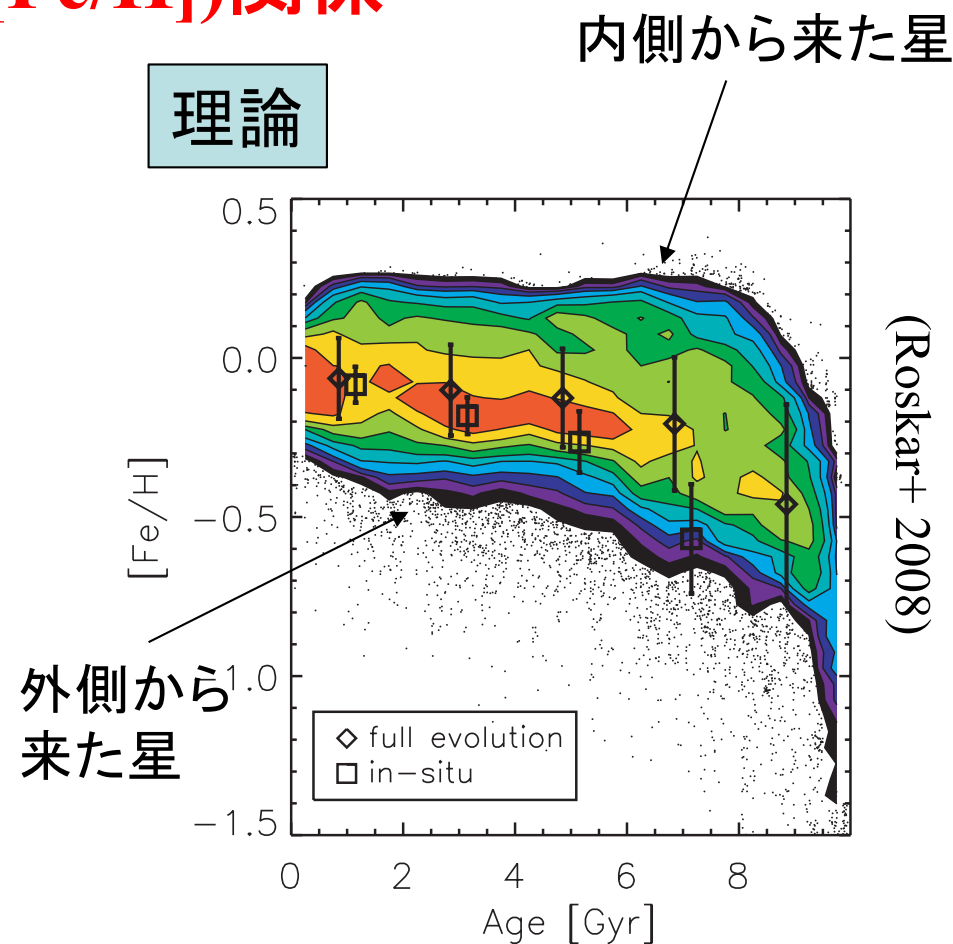
うまく説明できる観測事実I

年齢—金属量([Fe/H])関係

観測



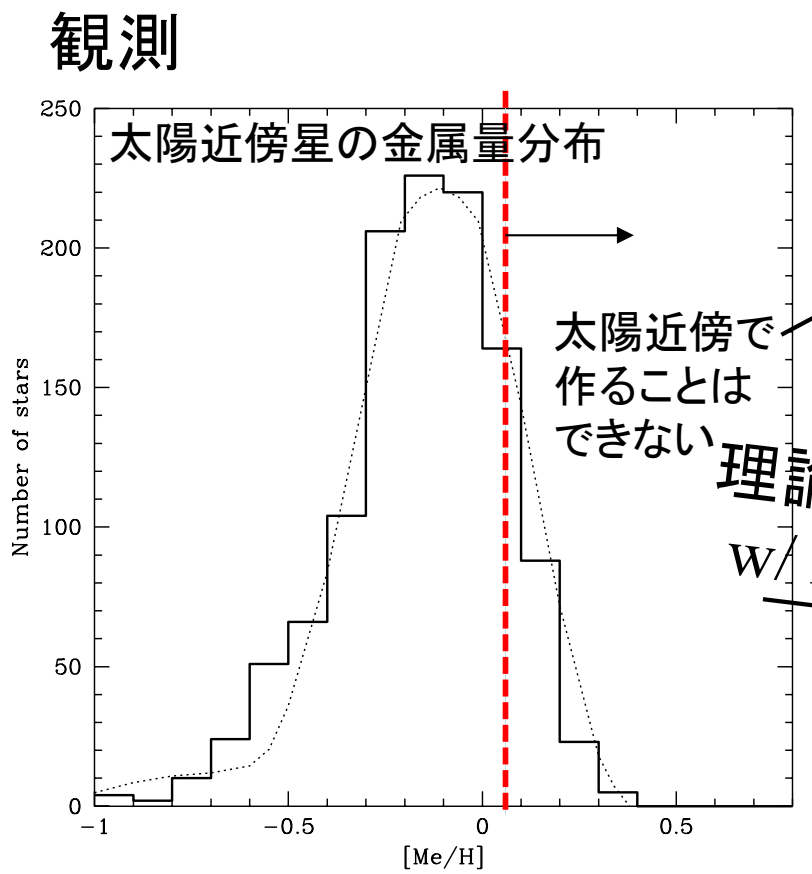
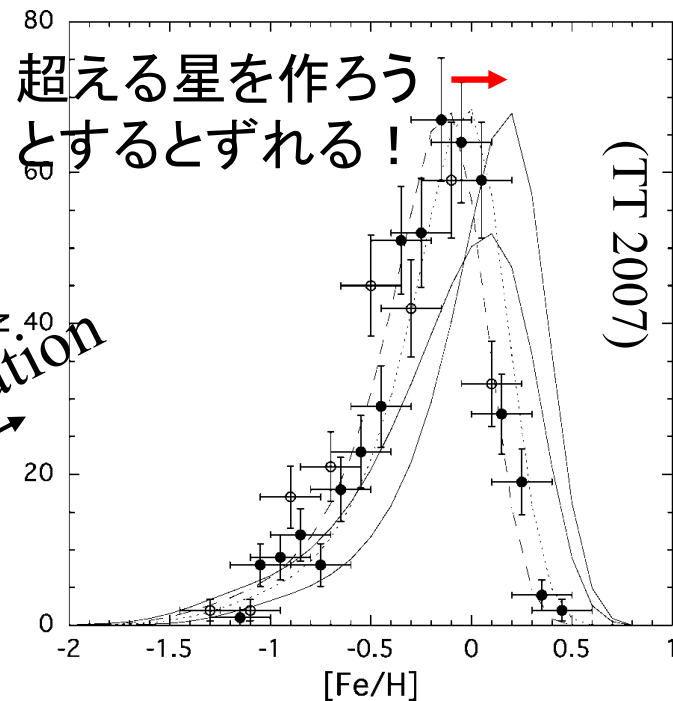
理論



本来ならこのような相関が見えるはず ➡ 色々な年齢—[Fe/H]関係を持つ星のごちゃ混ぜのため見えない

うまく説明できる観測事実I

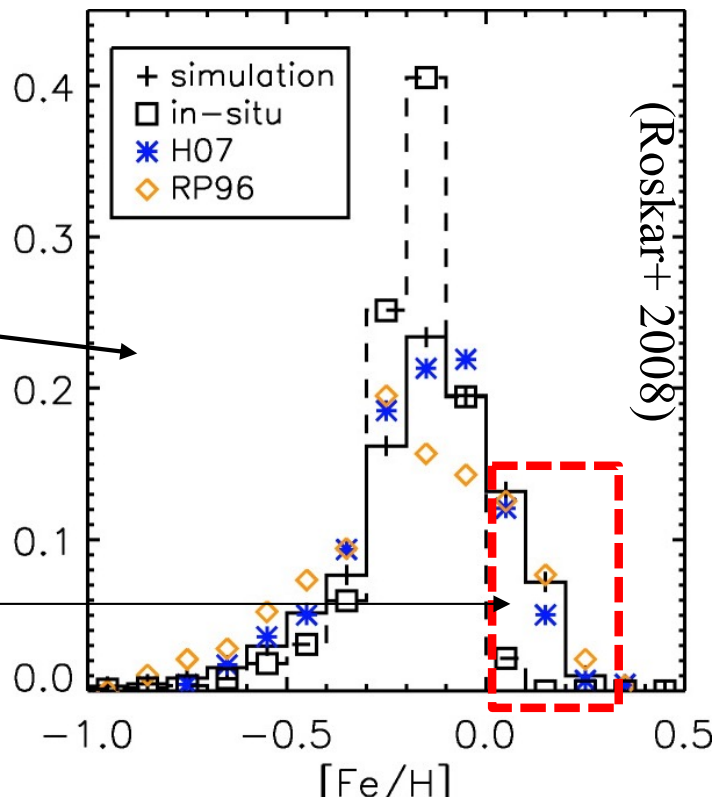
金属量リッチ($[Fe/H]>0$)星の存在



理論1:
w/o radial migration

理論2:
w/ radial migration

内側から来た
星々

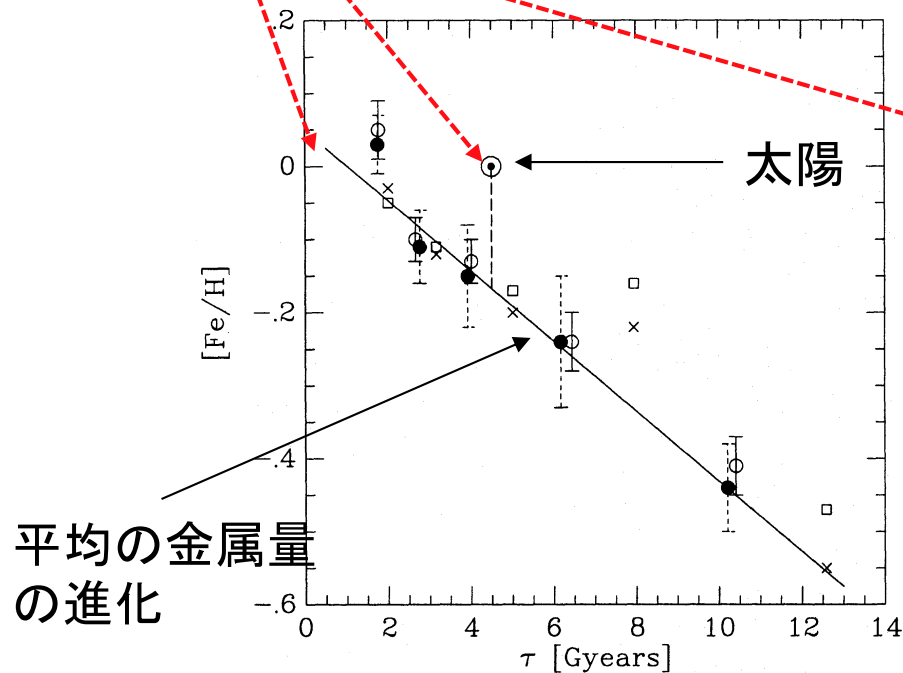


(Nordstrom+2004)
太陽金属量を超える星は
20%程度存在するが、太陽近傍では作れない!

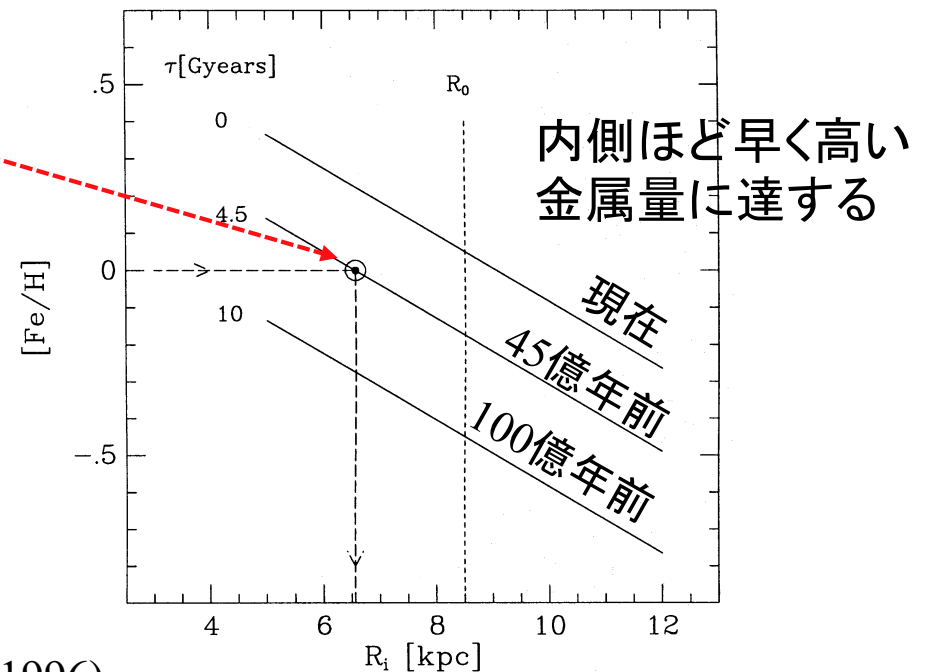
II. 太陽系も移動してきた星々の仲間

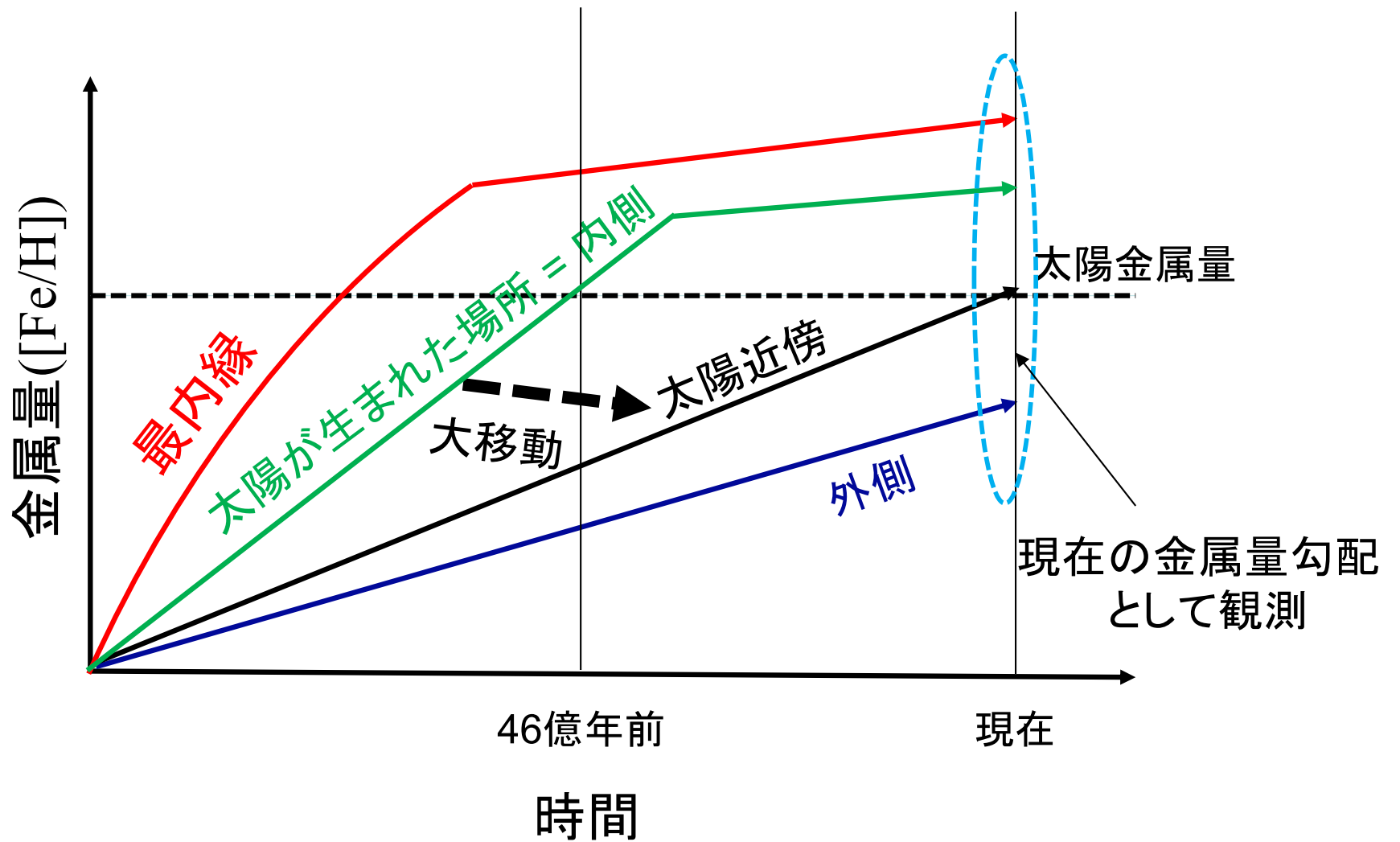
太陽系は現在の位置よりもっと内側で生まれた

- ✓ 太陽系は46億年前に太陽金属量になった (環境で生まれた)
- ✓ ところが、太陽近傍の現在の金属量は太陽金属量である
- ✓ 46億年前に太陽金属量に到達した領域で太陽系は生まれ:



(Wielen+ 1996)



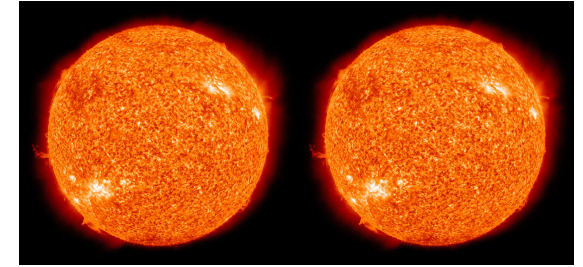


星の大移動は決して他人事ではなく
太陽系も経験したこと

さらに、

銀河系最内縁部で生まれたことが示唆

太陽双子星 (solar twin)



- ✓ 温度 ($\leq 100K$)、表面重力 (対数值: ≤ 0.1)、 $[Fe/H]$ (≤ 0.1) が太陽とほぼ同じ星々
- ✓ 太陽近傍($\leq 100pc$)に79個
- ✓ 正確に化学組成 (誤差1-2%)、**年齢** (誤差4億年)を評価できる
- ✓ 年齢は0 – 8 Gyrに分布 **重要！双子星は太陽金属量を持つ！**

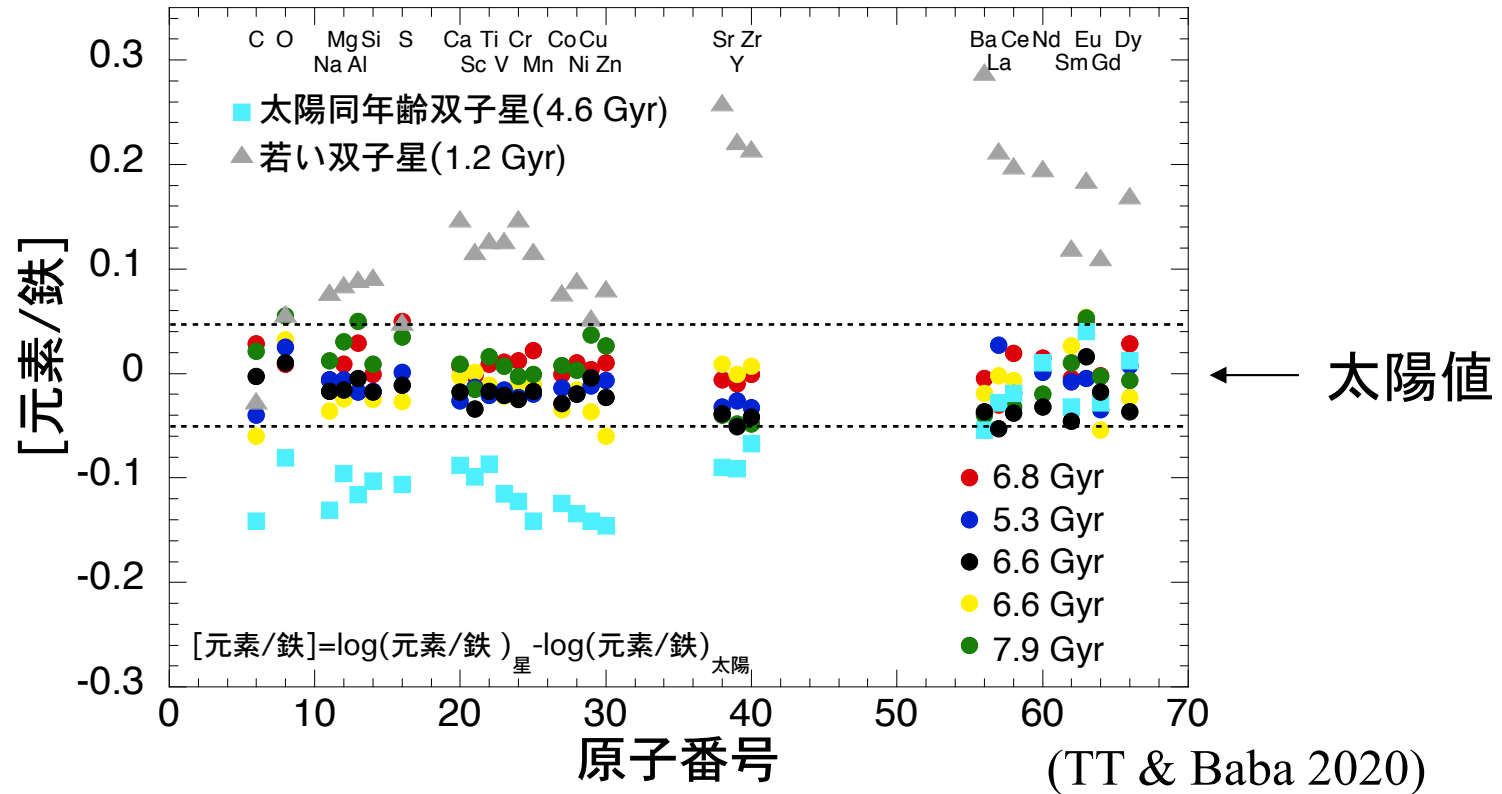
➡ 太陽近傍星は色々な場所からやってきた証拠

- ✓ 星の化学組成は身分証明書の役割を持つ

➡ 生まれ故郷を同定できる！



太陽と太陽双子星の化学組成の比較



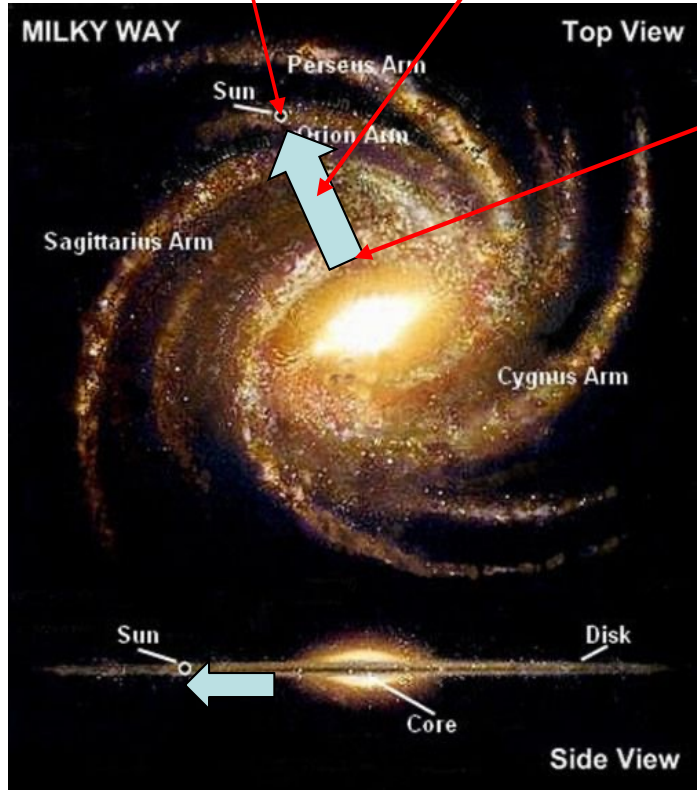
太陽組成は年齢が**~70億歳の双子星の組成**と合致する

→ 太陽は~70億歳の双子星と生まれ場所を共有する

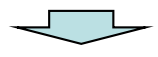
→ ~70億歳の双子星はどこで生まれたか？

→ 銀河系ディスクの最内縁部 (バルジの隣)

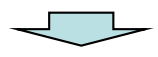
現在位置
46億年
で
大移動



薄いディスクの形成開始は
およそ80-90億年前



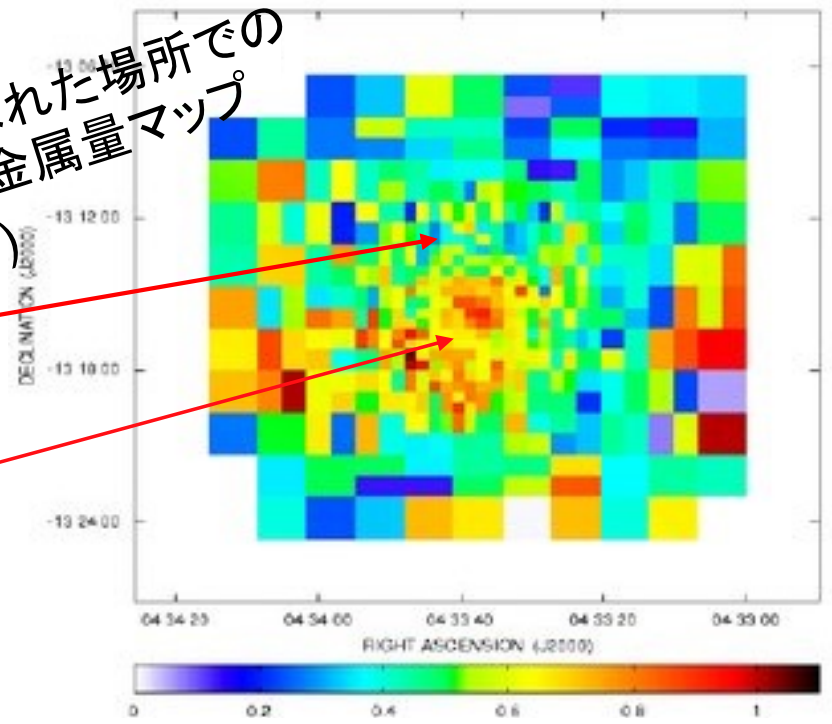
10~20億年で太陽金属量に到達できるのは
誕生地 ディスク最内縁部しかない



70億年前に平均金属量が太陽値になったという

太陽系は46億年前に相対的に金属量が低い場所で生まれた(その際の平均金属量は太陽値より高かった)

太陽系が生まれた場所での
46億年前の金属量マップ
(イメージ)



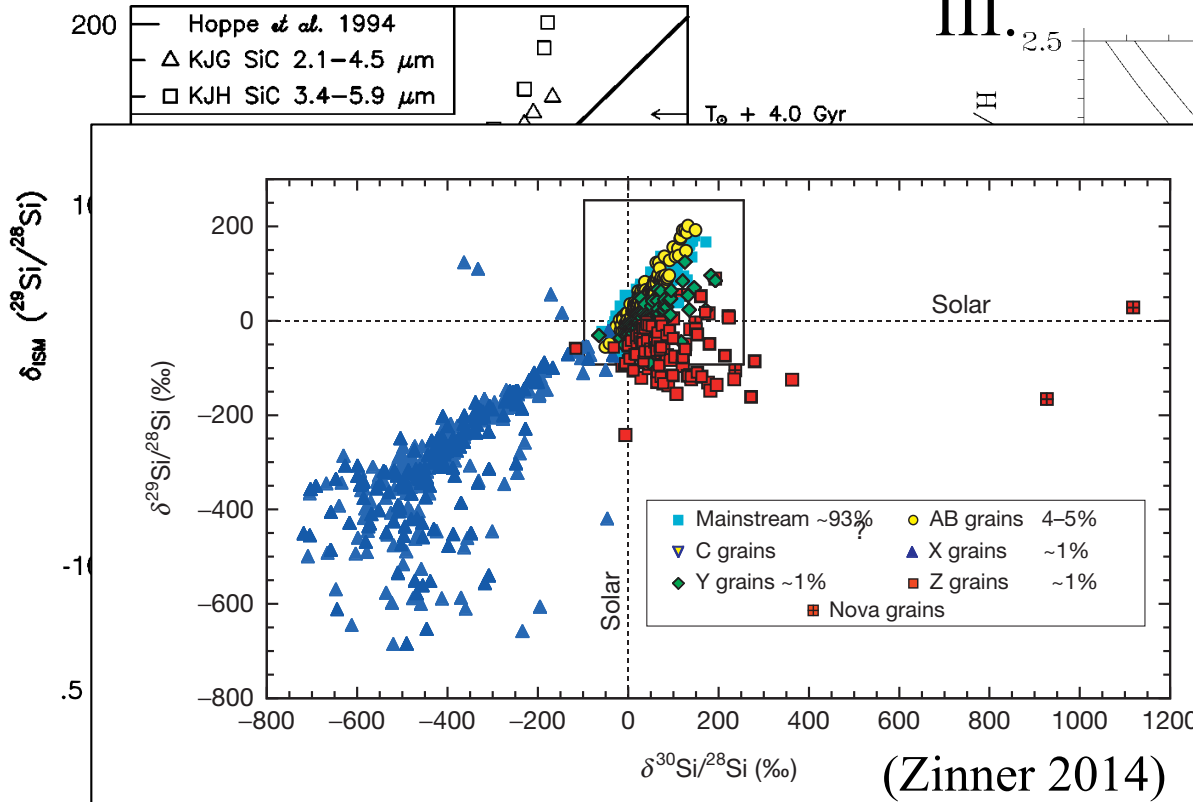
太陽系は低金属量ポケット
([Fe/H]=0)で生まれた

平均金属量は[Fe/H]>0

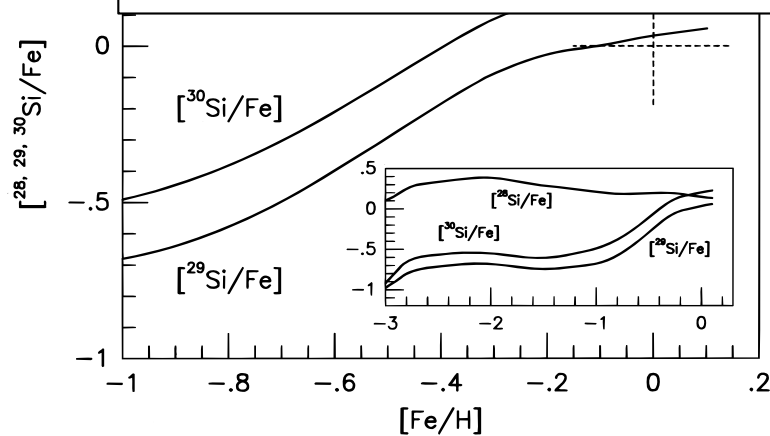
プレソーラー粒子が示唆する金属量リッチな星の存在

プレソーラー粒子の同位体組成比

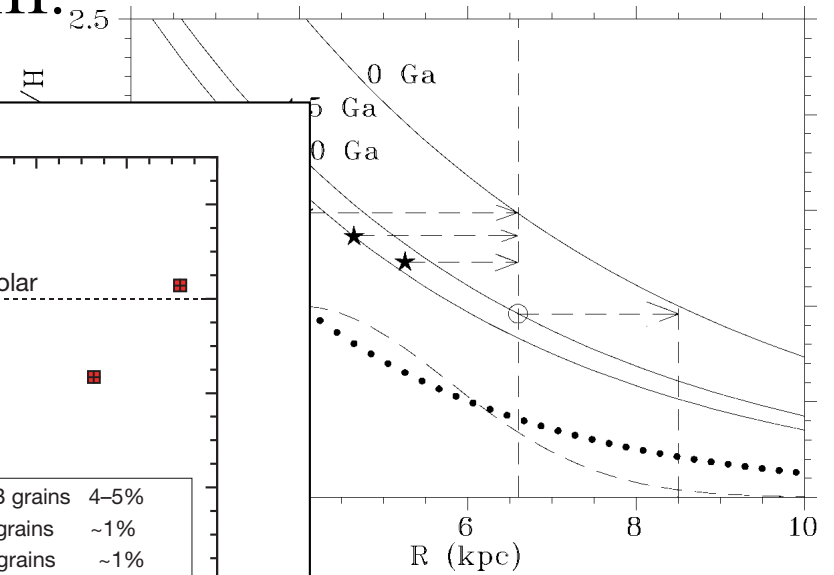
I.



II.



III.



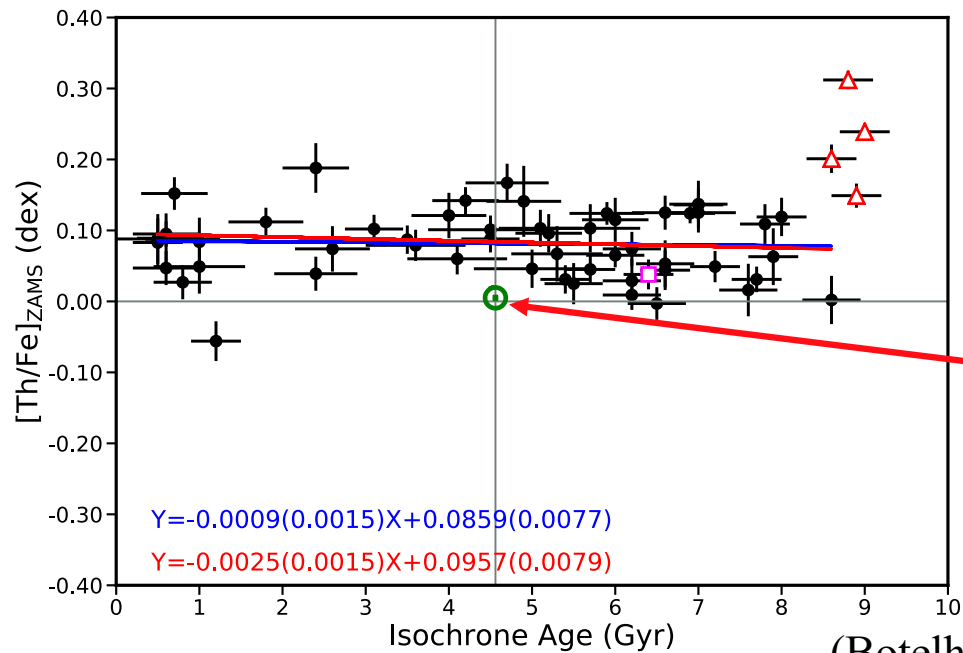
$^{29}\text{Si}/^{28}\text{Si}$, $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ 比の
より高い

II. ^{29}Si , ^{30}Si は ^{28}Si とは違い、金属量([Fe/H])が
高い環境下で多く作られる傾向がある

III. 惑星系の素材(ダスト)は太陽が生まれた
場所よりもっと内側で形成されたことを示唆

➡ 太陽系は金属量リッチな星々に
囲まれていた

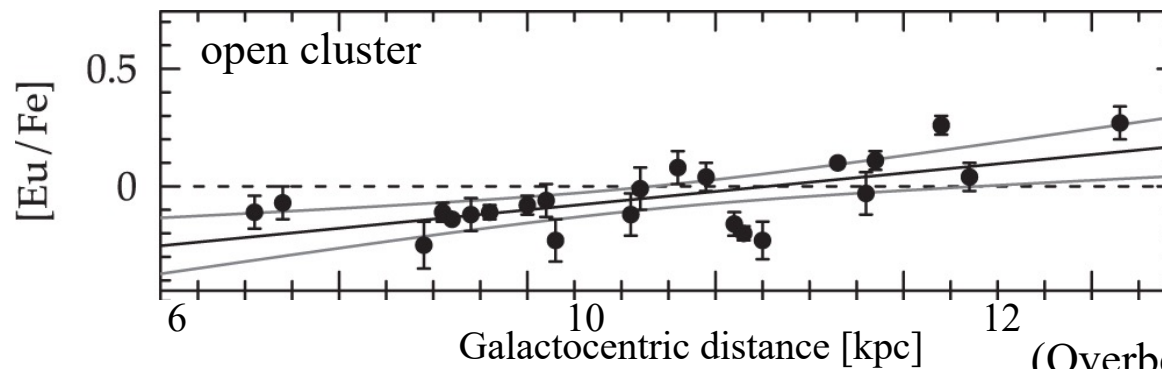
“太陽のTh含有量は双子星の中でも最低値に近い”



(Uについても同じ
傾向が予想される)

太陽

(Botelho+ 2019)



銀河中心に近いほど、
 r -process/Fe比が小さい

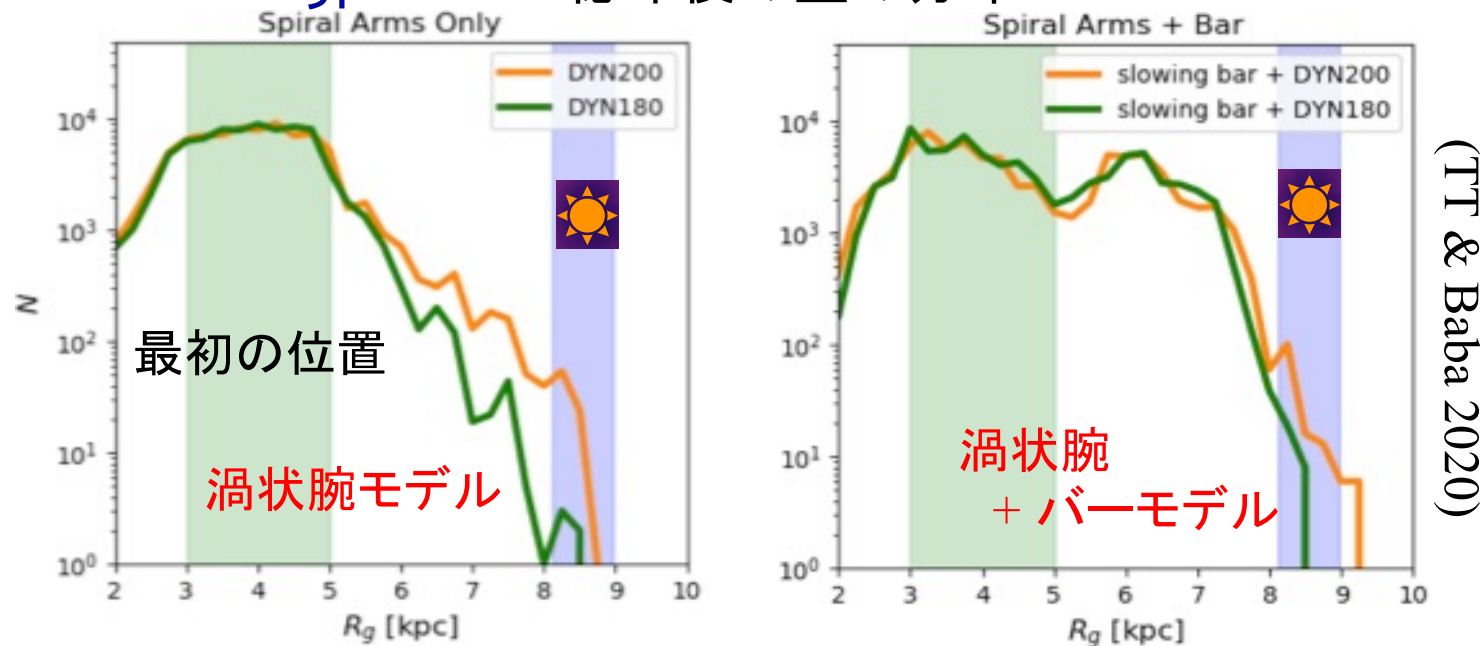
(Overbeek+ 2016)

太陽系が銀河系最内縁部で生まれたことと無矛盾

銀河最内縁部からの移動

太陽系はディスク最内縁部から46億年で現在の位置まで到達できるか？

46億年のディスクの力学進化を計算
46億年後の星の分布



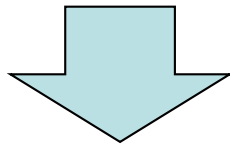
- ✓ 渦状腕との遭遇で到達可能
- ✓ 到達できるのは全体の~0.5%程度
- ✓ 太陽系の移動史は典型的なものではない(可能性)

渦状腕との遭遇

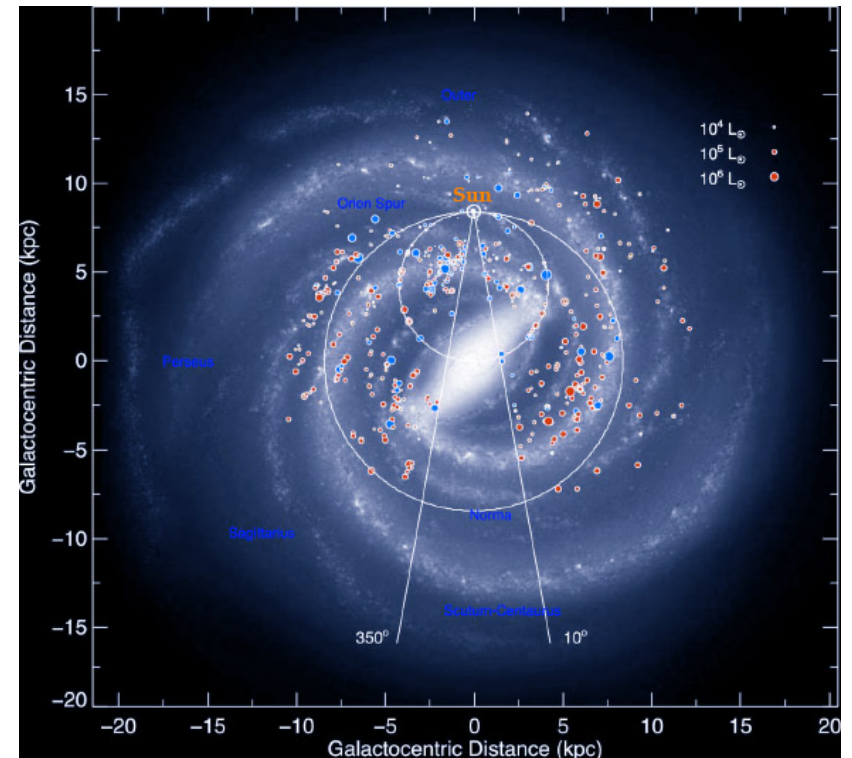
星は渦状腕の中を通過することで移動する

渦状腕：星形成の現場

渦状腕内：
大質量星が多く存在し、超新星爆発など
による宇宙線を含めた高エネルギー粒子が
飛び交う環境



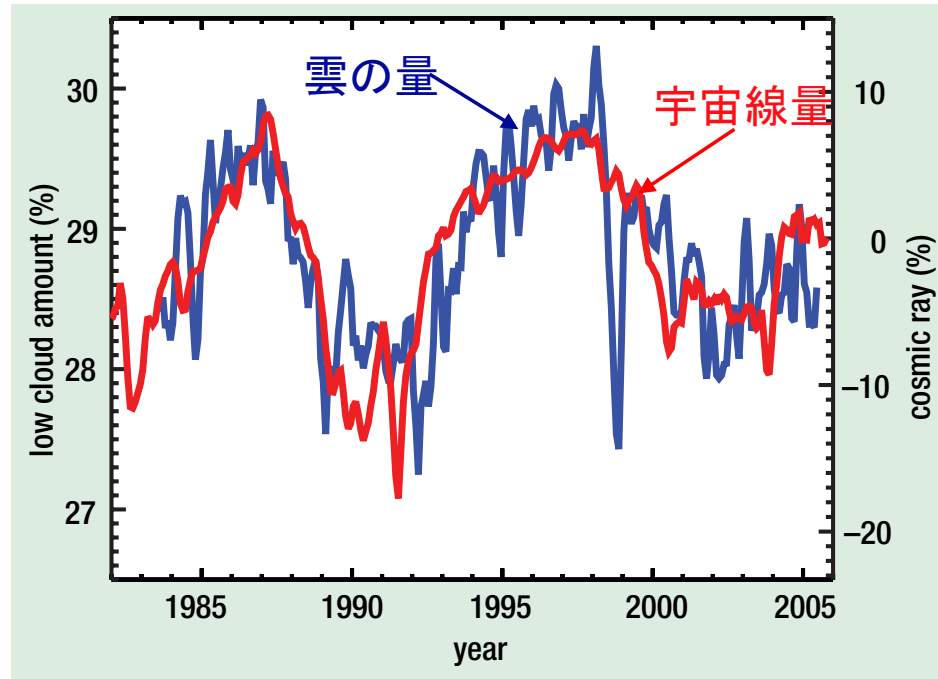
地球の気候へ影響？



● 星形成領域

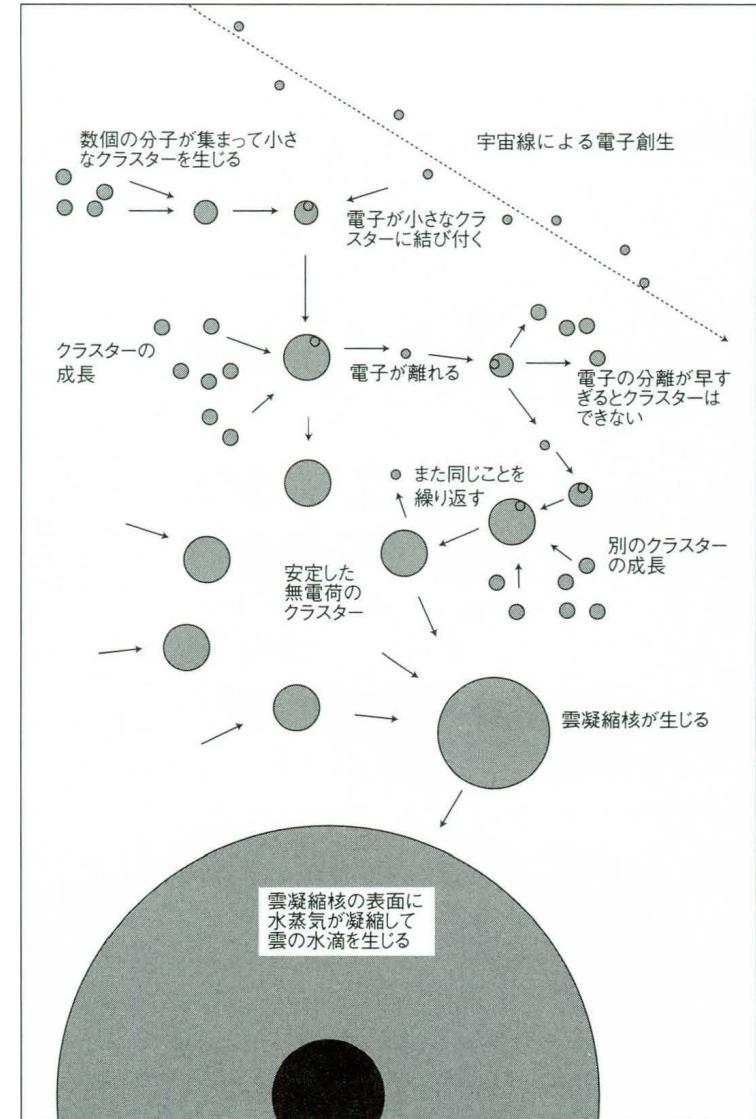
宇宙線 → 雲の増加 → 地球の寒冷化

宇宙線強度と雲量のきれいな相関



(Svensmark 2007)

宇宙線 → 大気電離を誘発
→ 微粒子形成 → 雲核形成



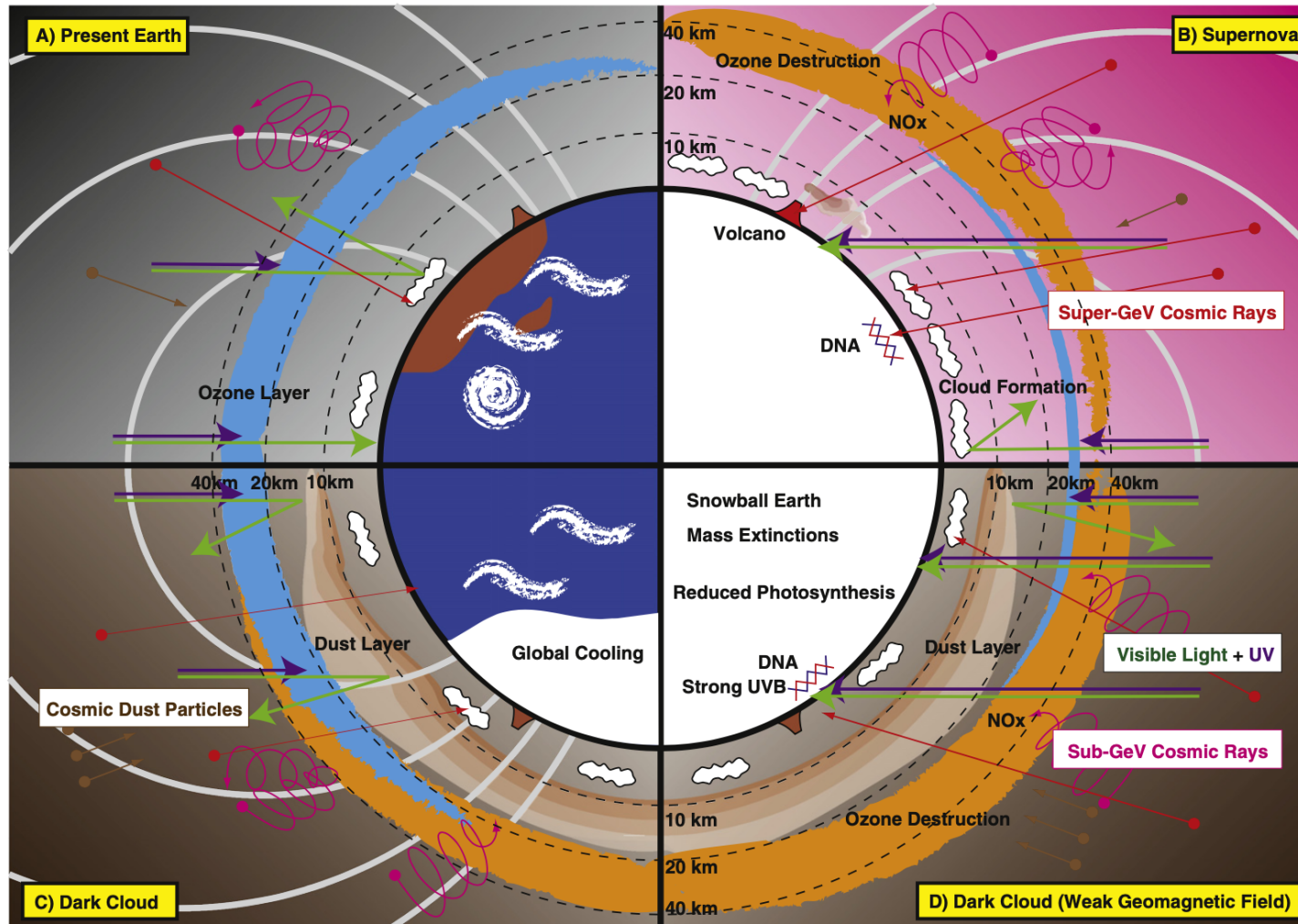
(不機嫌な太陽 Svensmark)

the Nebula winter model

Kataoka+ 2014

星雲遭遇地球冷却モデル

銀河面での星形成率が高い時期に地球は寒冷化する

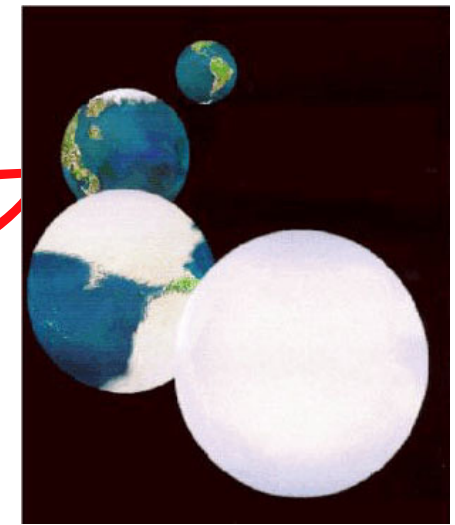


✓ ダスト粒子

✓ 大気中での宇宙線によるNO_xの大量生

などによっても寒冷化

全球凍結 (スノーボールアース)



赤道域で氷河性堆積物の発見

過去に少なくとも地球は全球凍結を3回経験

- 24.3億年前 (ヒューロニアン氷河時代)
- 7.17億年前 (スターチアン氷河時代)
- 6.50億年前 (マリノアン氷河時代)

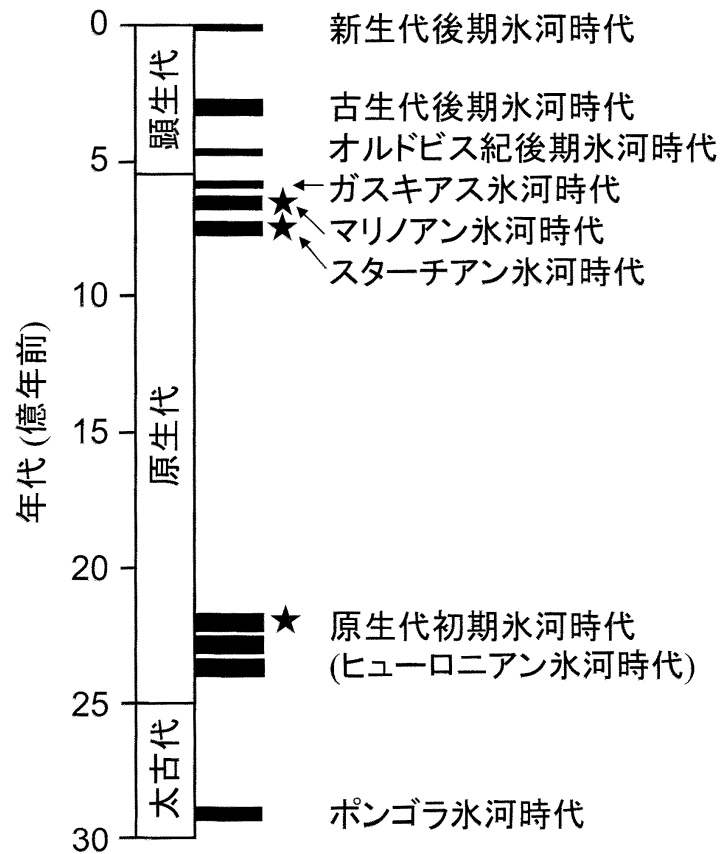
(Hoffman 2019)

原因は不明

✓ 二酸化炭素量の低下?

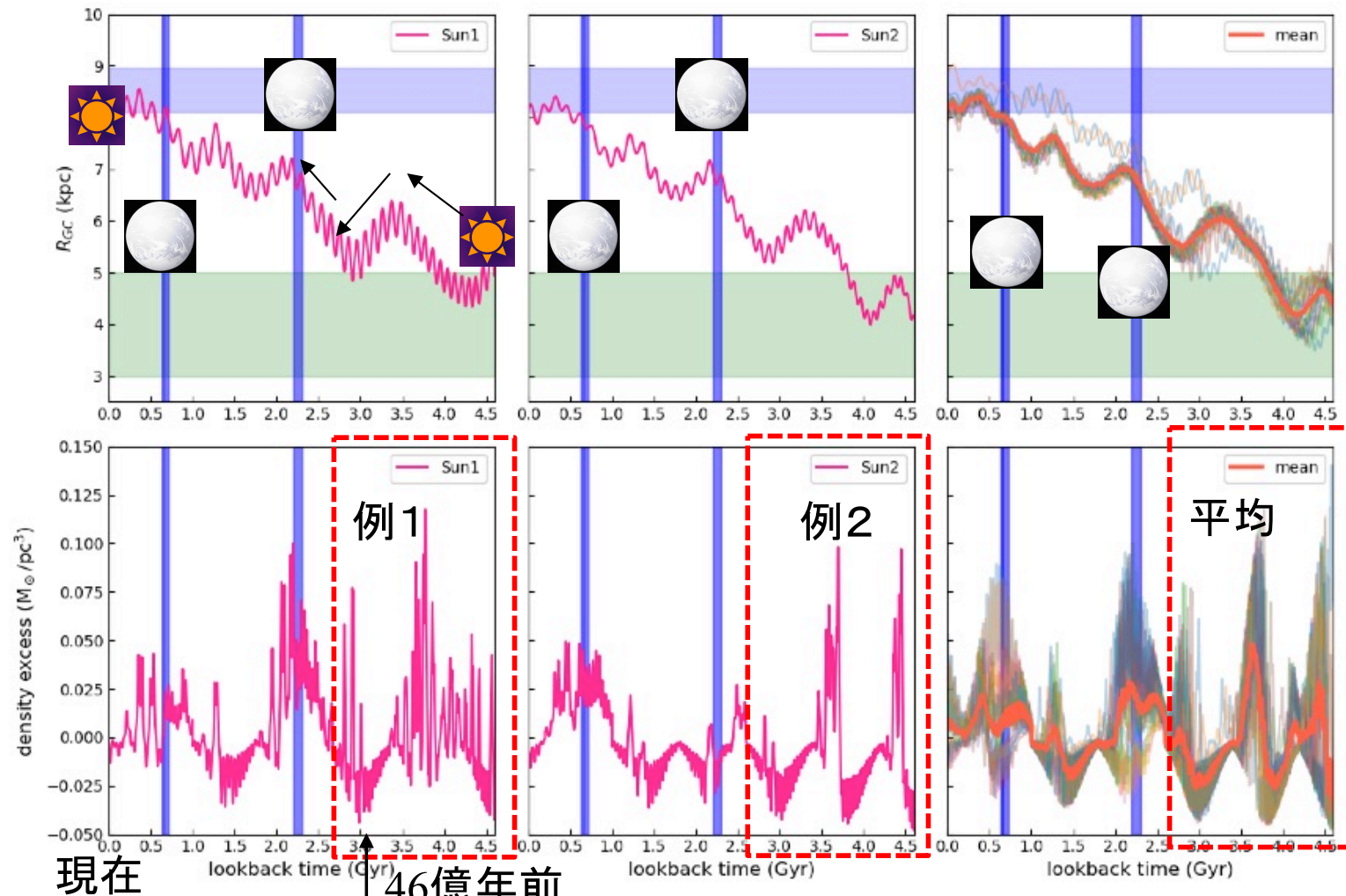
✓ the Great Oxidation event?

(Kirschvink+ 2000)



★印がスノーボールアース期(田辺 2007)

太陽系の渦状腕遭遇とスノーボールアース



現在

46億年前

太陽磁場の活動性が強く宇宙線をブロック

6.5億年前、7.2億年前に
連続して起きたことは謎



星が渦状腕を通過する際、腕を
出たり入ったりすることで説明できる

まとめ

- ✓ 最新の銀河力学理論は星々の銀河面の移動を予言する
(観測的サポートも数あり)
- ✓ 太陽系も太陽組成の観点から内側から移動したと
ほぼ断定できる
- ✓ だとすれば、太陽系は過去に何度か渦状腕(星形成領域)を通過したことになり、気候変動や生物大量絶滅などの地球史をこの視点から再考する価値あり
- ✓ 太陽のTh(およびU)の含有量は双子星の中で最低値に近(25%ほど平均値より低い)が、これは太陽系が最内縁部生まれたことによるかもしれない