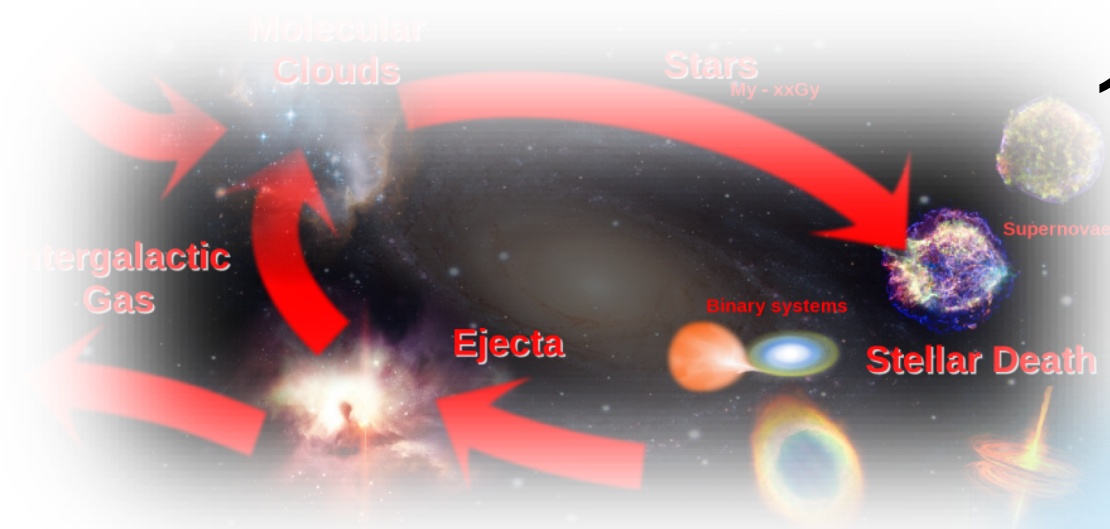


銀河・宇宙化学進化レビュー

辻本拓司 (国立天文台)

1. 化学進化について

- ✓ 古典的描像
- ✓ 最新の動向



2. ニュートリノ研究とのつながり

芦田さん、中里さんとのコラボへ

TESHIMA
ESPOIR PARK

家浦港

豊島美術館

唐櫃港

豊島

第32回ニュートリノ研究会

📅 Saturday 23 Mar 2019, 10:30 → 18:00 Asia/Tokyo

📍 6階大セミナー室 (宇宙線研究所)

Description 第32回ニュートリノ研究会 「超新星背景ニュートリノ」
<https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/indico/event/197/>

研究会の趣旨

宇宙誕生から現在までに起こった超新星爆発によって放出されたニュートリノ（超新星背景ニュートリノ）は diffuse な成分として宇宙空間に漂っていると考えられ、その測定は過去に生じた星形成の歴史を探る貴重な手がかりです。

スーパーカミオカンデはこの背景ニュートリノを検出するべく、SK-Gd計画を進めています。検出器中の純水にガドリニウムを溶解させ、中性子検出による反ニュートリノ事象選別やバックグラウンド除去を行うことにより、背景ニュートリノの検出感度を大きく向上させます。今年度は検出器の改修工事が行われ、今後はガドリニウム溶解の工程に進んでいく予定であり、計画の実現が期待されます。

今回のニュートリノ研究会は、超新星背景ニュートリノをテーマとして開催させていただきます。理論と実験の両面から背景ニュートリノの物理に携わる研究者の方に講演していただきます。理論からは、背景ニュートリノのフラックスモデルや検出可能性についてバージニア工科大の堀内さんにレビューしていただきます。また、九州大の中里さんには背景ニュートリノとブラックホールの関連についての研究をお話しいたします。実験からは、神岡でSK-Gdを推進する池田さんと中島さんに、これまで試験実験を含めたSK-Gdへの取り組み、今年度の検出器の改修工事やSK-Gd実現に向けた今後の予定等を話していただきます。

研究会は日本語での講演を予定してます。また、ニュートリノ分野以外の研究者の方で超新星背景ニュートリノにご興味をお持ちの方も参加いただければと思います。

公募講演の申し込みは締め切らせていただきました。

開催日時と場所

2019年3月23日（土） 13:00~

東京大学宇宙線研究所6階大セミナー室 （東京大学柏キャンパス）

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/access/>

参加費、事前登録は不要です。

13:00

→ 13:15

Introduction

🕒 15m

Speaker: Yusuke Koshio (Okayama Univ.)

Slides



13:15

→ 14:15

Diffuse supernova neutrino background predictions and discovery potential

🕒 1h

Speaker: Shunsaku Horiuchi (Virginia Tech)

Slides



14:15

→ 14:45

背景ニュートリノとブラックホール

🕒 30m

Speaker: Ken'ichiro Nakazato (Kyushu Univ.)

Slides



14:45

→ 15:15

Break

🕒 30m

15:15

→ 15:50

SK-Gd その1: 期待される成果とこれまでの技術開発

🕒 35m

Speaker: Motoyasu Ikeda (ICRR, Univ. of Tokyo)

Slides



15:50

→ 16:25

SK-Gd その2: SK-Gd実験開始に向けた準備状況

🕒 35m

Speaker: Yasuhiro Nakajima (ICRR, Univ. of Tokyo)

Slides



16:25

→ 16:45

超新星背景ニュートリノ探索における背景事象精密評価のためのニュートリノ-酸素原子核中性カレント弾性散乱反応断面積の測定

🕒 20m

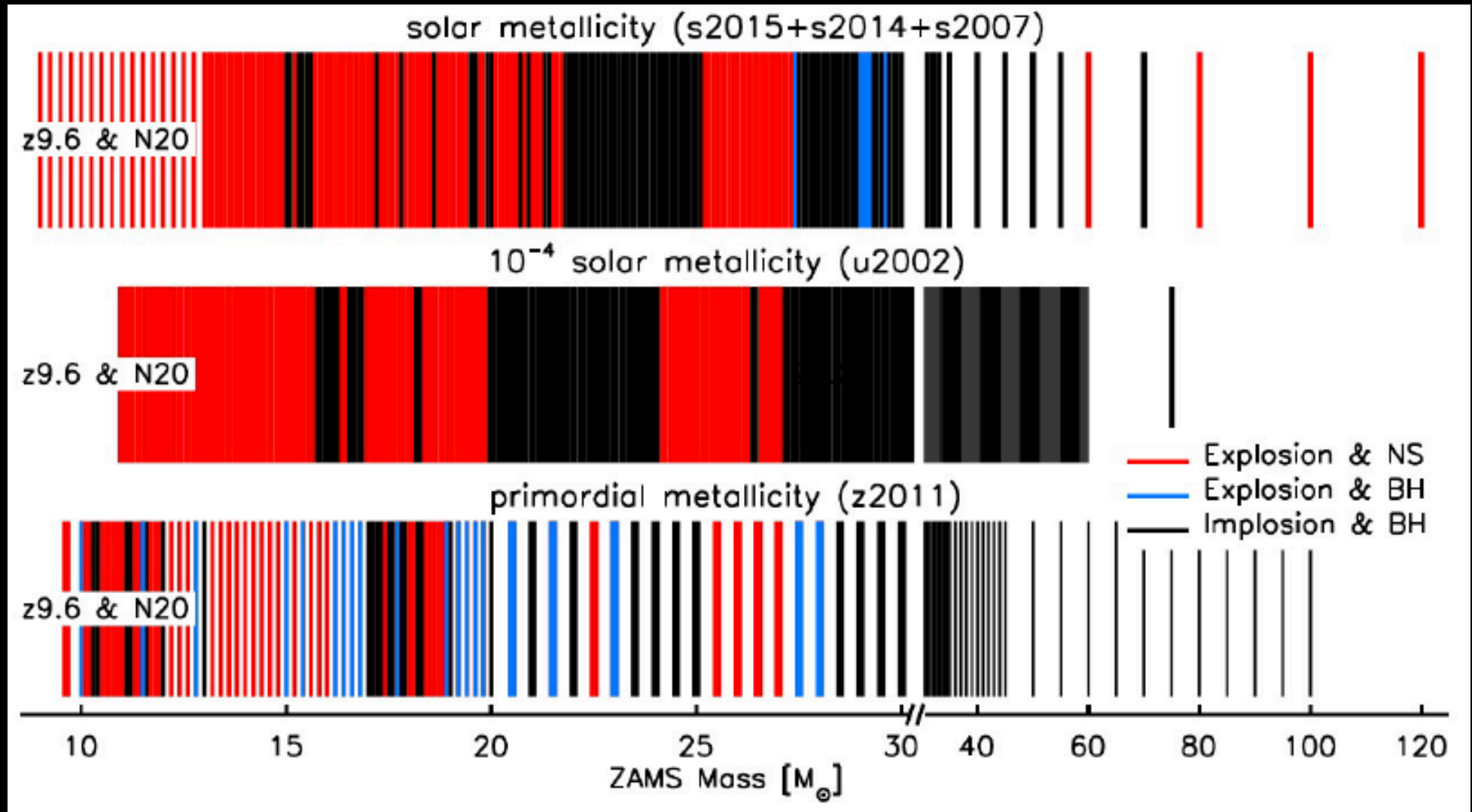
Speaker: Yosuke Ashida (Kyoto Univ.)

Slides



Supernova diversity

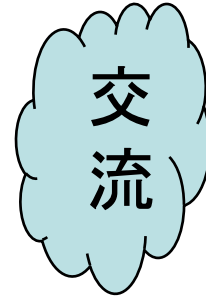
Systematic studies: thinking in mass looks incomplete



Janka 2017; see also O'Connot & Ott (2011), Pejcha & Thompson (2015), Sukhbold et al (2016), Mueller et al (2016)

ニュートリノ研究

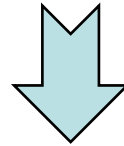
「物理学」



銀河天文学



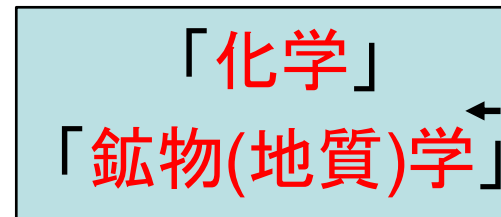
学問分野が異なると常識が大きく違うこともある



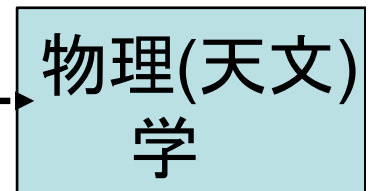
両者の常識を擦り合わせることから新たな研究が生まれることも

一方で、学問分野が大きく異なり異文化交流となると、結構厳しい

隕石分析 と 天文学



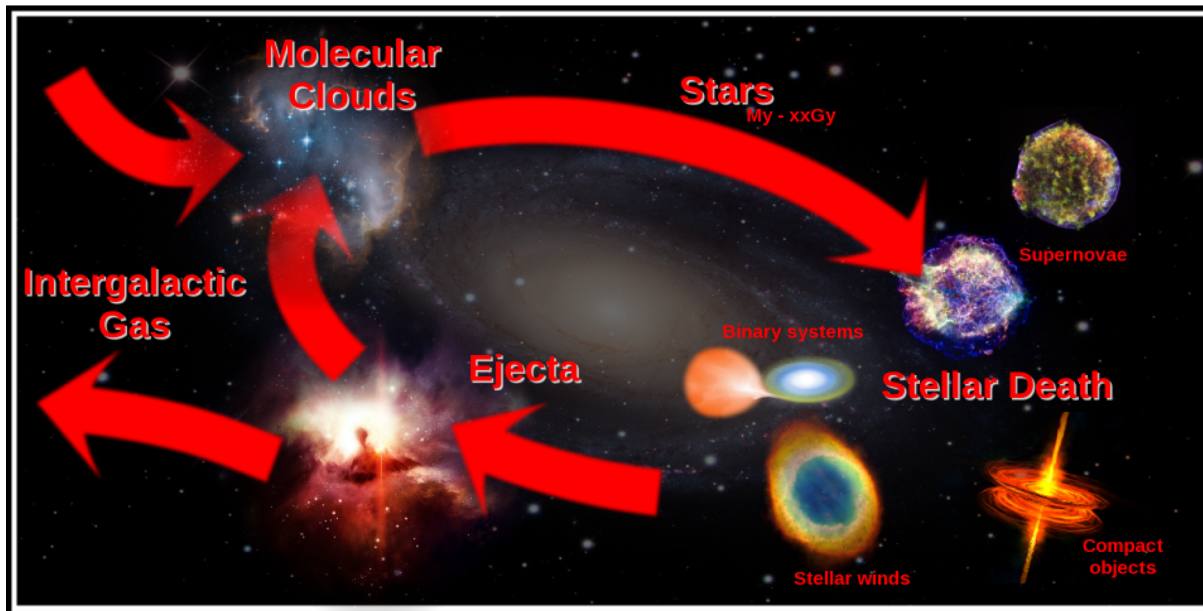
距離があるな～



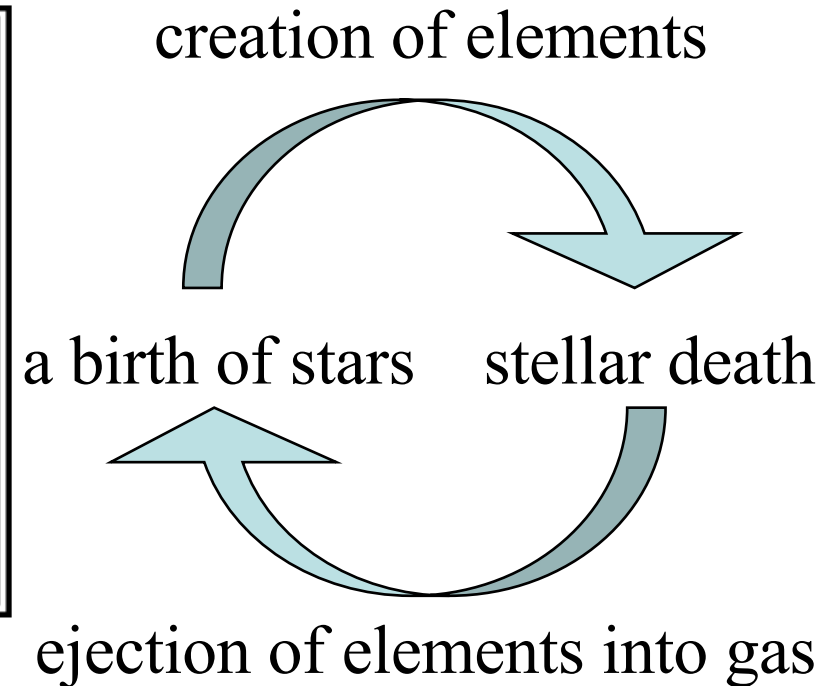
ニュートリノ研究と天文学は程よい距離感と感じてます

Chemical Evolution

Calculation of the evolutionary change in the mass fraction, Z_i , of each heavy element, i , in gas



@Longland



Each time's Z_i of gas can be recorded as **stellar Z_i** at each time
(at a stellar surface)



can be compared with the **observed Z_i of long-lived stars**
($M < 0.8 M_{\odot}$)

基本の観測量は星の化学組成

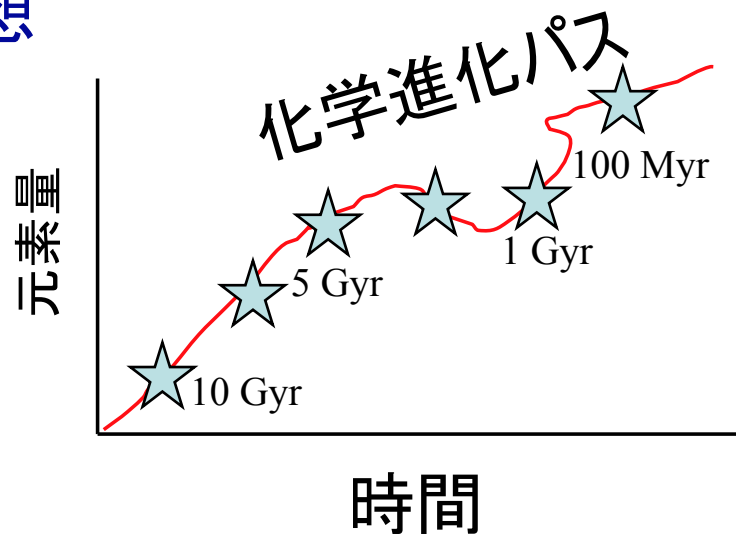
星の化学組成は星が生まれた時の ガスの化学組成を反映している

(星の進化の過程で、つまり星の内部で作られる元素(炭素、窒素など)はその限りではない)

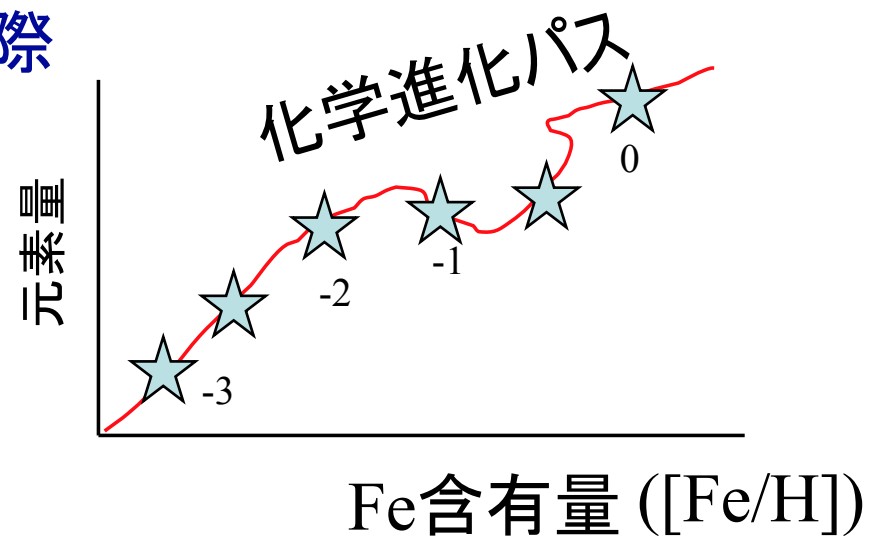
星の元素量(Feの含有量など)は基本時間とともに増加する

星のFe含有量は時間の指標となる

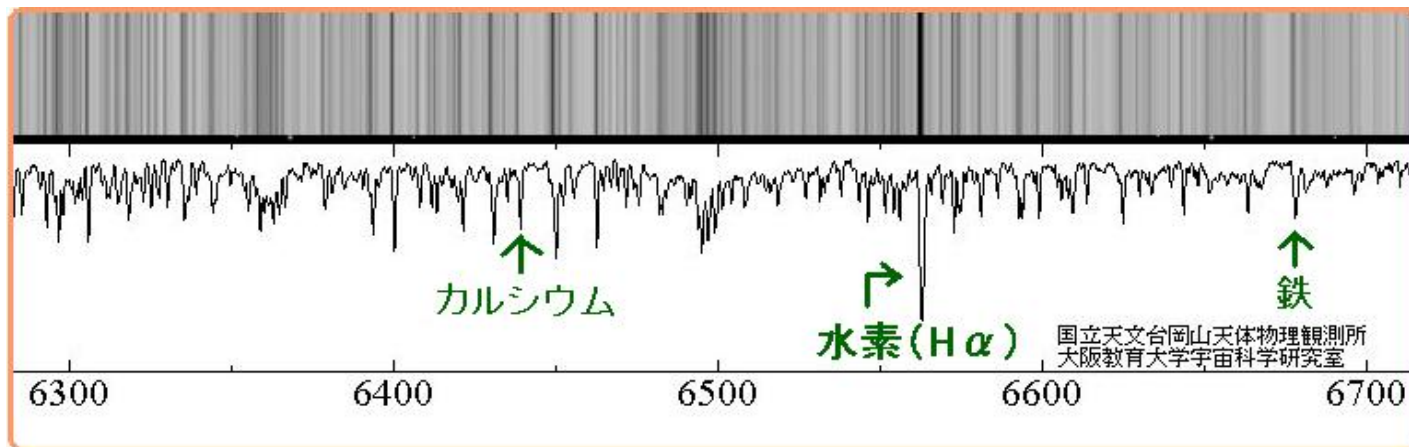
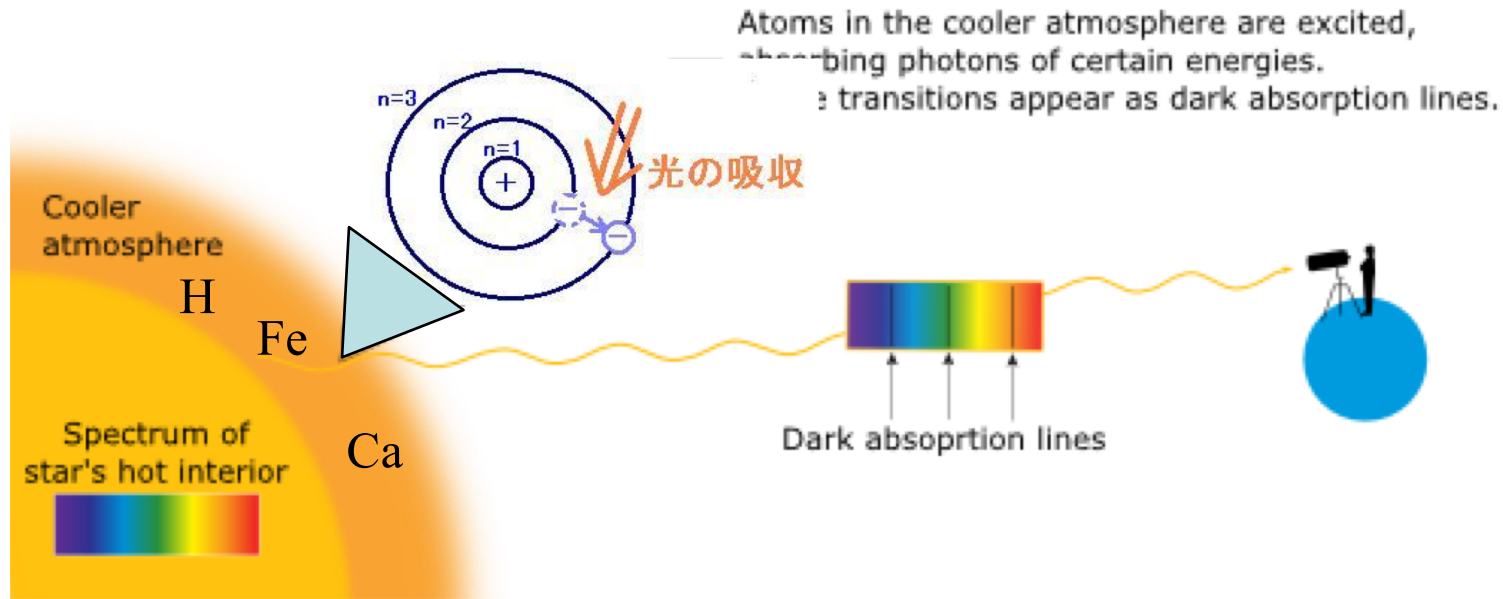
理想



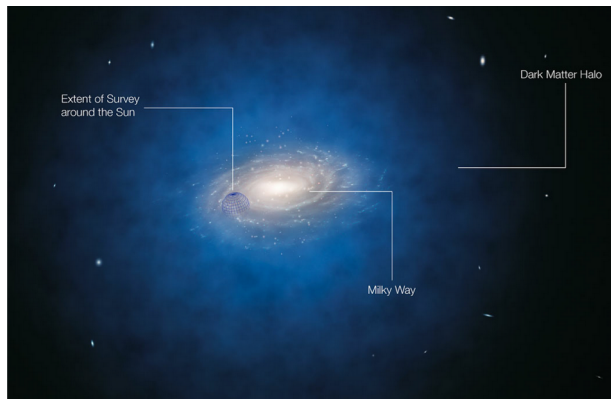
実際



星の化学組成



(単位:Å=10⁻¹⁰m)

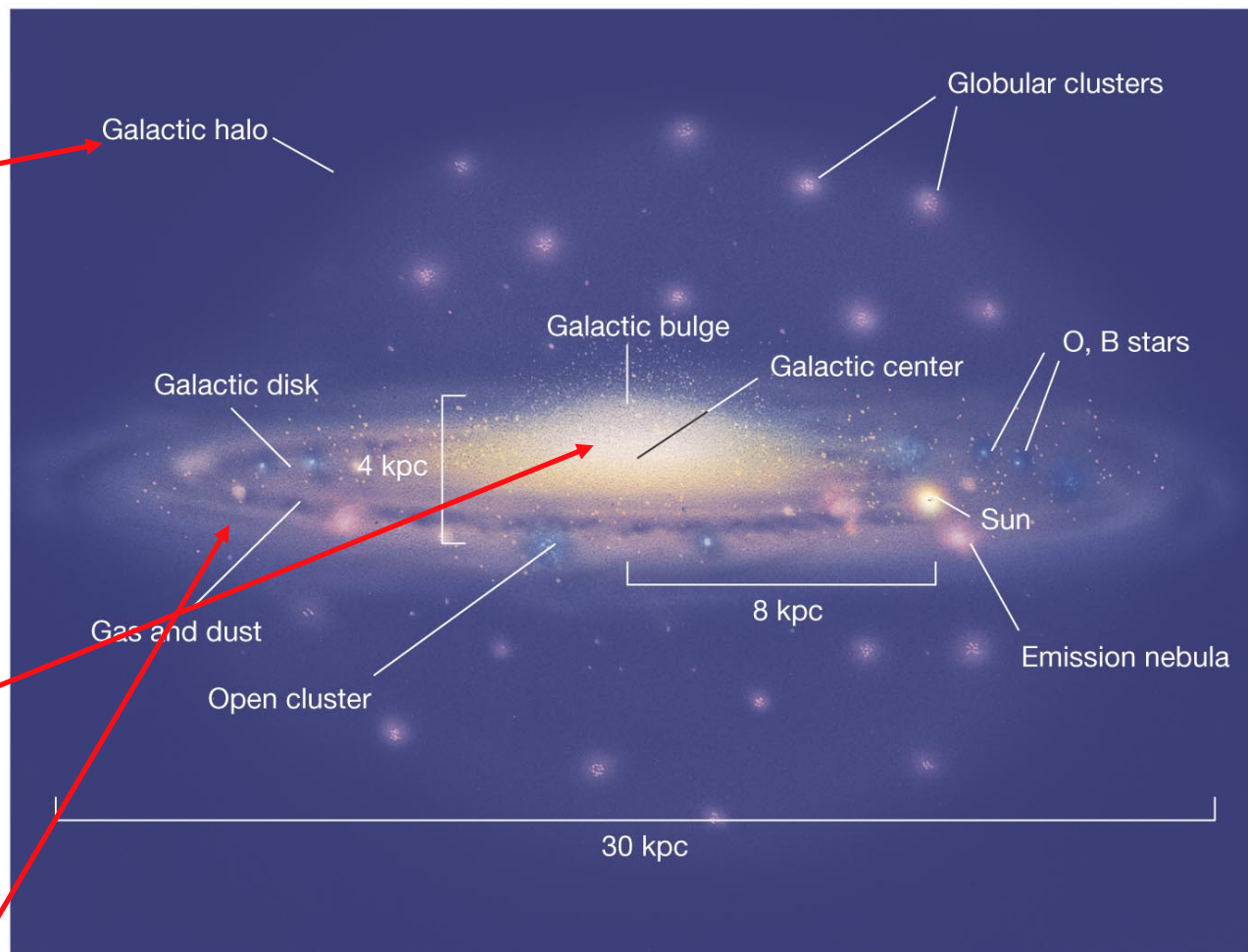


銀河系の構造

ハロー
半径~50 kpcの球
(4-7) × 10⁸ M_☉

バルジ
~1.5 × 10¹⁰ M_☉

ディスク
半径~15 kpcの円盤



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.

星 厚み

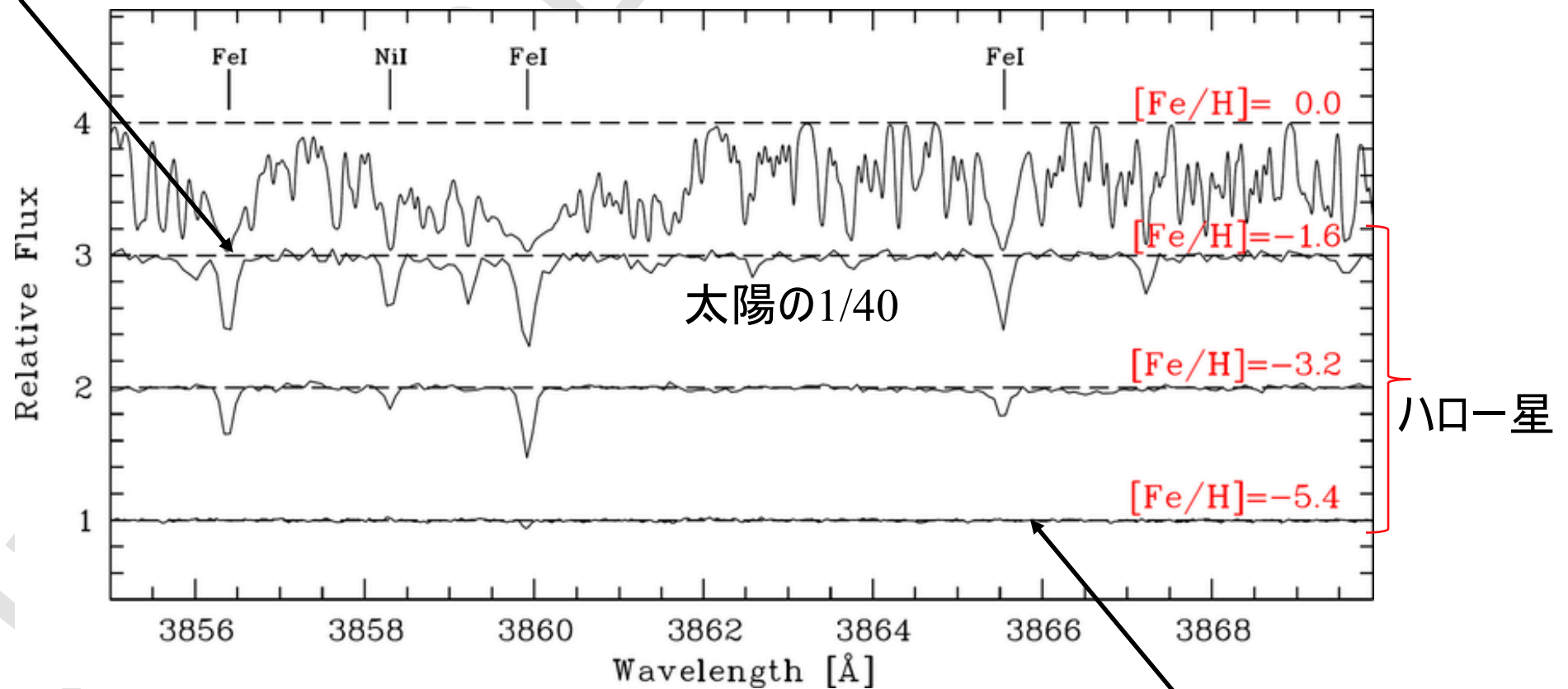
厚いディスク (thick disk) : ~0.5 × 10¹⁰ M_☉, 900 pc
薄いディスク (thin disk) : ~3.5 × 10¹⁰ M_☉, 300 pc

ハロー

低金属量の星々からなる銀河系成分

ハローの平均的
金属量

銀河系で最初にできた古い(~100億年前)星々



太陽の25万分の1の金属量の星

いて座銀河



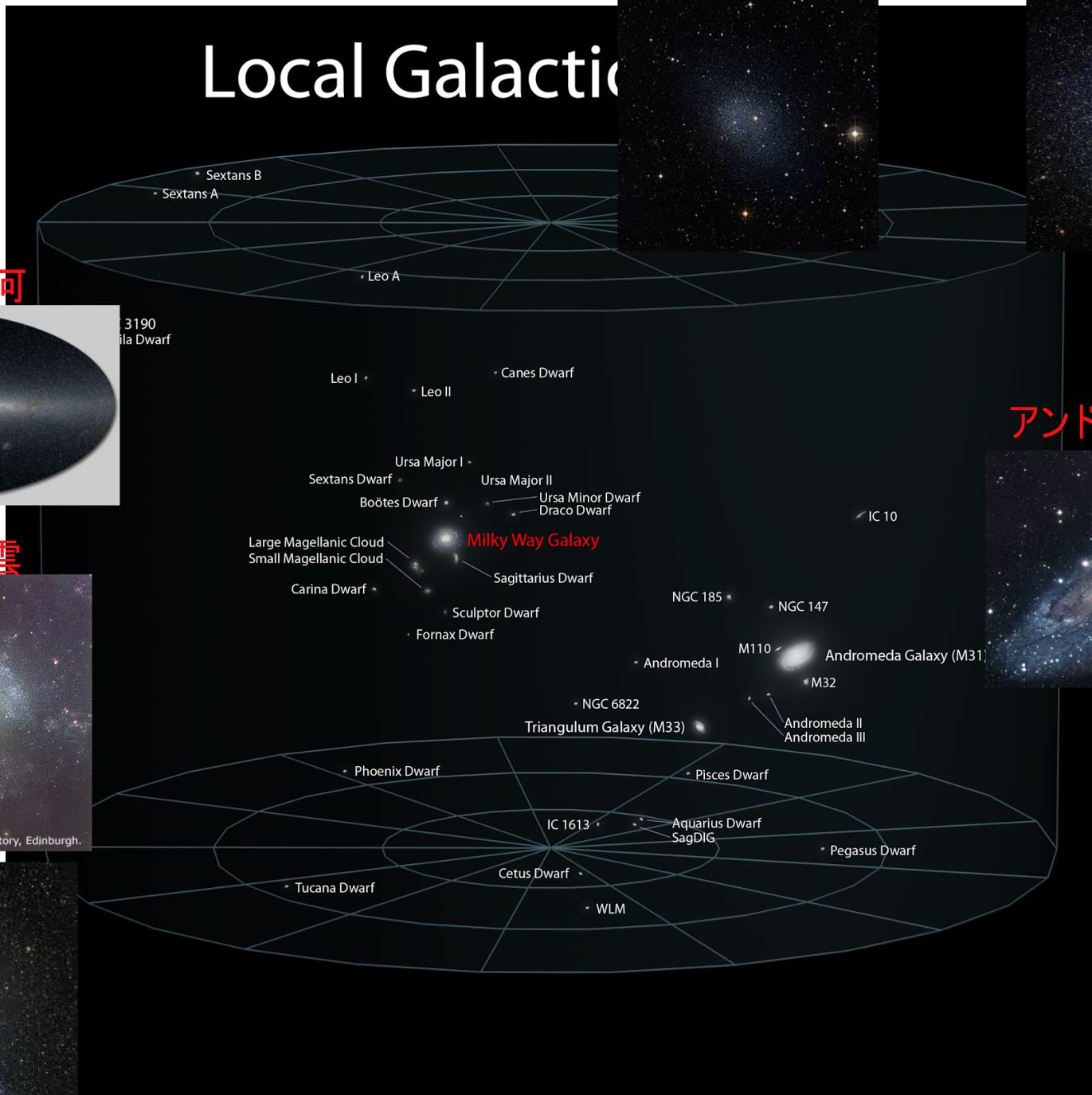
ろ座銀河



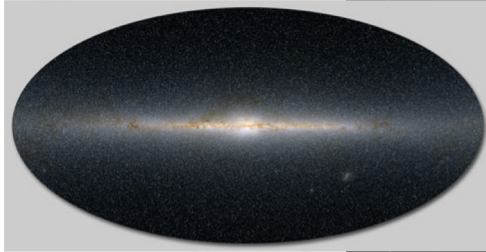
しし座I銀河



Local Galactic



天の川銀河



アンドロメダ銀河



大マゼラン雲



小マゼラン雲

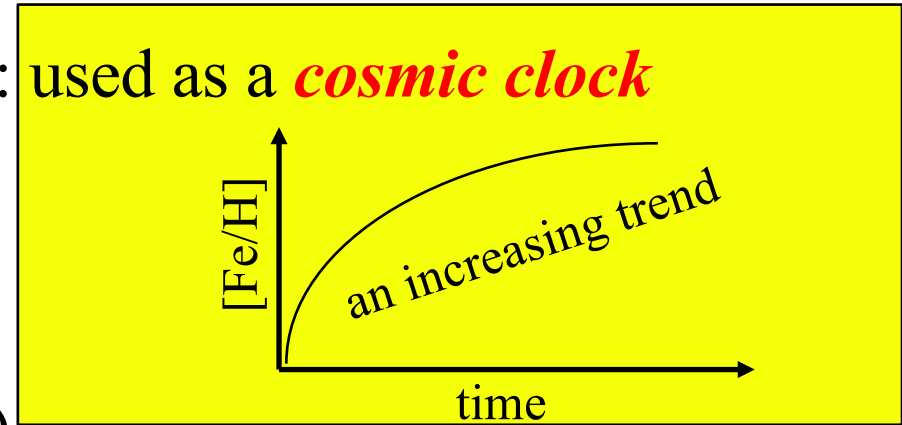


© Anglo-Australian Observatory/Royal Observatory, Edinburgh.

stellar abundances

$[Fe/H] = \log (Fe/H)_{star} - \log (Fe/H)_{\odot}$: used as a *cosmic clock*

$[X/Fe] = \log (X/Fe)_{star} - \log (X/Fe)_{\odot}$

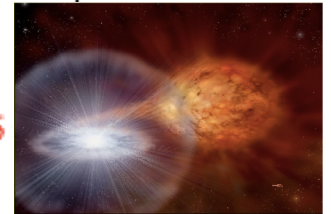
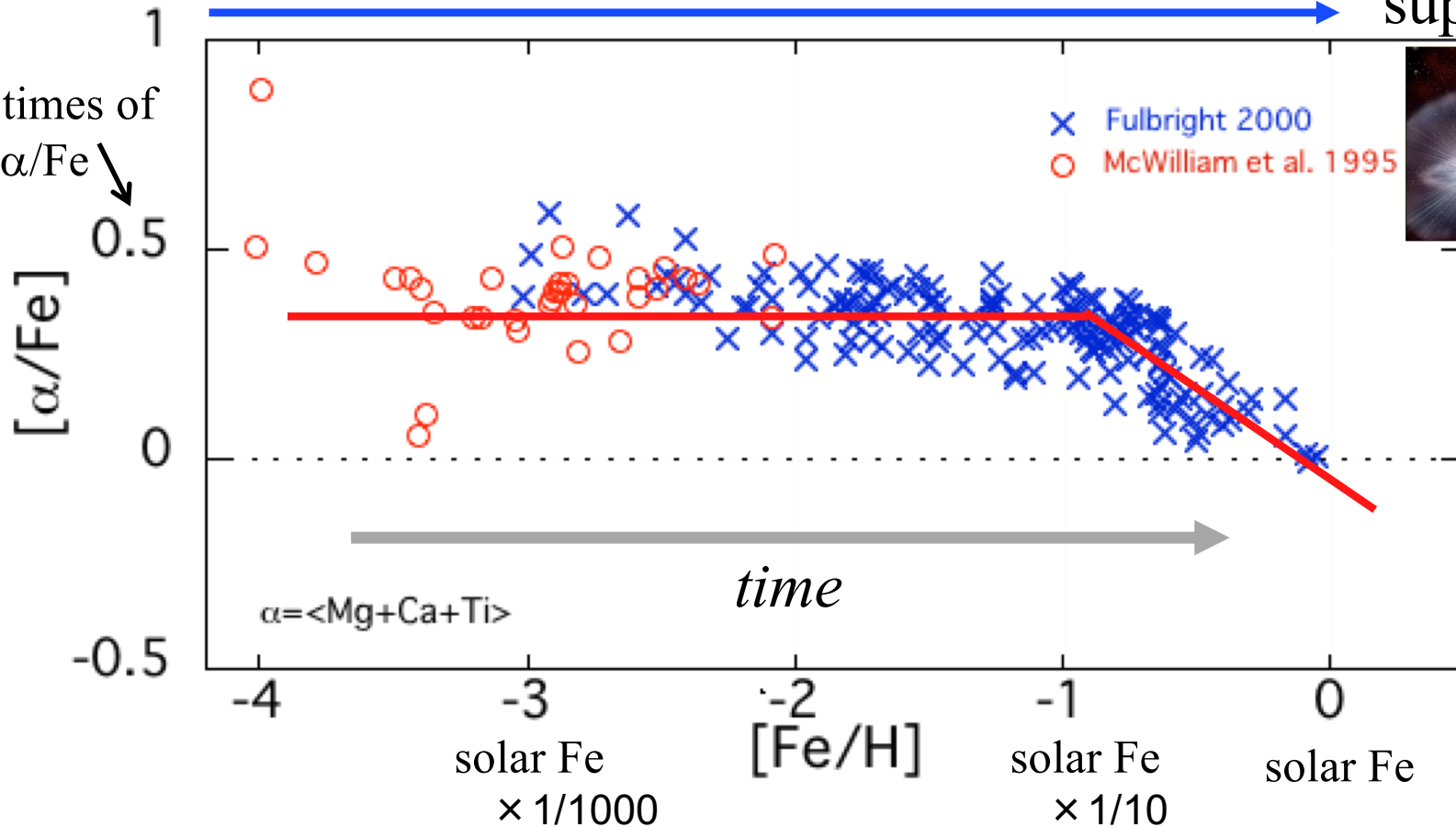


(core-collapse supernovae)

CCSNe

SNe Ia (type Ia supernovae)

three times of solar α/Fe



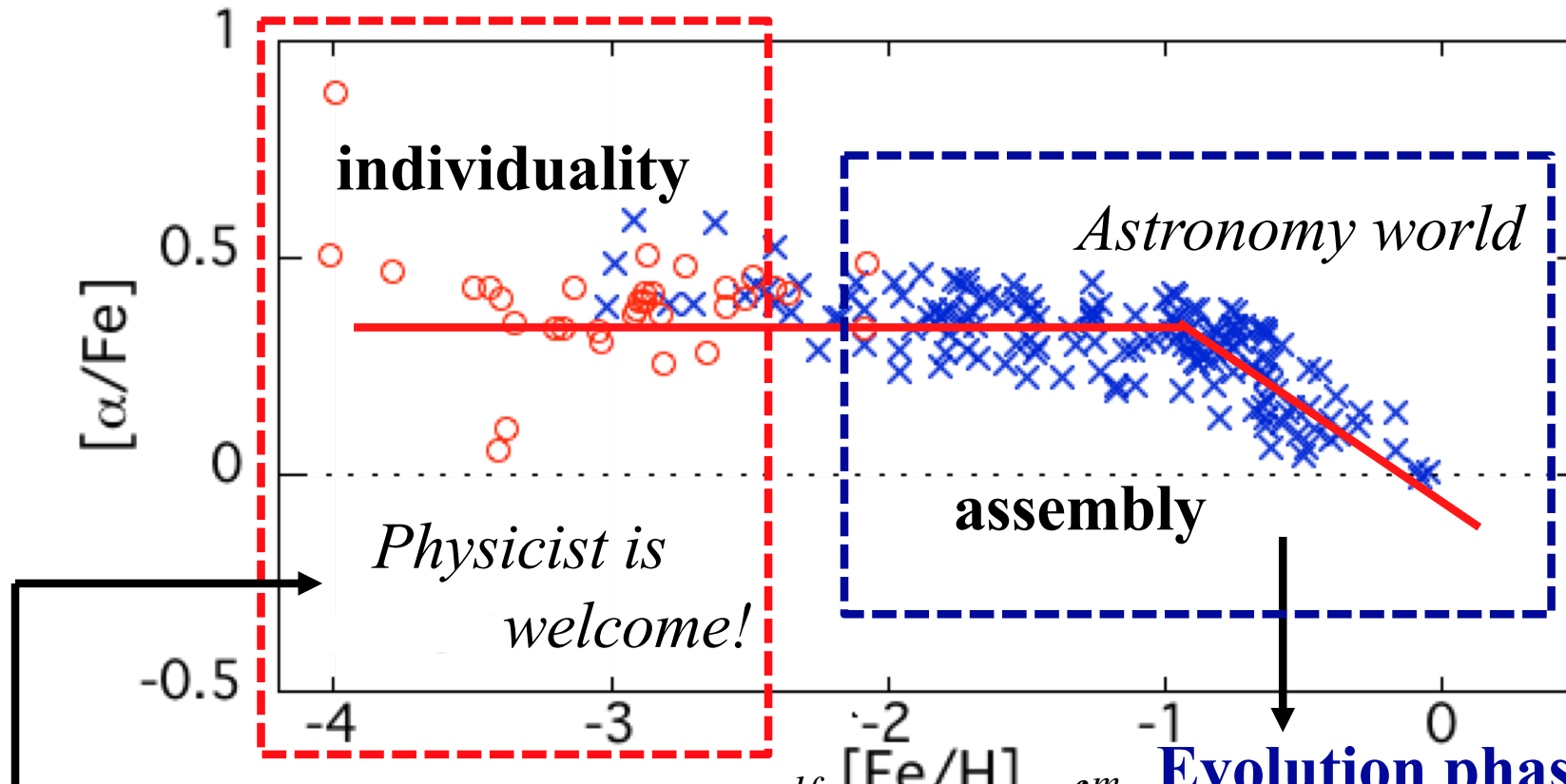
$\alpha = \langle Mg + Ca + Ti \rangle$

solar Fe
 $\times 1/1000$

solar Fe
 $\times 1/10$

solar Fe

Two domains of stellar abundances



Nucleosynthesis phase

Individual stellar abundances may reflect each nucleosynthesis event

$$\frac{df_g}{dt} = -\psi(t) + \int_{\max(m_l, m_t)}^{m_u} dm \phi(m) r(m) \psi(t - t_m) + A(t)$$

$$\frac{d(Z_i f_g)}{dt} = -Z_i(t) \psi(t) + \int_{\max(m_l, m_t)}^{m_u} dm A \psi(m) y_{Ia, i} \times \int_0^t dt_{Ia} g(t_{Ia}) \psi(t - t_{Ia})$$

$$+ \int_{\max(m_l, m_t)}^{m_u} dm (1 - A) \phi(m) [y_{cc, i} + Z_i(t - t_m) r_w(m)] \psi(t - t_m) + Z_{A, i}(t) A(t)$$

化学進化を決定するfundamentalな要素は3つ

1. 時間の関数としての星生成率

star formation rate (SFR)

t と $t+\Delta t$ の間にどれだけの質量の星ができるか

1I. 生まれる星の質量分布 (通常、時間の関数にしない)

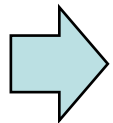
星の初期質量関数: initial mass function (IMF)

m と $m+\Delta m$ の間にできる星の割合

1II. 元素の供給天体

元素によって異なる！

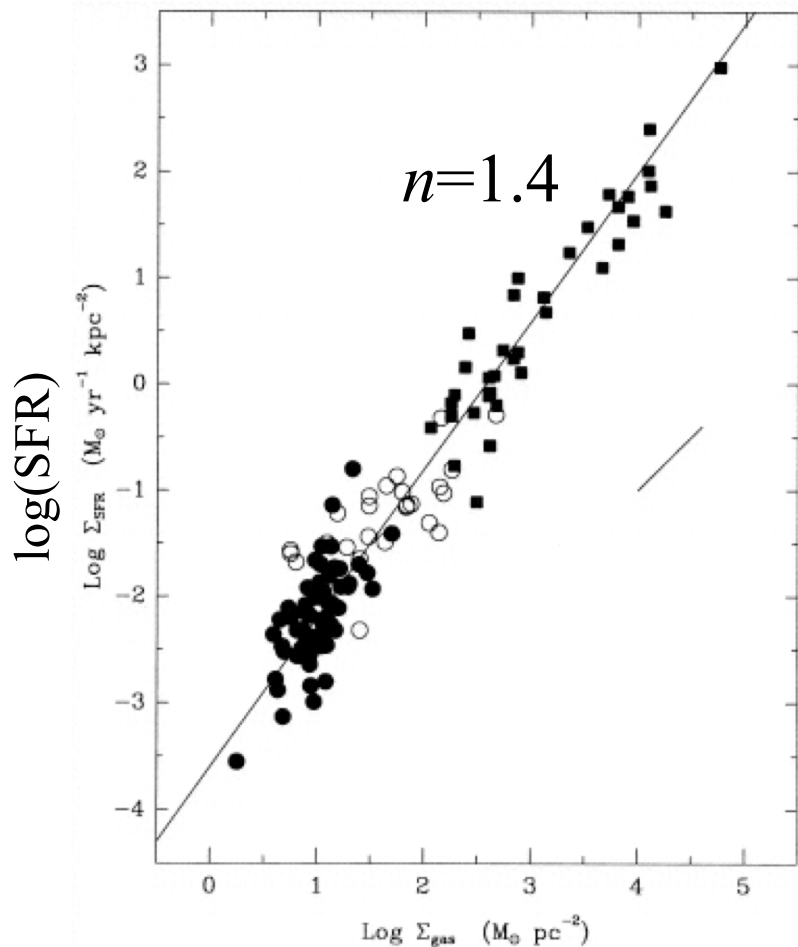
元素Xの合成量は質量範囲(m_1, m_2)の関数



ある元素Xを供給する天体がある時間 t にどれだけ(何個)作られるかを評価できる

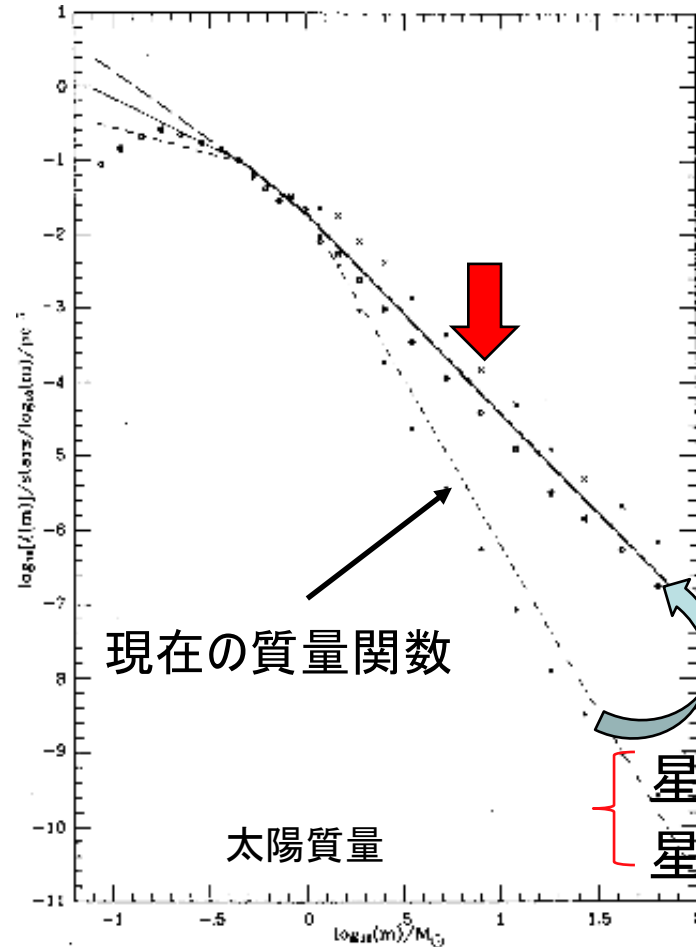
SFR

IMF



(Kennicutt 1988)

log(星の個数密度)



(Kroupa+ 1993)

現在の質量関数

太陽質量

星の寿命
星の形成史

log(ガスの表面密度)

log(星の質量)

$$\text{SFR} = \alpha \Sigma_{\text{gas}}^n \text{ (シュミット則)}$$

α : 星形成係数

質量 $> 1M_{\odot}$

$$\phi(m)dm: \phi(m) \propto m^{-1.7} \text{ :Kroupa IMF}$$

$$\propto m^{-1.35} \text{ :Salpeter IMF}$$

α の値は銀河(の形態)、銀河成分ごとに異なる

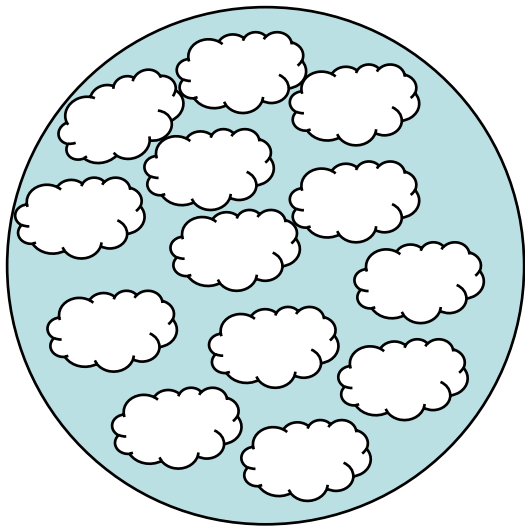
-1.3 (2001)

星の材料となるガス供給：2つのモデル

I. 閉鎖系モデル

(closed-box model)

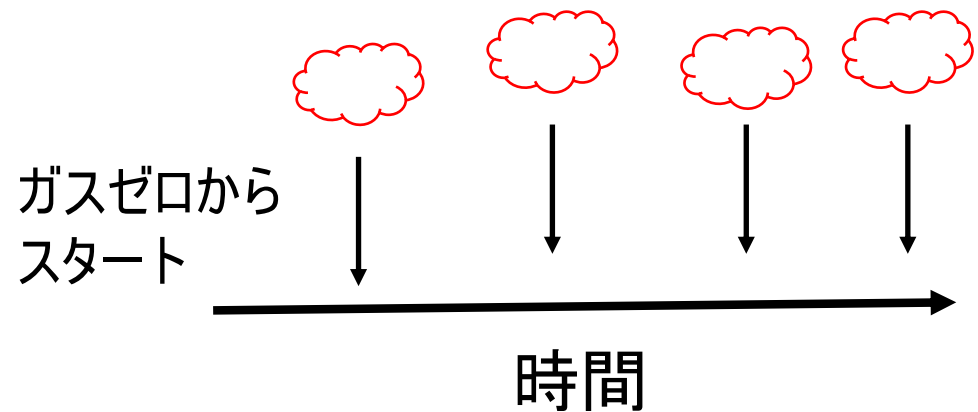
ガス100%からスタート



II. infallモデル

(inflow, 降着モデル)

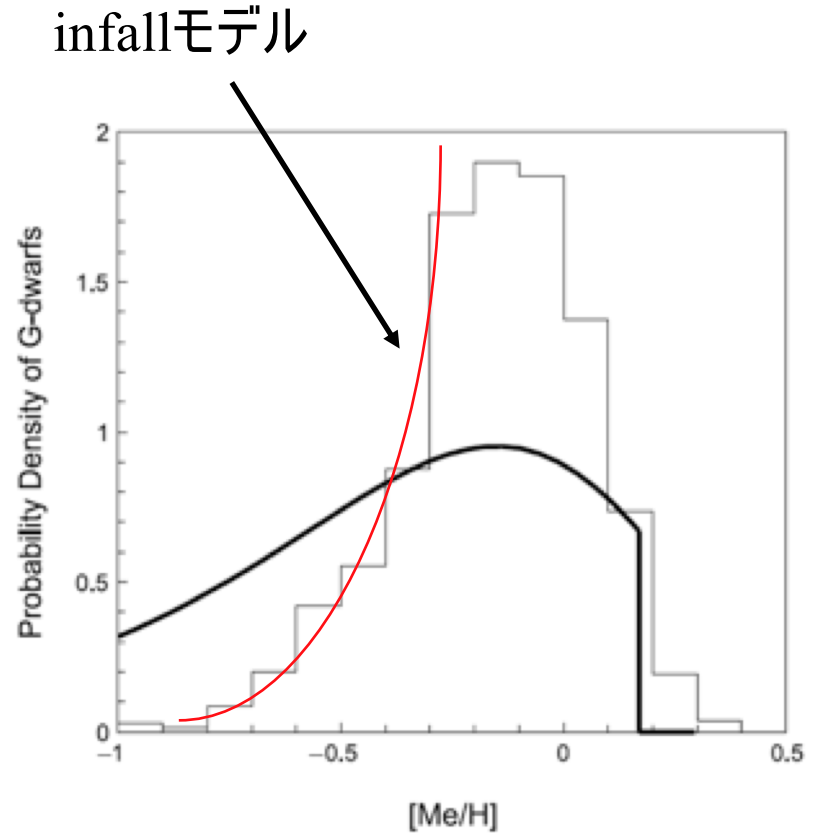
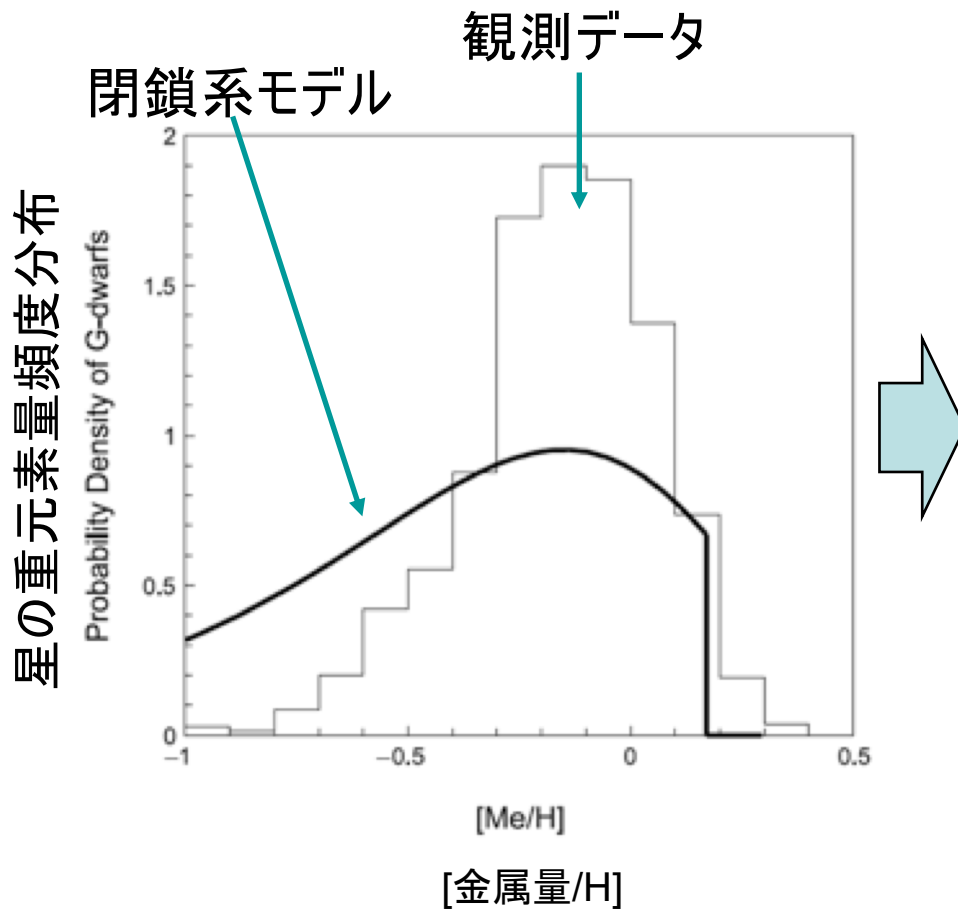
ガスは外から降ってくる



G型矮小星問題 (G-dwarf problem)

閉鎖系だと低金属量星を
作り過ぎてしまう

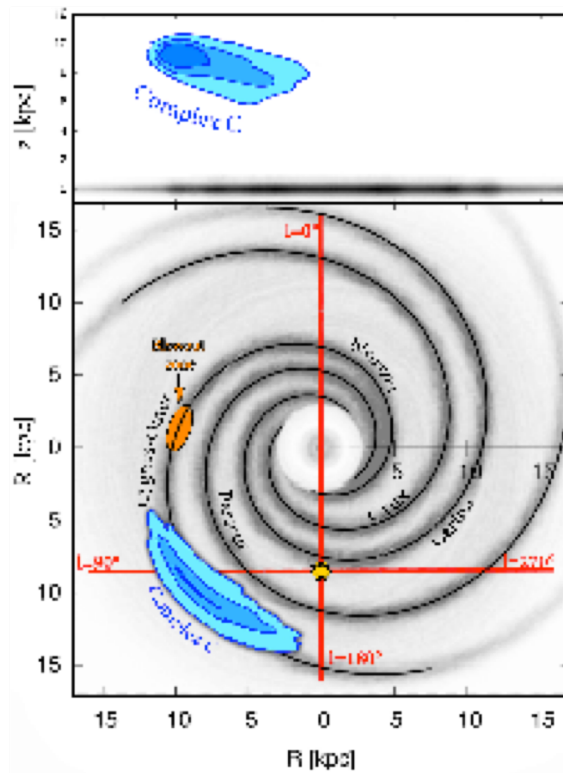
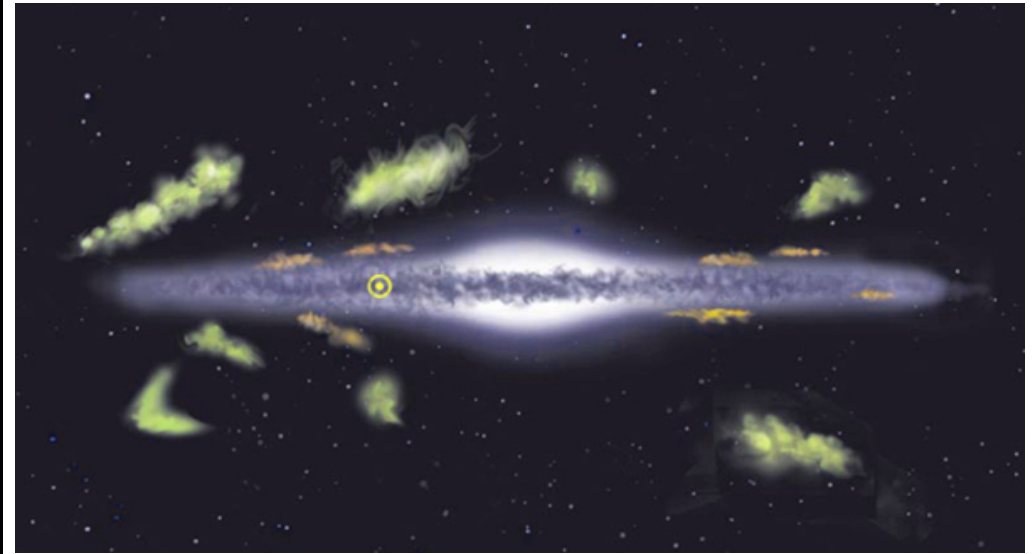
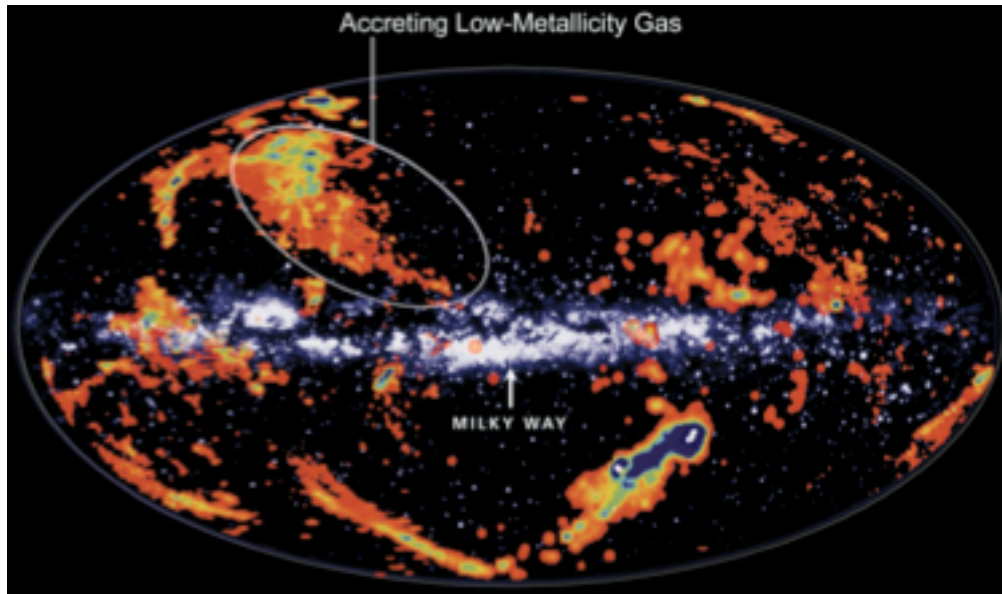
Larson (1972)~



銀河系ディスクはハローからの低金属量のガスの
定常的な流入の中で作られてきた

一般には指数関数
形で与える
($\propto e^{-\frac{t}{t_{in}}}$)

ハローに存在する高速度($\geq 50-90$ km/s)ガス雲



例えば

Complex C: 50-100 km/s で銀河ディスクに落下中

質量: $8 \times 10^6 M_{\odot}$, 距離: 10 kpc,

サイズ: 3×15 kpc

(Wakker+ 1999)

他にも

Smith cloud

質量: $2 \times 10^6 M_{\odot}$, 距離: 12 kpc,

サイズ: $>3 \times 1$ kpc

(Lockman+ 2008)

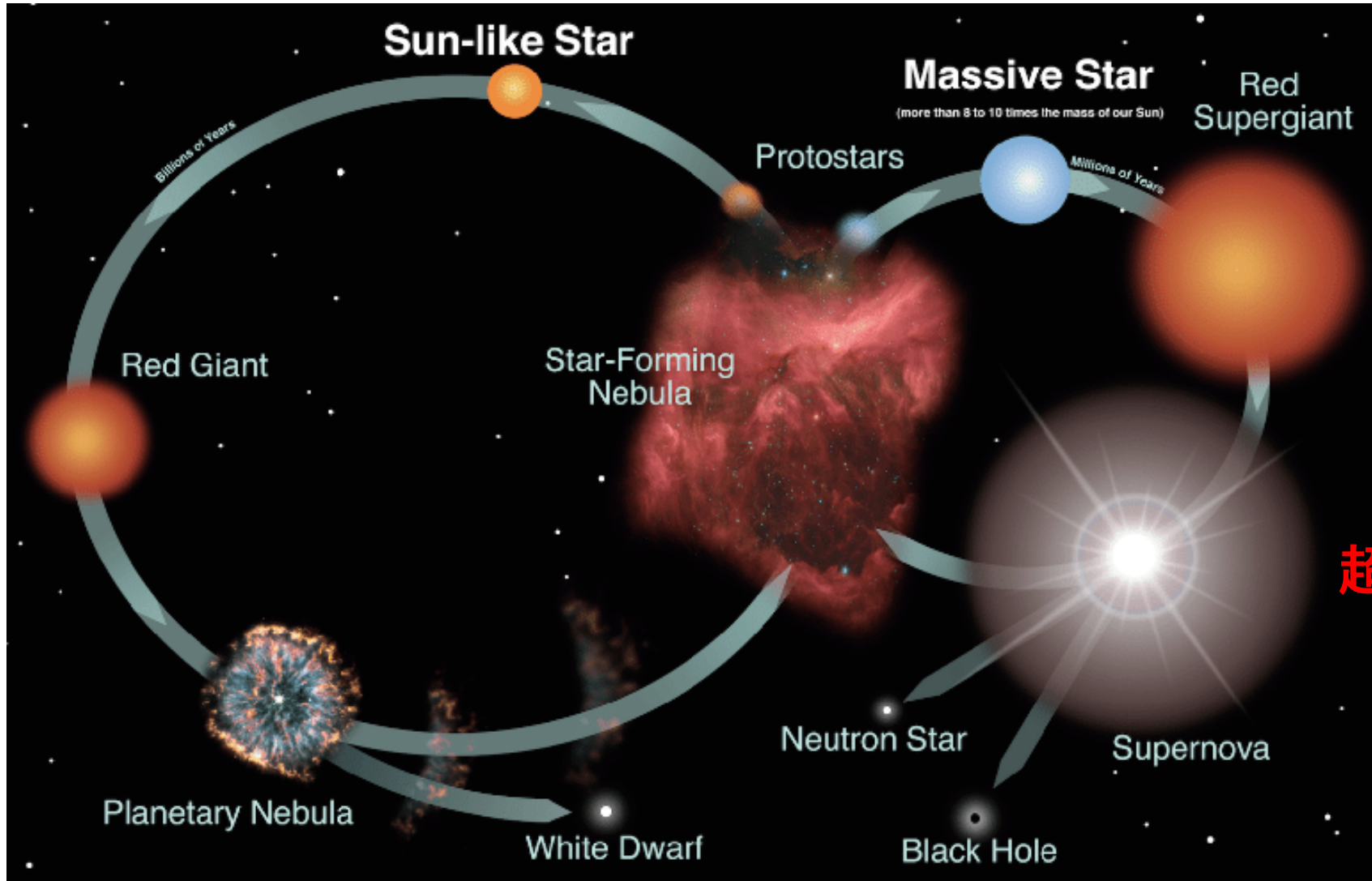
約3000万年後にディスクに衝突か

元素の供給天体

星の最期、終末進化段階によって元素が供給される

軽い星

重い星



超新星

惑星状星雲

白色矮星

元素供給天体／現象は4つ

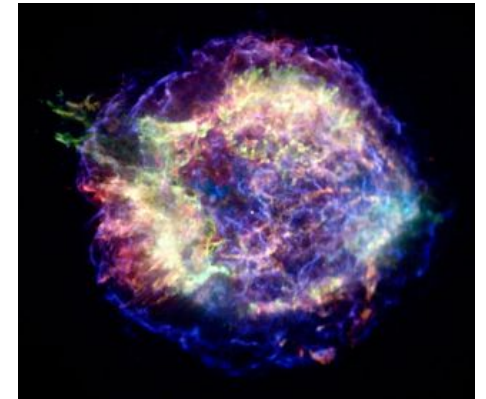
1. 大質量星の超新星爆発

(重力崩壊型超新星, II型超新星)

どの星 質量が太陽の10倍以上

どの元素 炭素から鉄族元素を合成

供給の時間 短い時間(数百万～数千万年)で放出



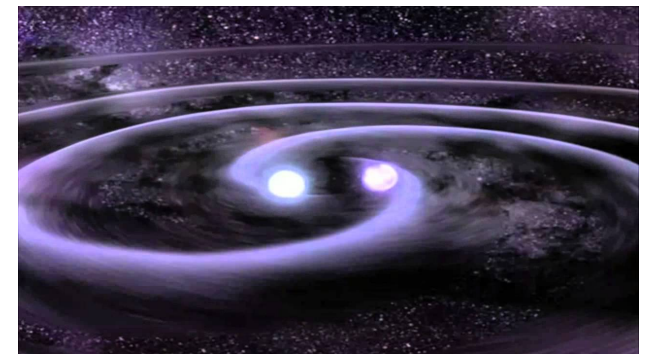
2. 連星系にある白色矮星の超新星爆発

(Ia型超新星)

どの星 質量が太陽の3～8倍の星がなりうる

どの元素 鉄族元素を主に合成

供給の時間 長い時間(典型的に10億年)で放出



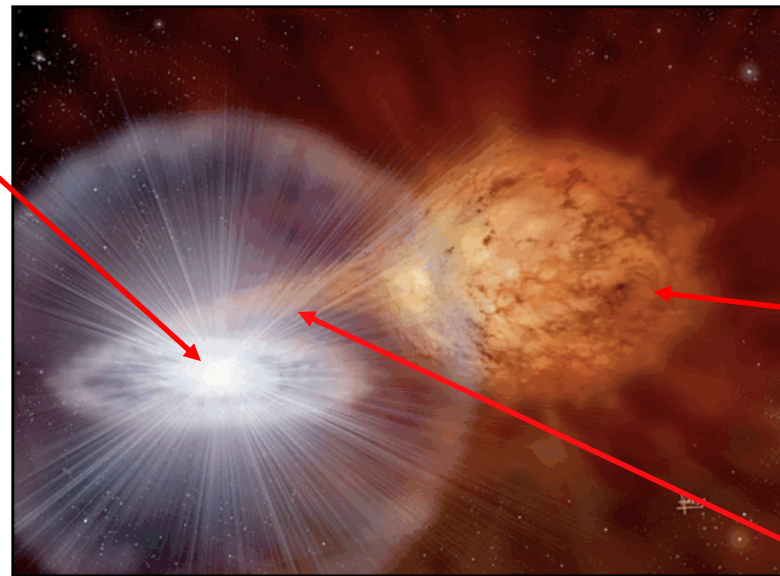
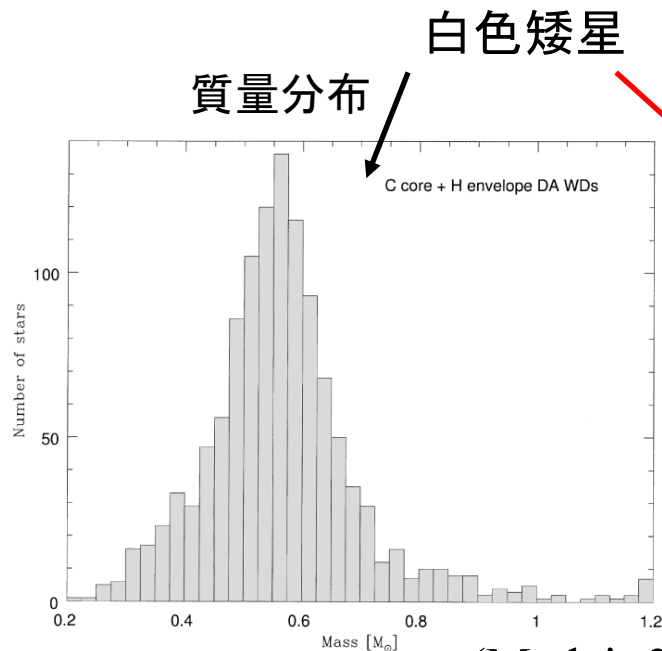
星の半分
近くは連星系
にある

Ia型超新星

連星系にある白色矮星の爆発

チャンドラセカールの
臨界質量

古典的シナリオ： 伴星から質量が流入し、白色矮星の質量が増大し、一定の質量(太陽質量の約1.4倍)を超えるとその重みに耐えられなくなり、核暴走反応が起こり大爆発



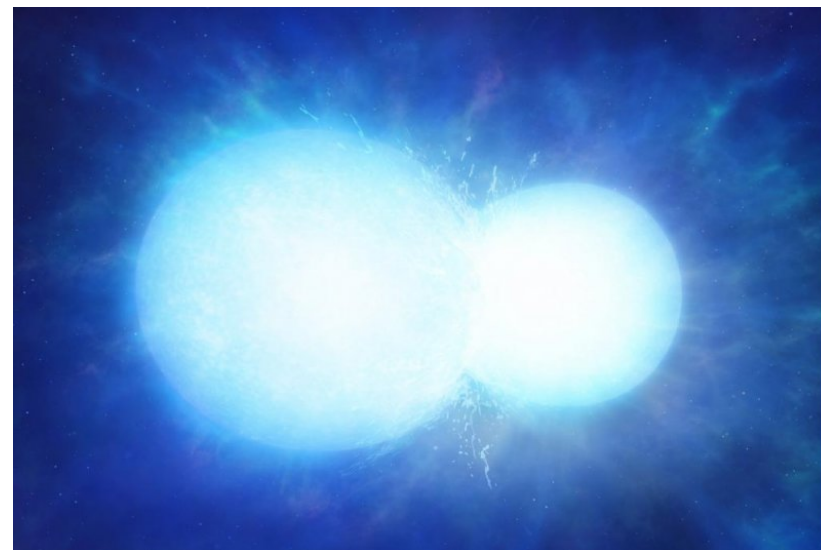
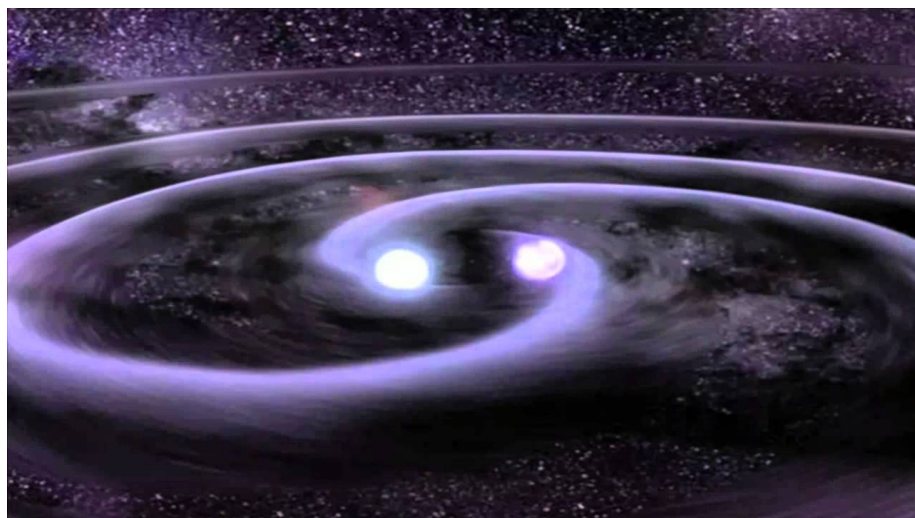
伴星

質量流入

(Majewski+2004)

もう一つのシナリオ: 白色矮星同士の合体

(つまり、伴星も白色矮星)



どちらのシナリオか60年にわたり未解決

伴星が未確認
水素ラインがないことをうまく説明
爆発までの時間が観測に合致

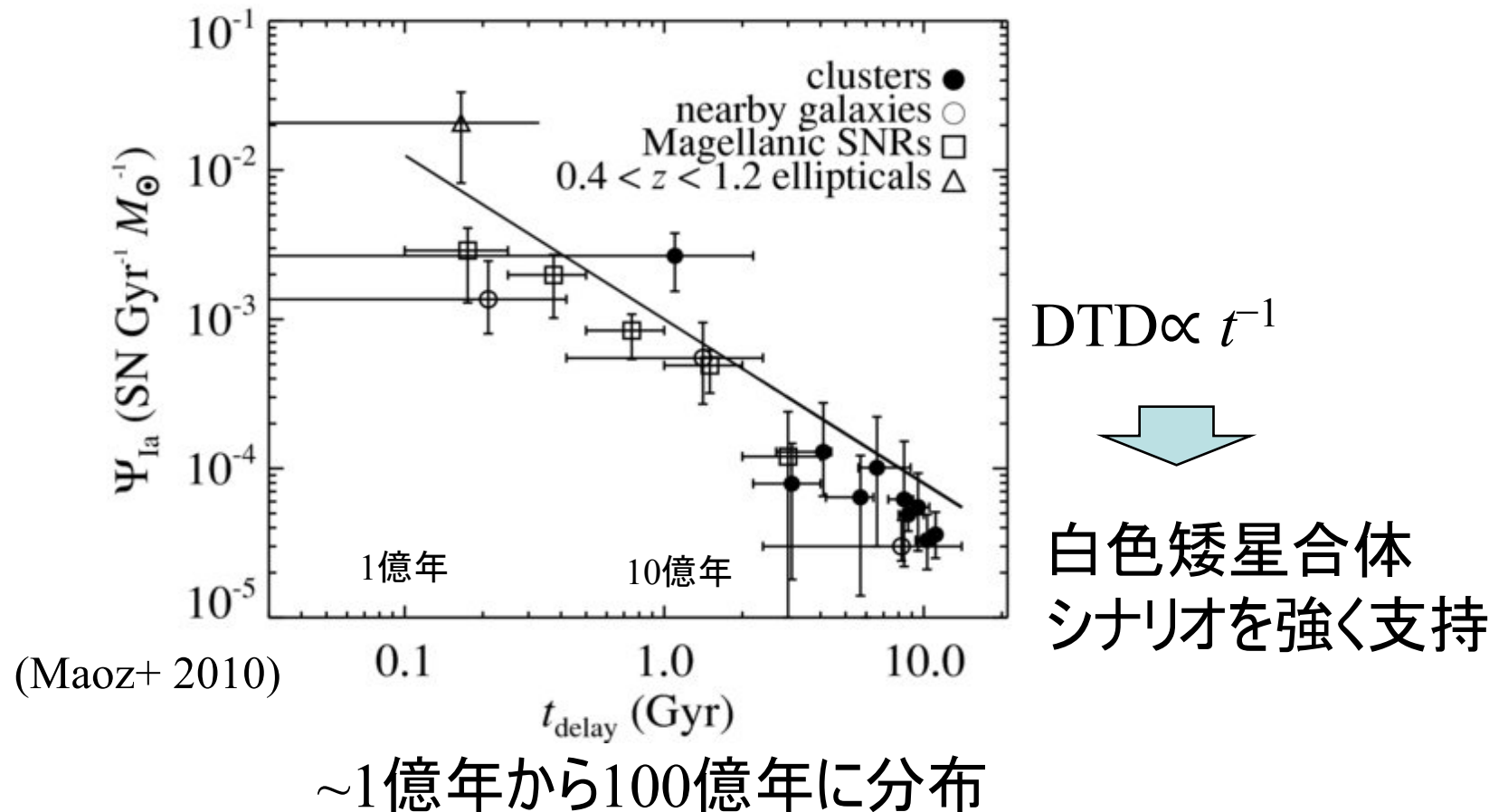


現在では合体シナリオが優勢か
(実際には、両者のシナリオが
共存するのであろう)

Ia型超新星の化学進化への寄与

鉄をはじめとした元素を、
星が生まれて時間が経過してから、
星間ガスへ供給する

Ia型超新星のdelay time distribution (DTD)



3. 漸近巨星分枝星

(Asymptotic Giant Branch: AGB星)

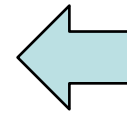


どの星 質量が $1-8 M_{\odot}$ の比較的軽い星の最終進化段階

どの元素 炭素、窒素、*s*過程元素を合成 (~1%程度がIa型超新星に)

供給の時間 比較的長い時間(数億年)で放出

4. 中性子星合体



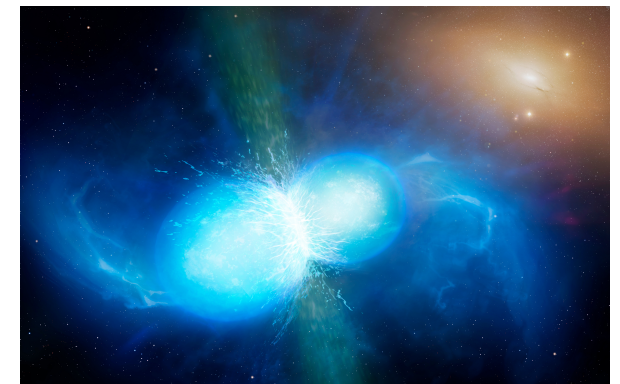
ニューエントリー

(neutron star merger)

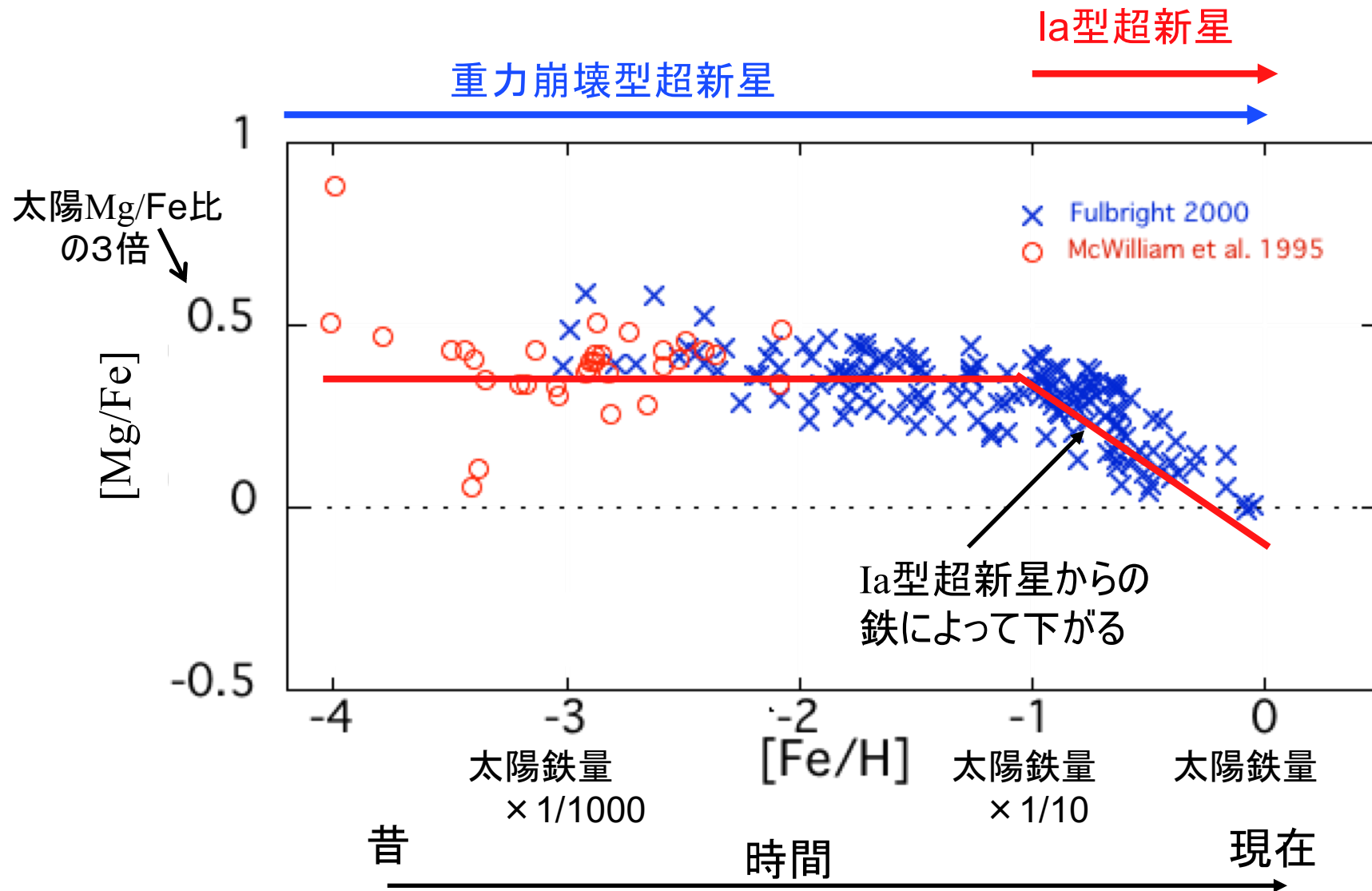
どの星 中性子星同士あるいは中性子星/ブラックホールの連星系

どの元素 *r*過程元素を合成

供給の時間 数千(百?)万~数10億年で放出



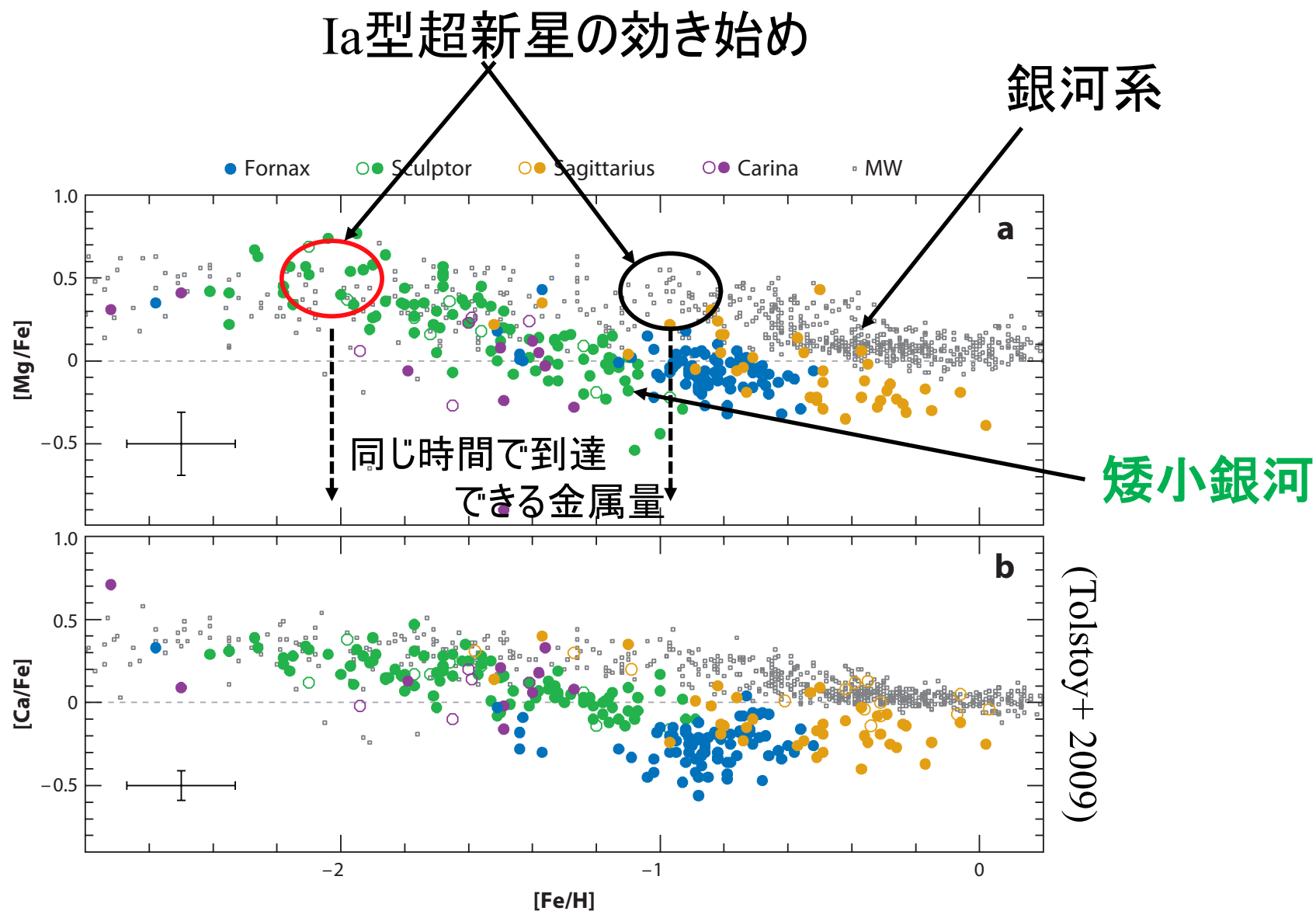
太陽近傍星の[Mg/Fe]組成比の化学進化



$$[Fe/H] = \log (Fe/H)_{\text{星}} - \log (Fe/H)_{\odot}$$

[Fe/H] ~ -1が約10億年に相当

矮小銀河での星形成はゆっくり



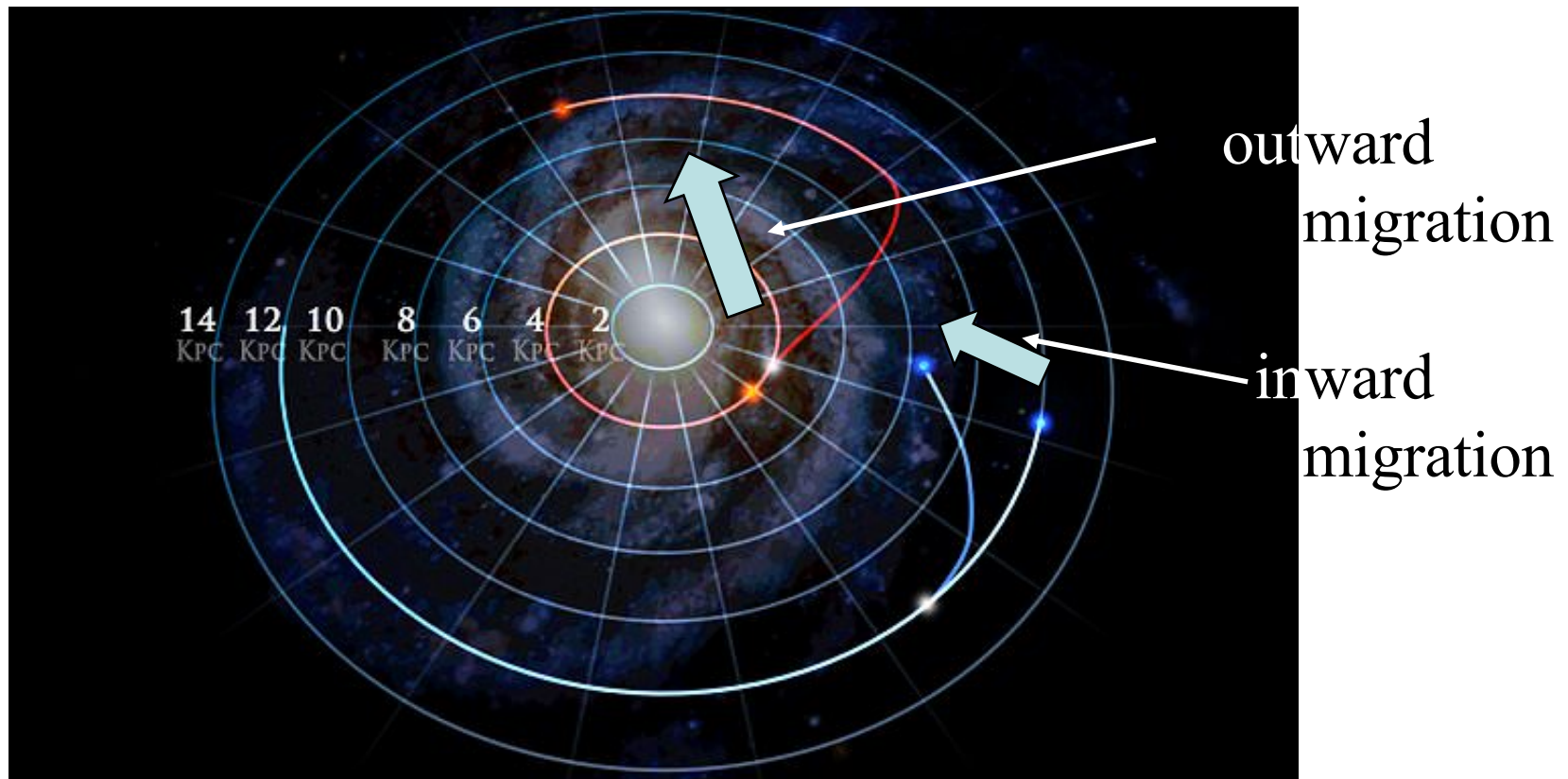
同じ時間で到達する
金属量([Fe/H])が少ない

= 星形成がゆっくり(星形成率が低い)

銀河系化学進化に関する最近の進展について

A new paradigm of Galactic dynamics

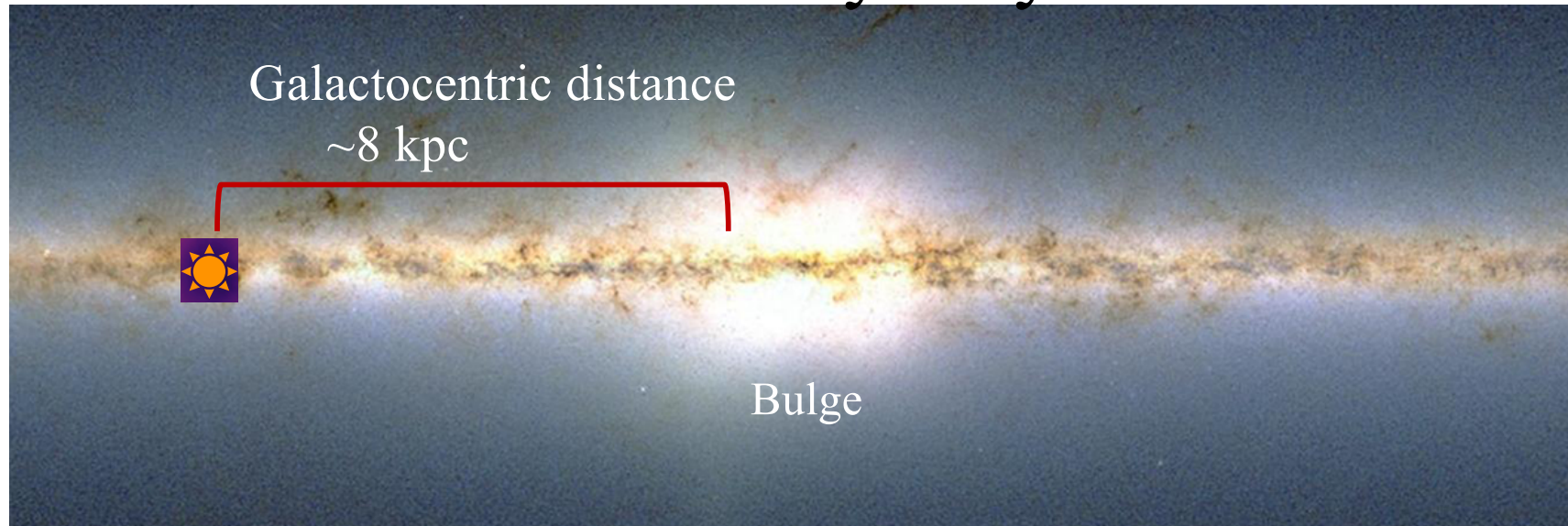
Stars radially move on the Galactic disk (: *radial migration*)



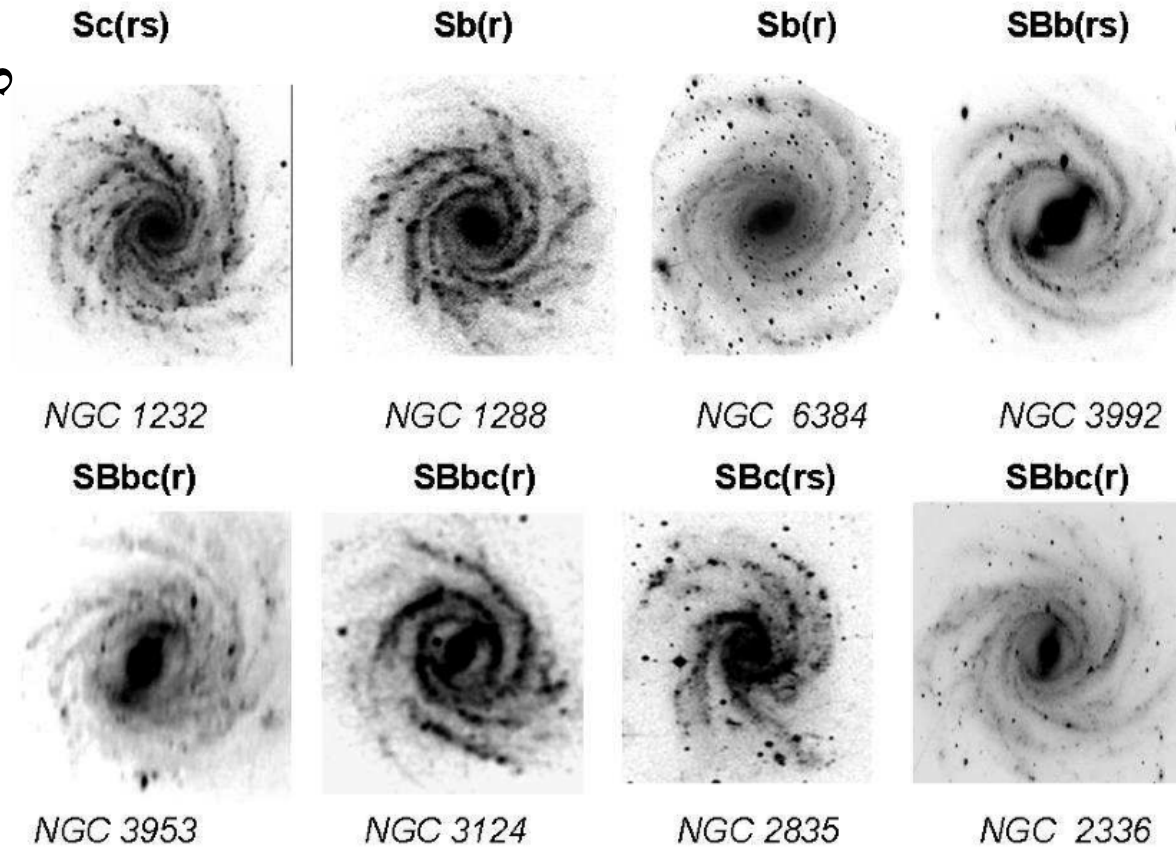
@Danna Berry

This theory predicts that the stars in the solar vicinity represent **the mixture of stars born at various Galactocentric distances over the disk.**

The Milky Way



Milky Way analogues



spiral arm:
A prominent
dynamical
structure

The remarkable progress in the last ~15 years

the controversy over spiral arm since 1960s

“**wave pattern** or **material structure**”

Lin & Shu (1964, 1966)

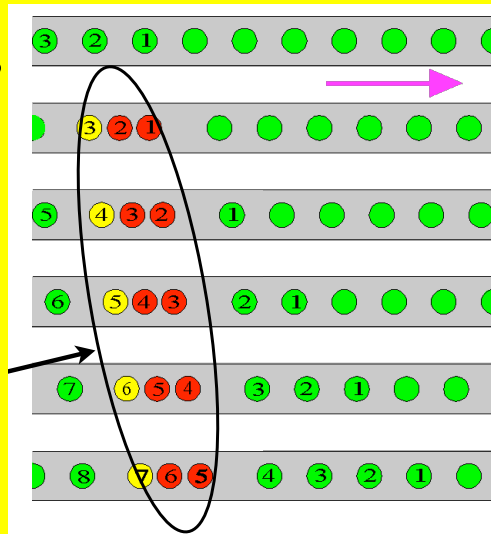
Lindblad, Kalnajs, Bertin

:

(quasi-) **stationary** density wave

“density wave theory”

the place of traffic congestion slowly propagates with changes of member cars



Goldreich & Lynden-Bell (1965)

Toomre

:

transient recurrent spiral

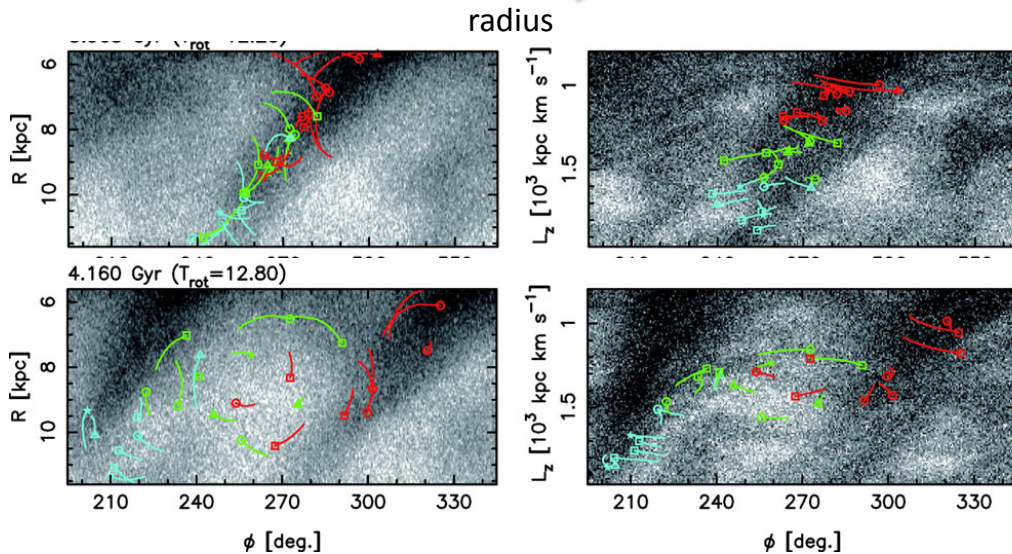
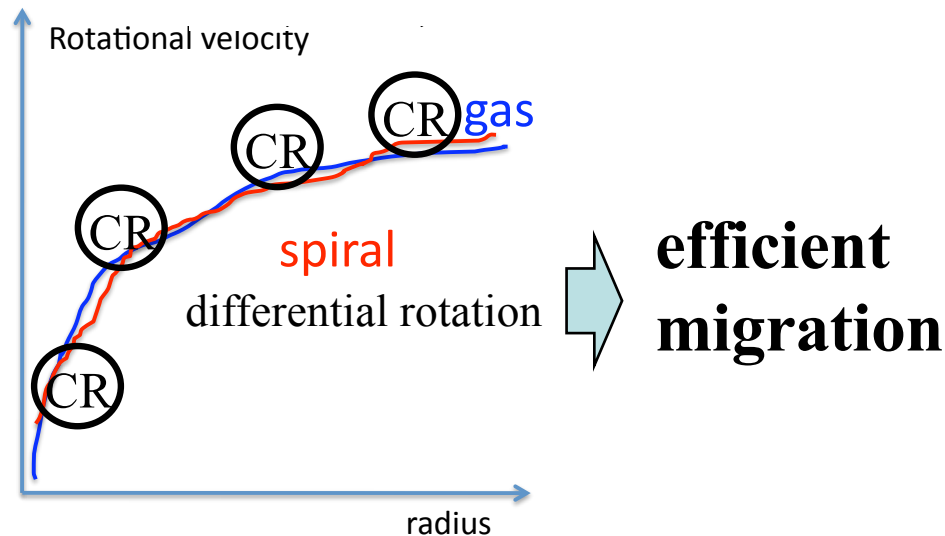
the structure that a high stellar density region formed by self-gravity is stretched by a differential (galactic) rotation

- ✓ a short lifetime ($\sim 1-2 \times 10^8$ yrs)
- ✓ repeatedly generate and die out

A paradigm shift from “wave pattern” to “material structure”

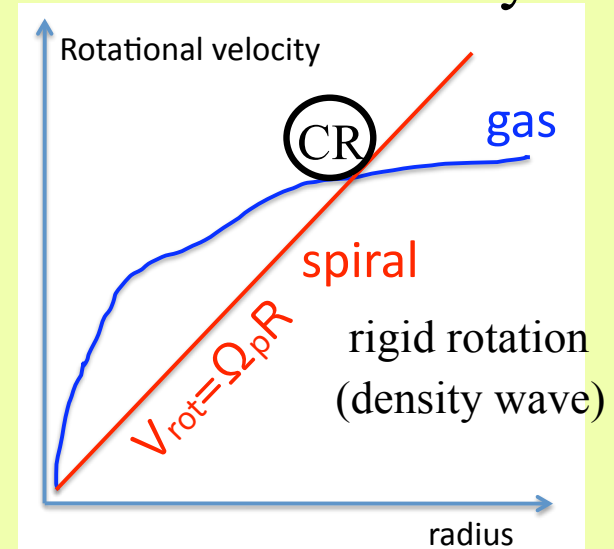
❑ Spirals induce radial migration of stars ❑

Stars radially move via a gravitational interaction with transient recurrent spirals by losing or gaining angular momentum: **This happens around the corotation radius.**



(Baba+ 2013)

On the other hand, in the case of density wave,

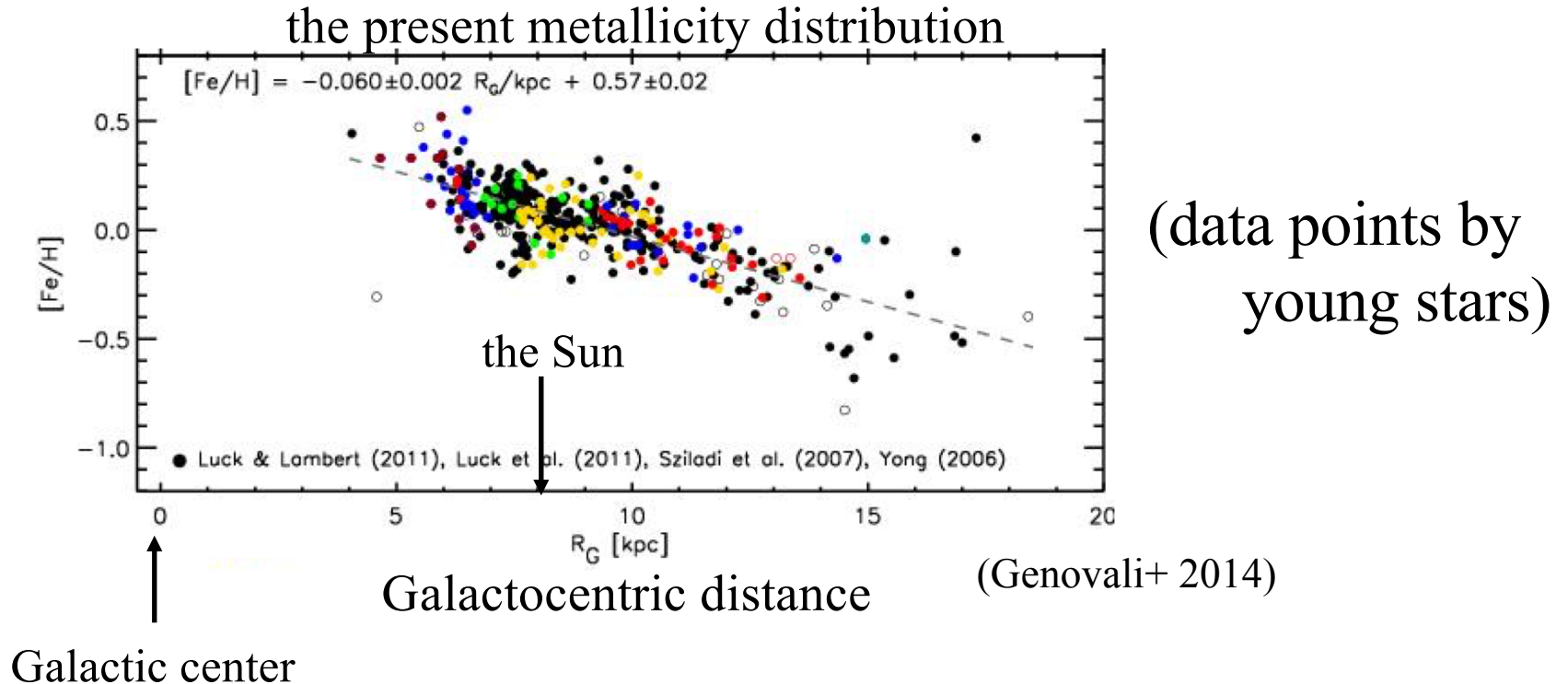


Stars just go across spirals

Impact of radial migration on Galactic chemical evolution

The chemical evolution of the disk differs in accordance with Galactocentric distance (R_{GC}).

observationally evidenced by
current radial abundance gradient
showing higher metallicity at a smaller R_{GC}



Theoretical interpretation of abundance gradient

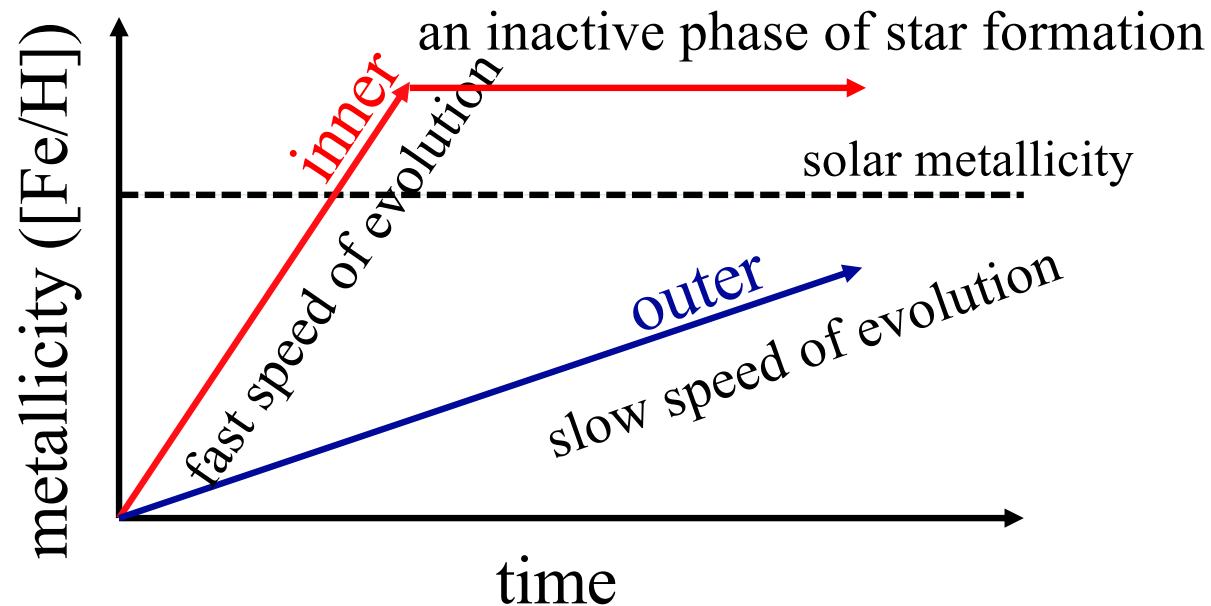


“**inside-out scenario**” (e.g., Chiappini+ 2001)

The inner region was formed faster and becomes more metal-rich than the outer region

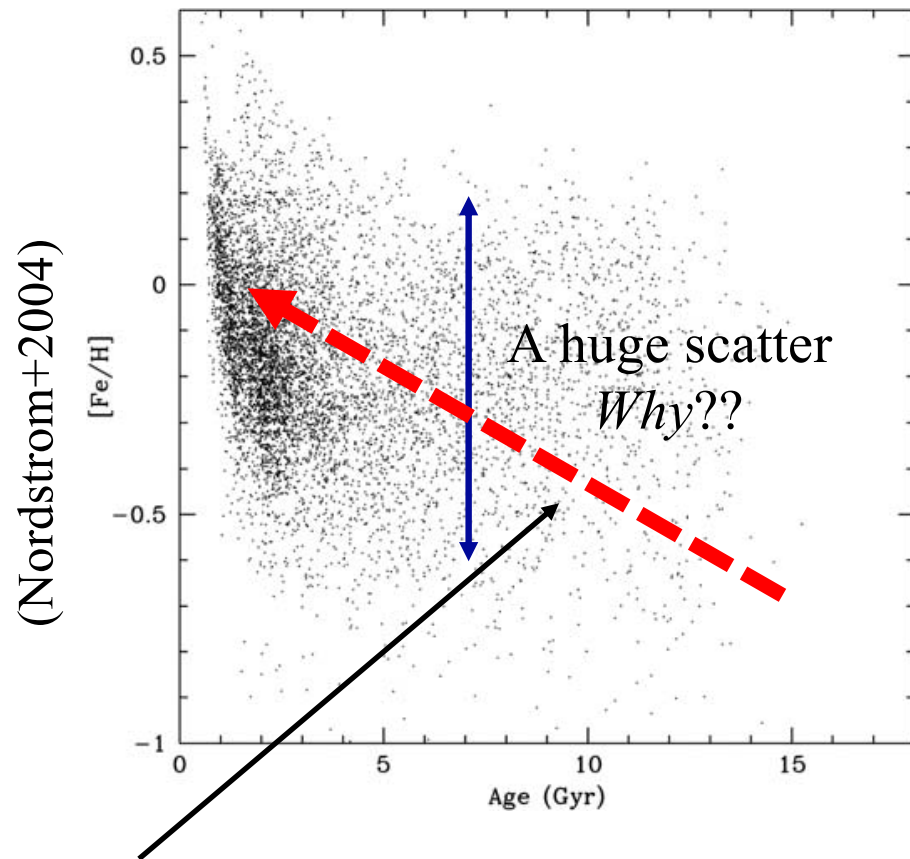
Inner disk: formed at old times within a short timescale, reaching high metallicity

Outer disk: slowly formed up to the present with currently low metallicity



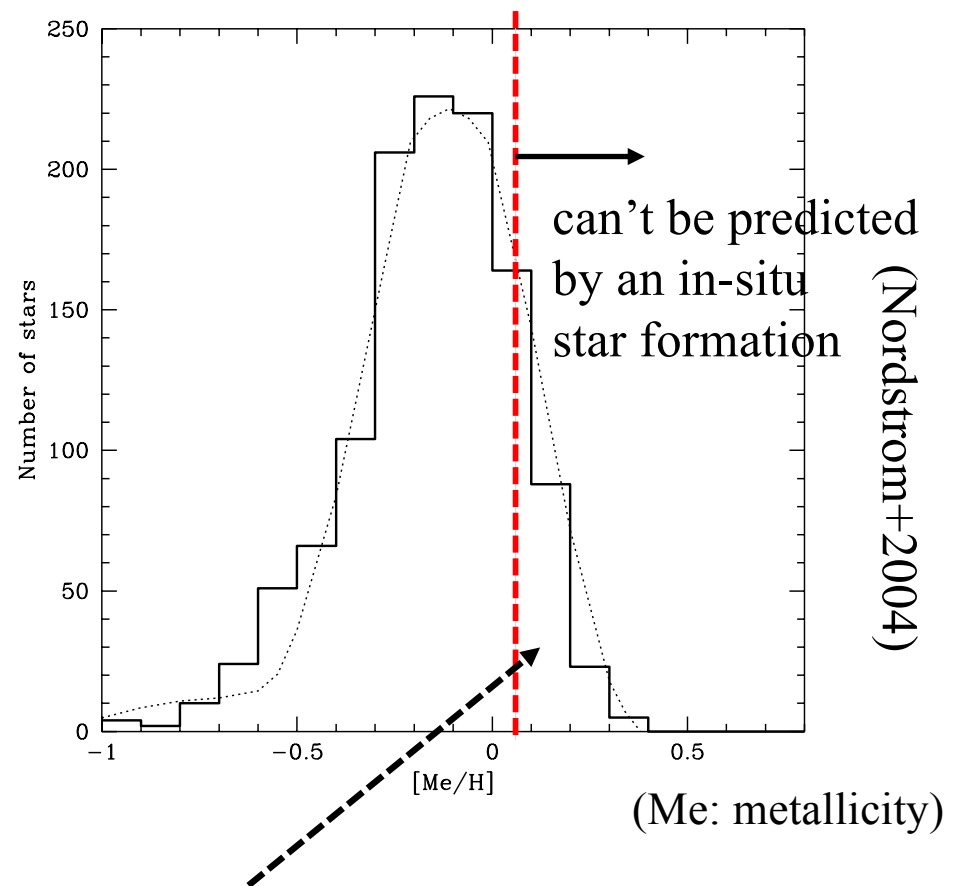
Observational facts well explained

a large scatter in age-metallicity relation



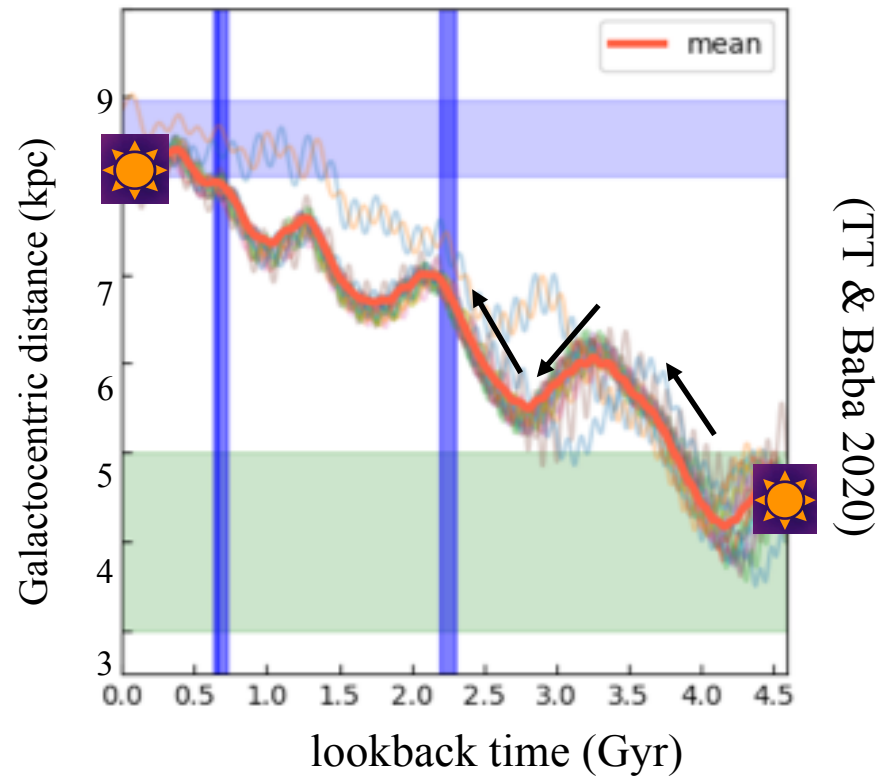
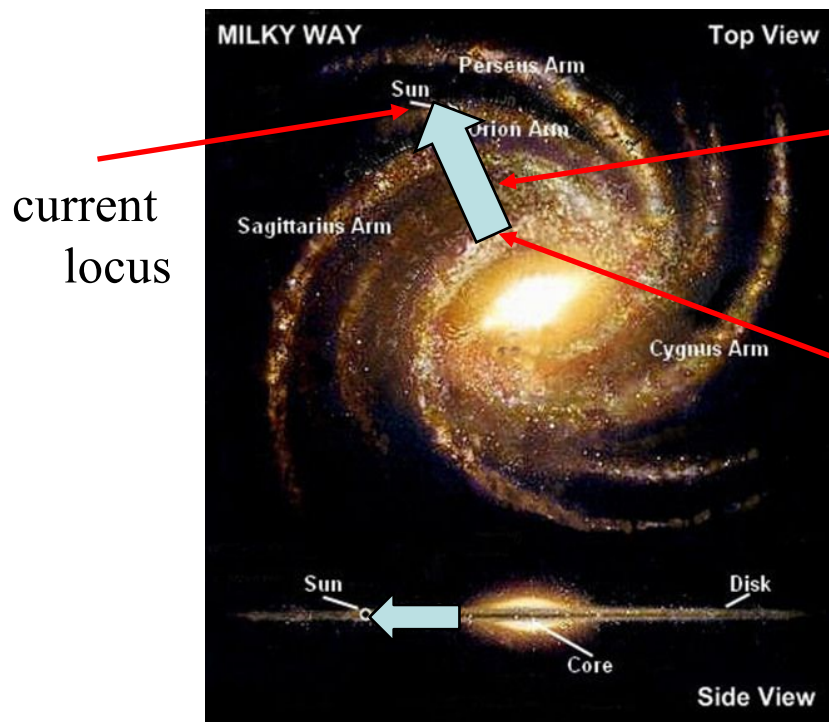
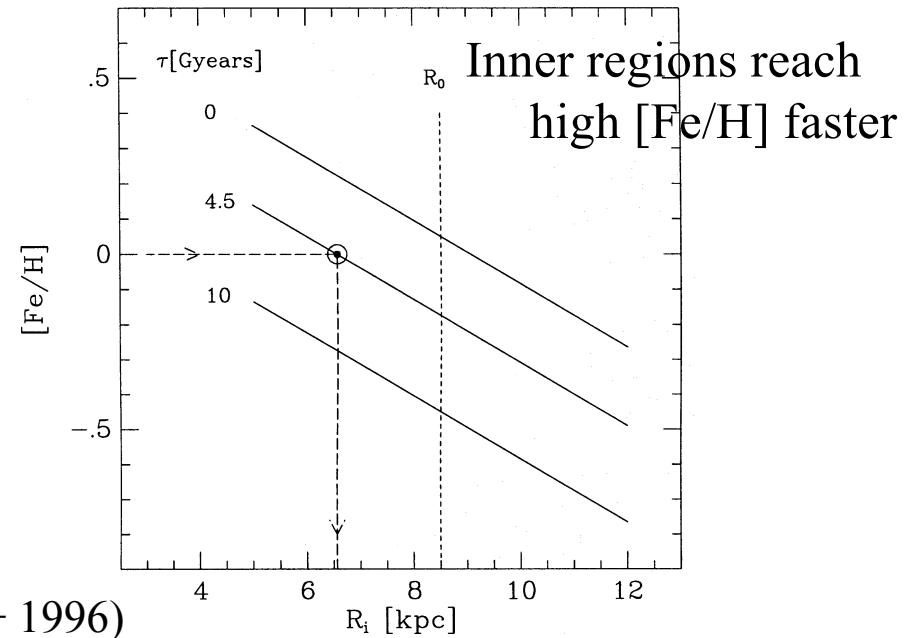
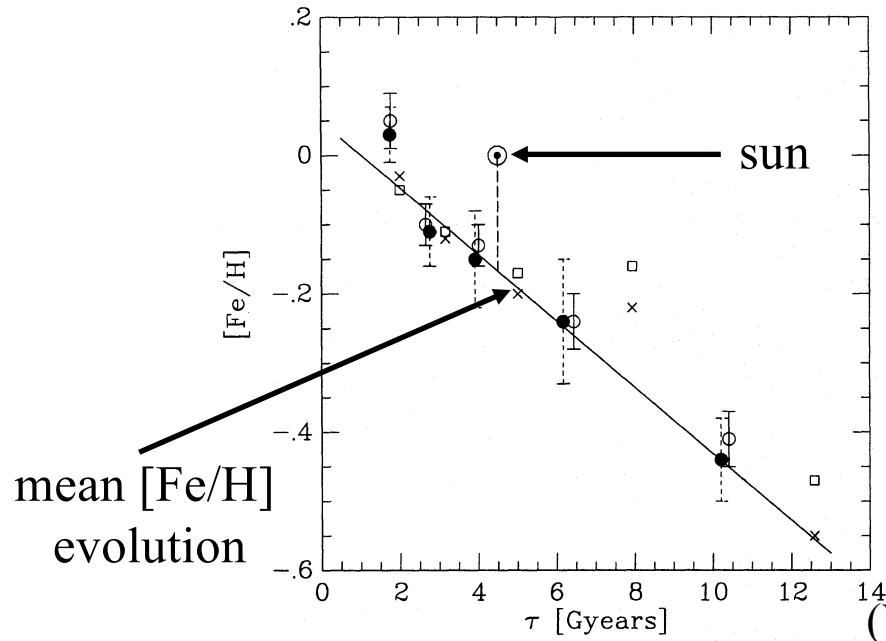
A mixture of stars with various age-[Fe/H] relations makes this trend unseen

the presence of super metal-rich ($>[\text{Fe}/\text{H}]=0$) stars



stars migrated from the inner disk

The solar system also migrated from the inner disk

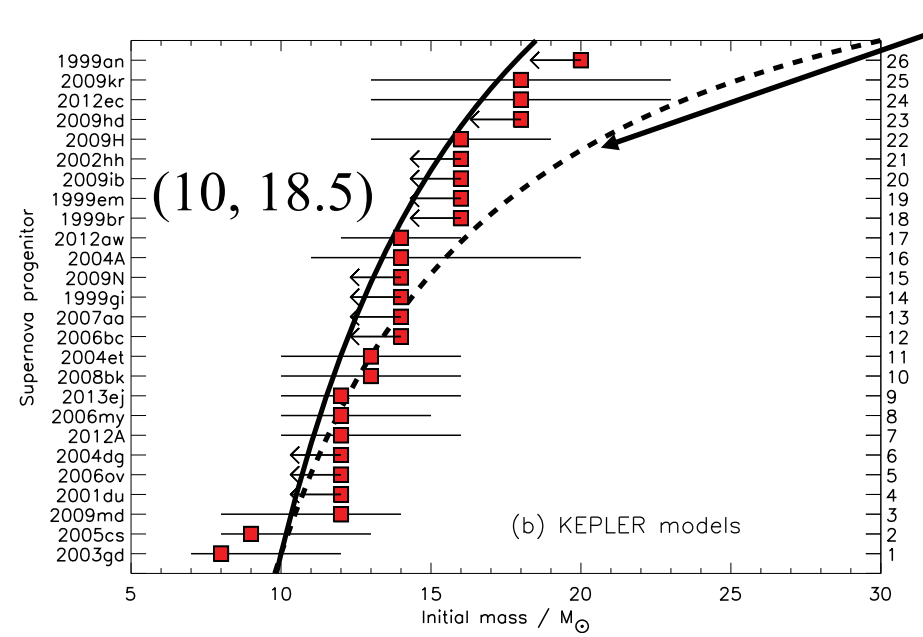
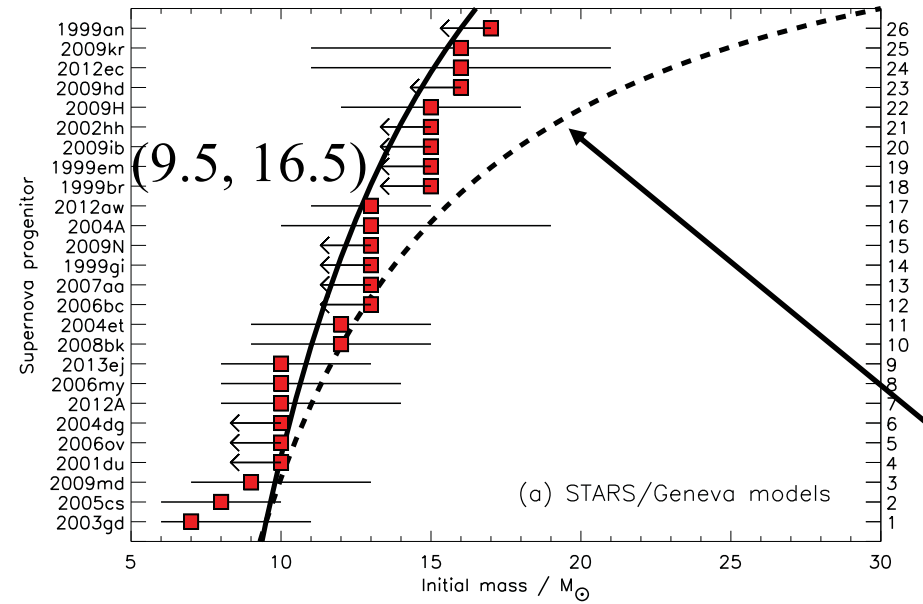


狭範囲に限定された重力崩壊型超新星親星質量 が示唆する銀河系化学進化と超新星頻度史

ニュートリノ研究とのコラボへ

The observational evidence for the missing high-mass CCSN progenitors

Cumulative frequency of the progenitor masses with the Salpeter IMF



$m_{\max} = 30 M_{\odot}$

, suggesting

$m_{\max} \approx 18 M_{\odot}$

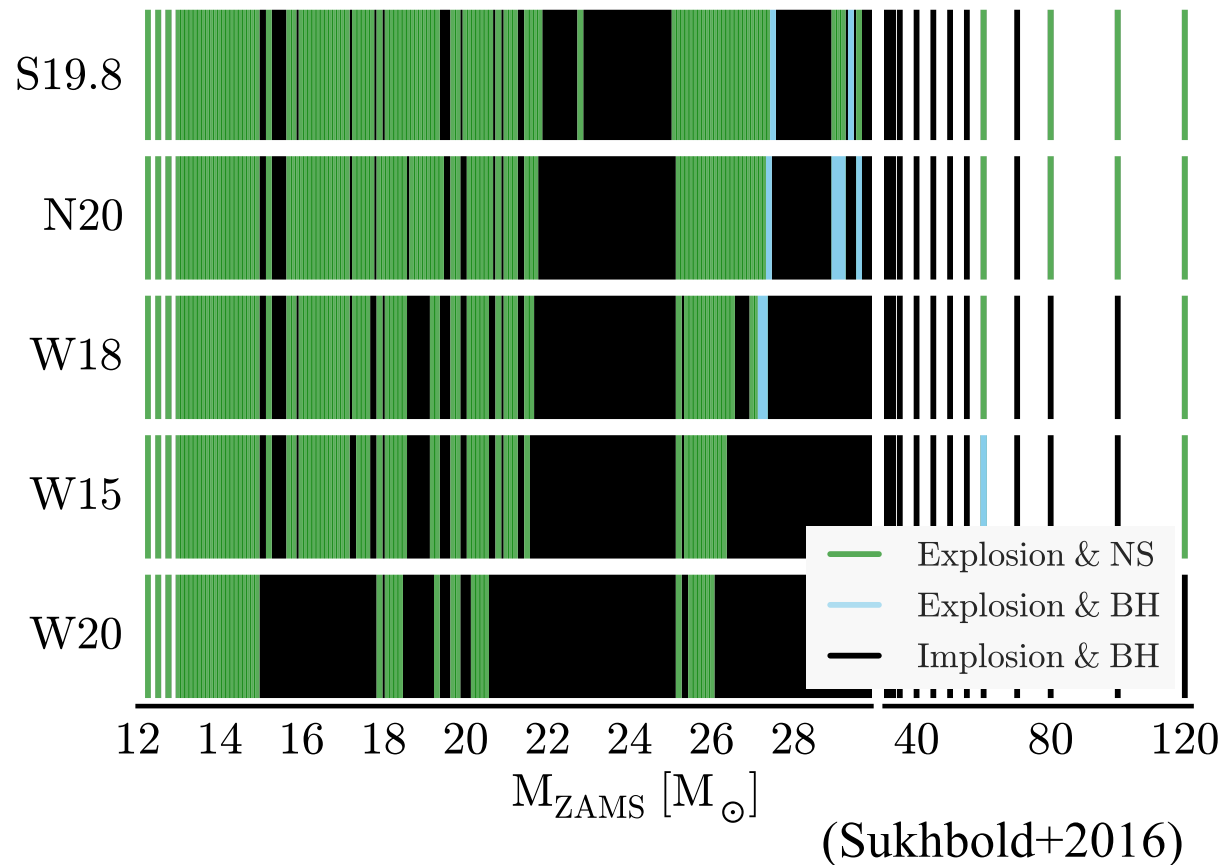
with

$m_{\min} \approx 8 M_{\odot}$

(Smartt 2015)

The theoretical modeling of CCSNe supports a low m_{\max}

the complex explosion/BH landscape



an increase in the number of CCSNe, compared to a single mass range: $8-18M_{\odot}$

13% ($m_{\max}=22.6 M_{\odot}$)

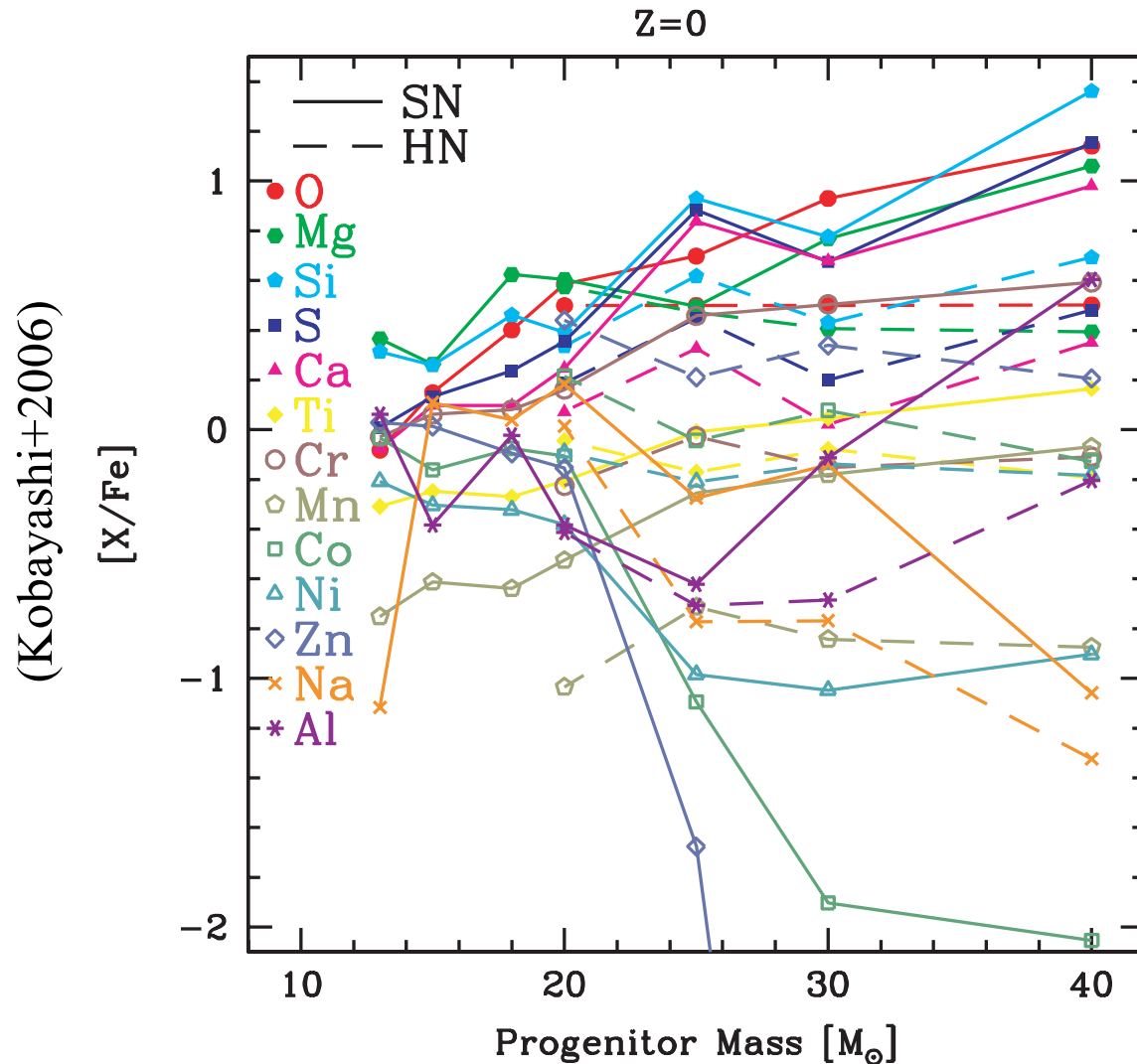
11% ($m_{\max}=21.2 M_{\odot}$)

↑
If a single mass range is assumed

It may be reasonable to assume the CCSN mass range = $8-18M_{\odot}$

The conventional Galactic chemical evolution scheme

adopts a high m_{\max} such as $100 M_{\odot}$
(at least $50 M_{\odot}$)



If $m_{\max}=18 M_{\odot}$,

The CCSN number
reduces to ~70%

The reduction in the
total amount of heavy
element is more serious

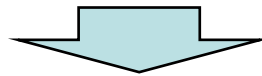
m_{star} \nearrow m_{element} \nearrow
reduces to ~50%

果たして銀河系化学進化は超新星親星上限質量: $18\sim 20 M_{\odot}$
を受け入れられるのか？

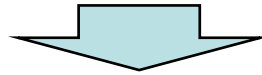
SFR

IMF

化学進化は**星形成率**と**星の初期質量関数**で大方が決まる



効率が悪くなった化学進化をある程度は星形成率を高めることで、
埋め合わせはできそう

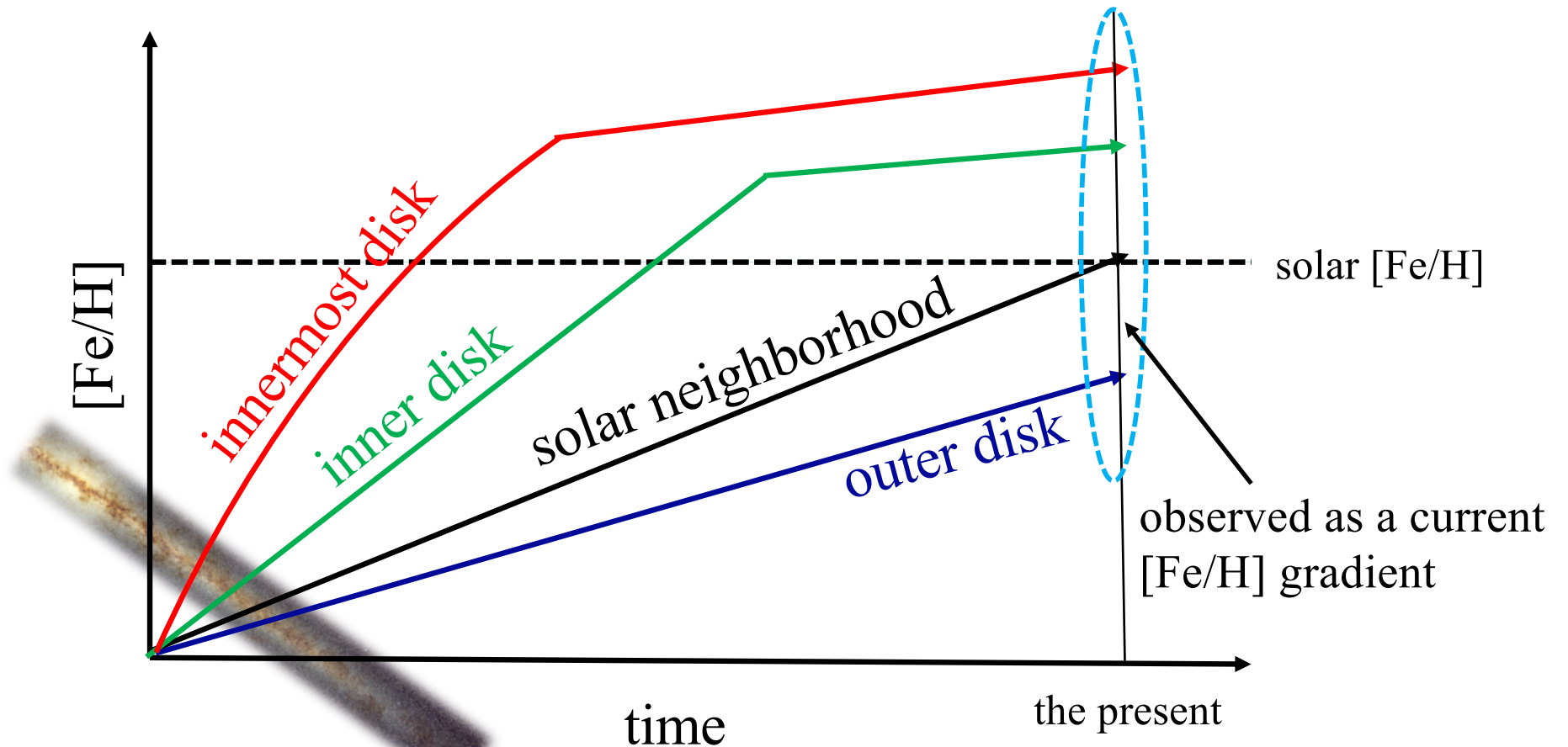


とは言え、難しそう（当初は相容れないという趣旨の論文を
書くつもりでこの仕事を開始した）

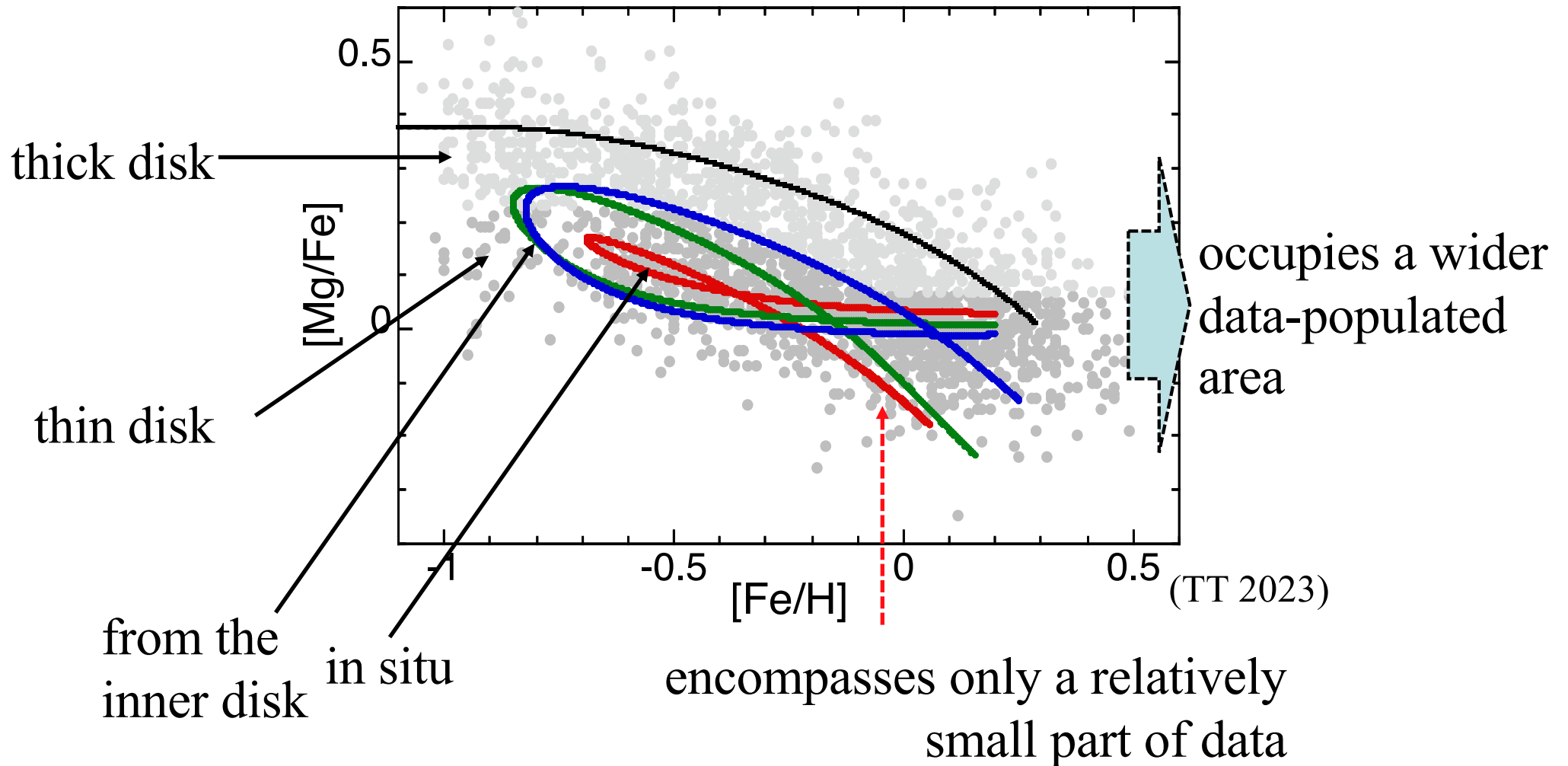


いや待てよ。新たな銀河化学力学進化の枠組みがあるではないか

This theory predicts :
**the stars in the solar vicinity represent
the mixture of stars born at
various Galactocentric distances over the disk**

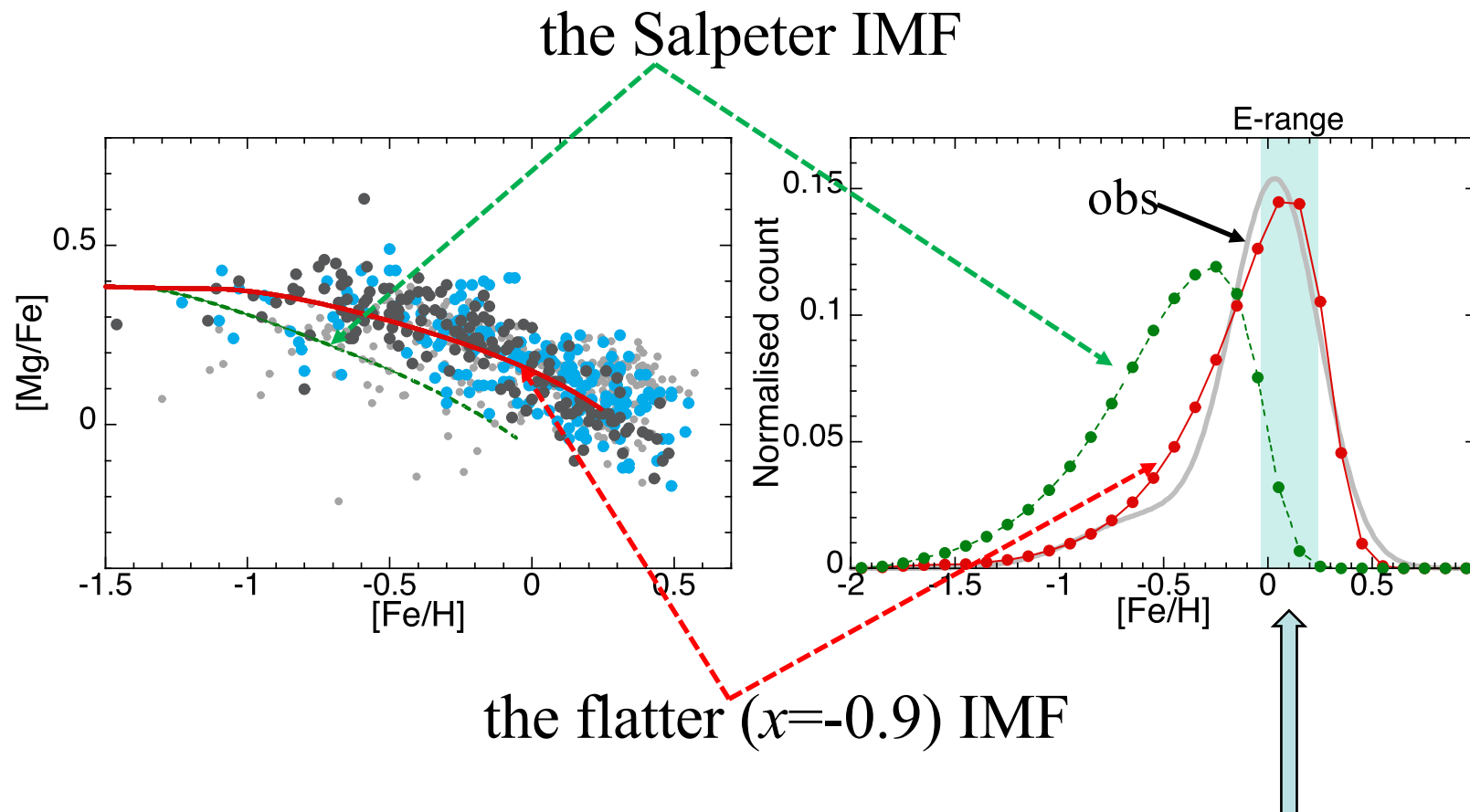


Local Galactic chemical evolution accepts
a 8-18 M_{\odot} mass range



On the other hand,

The Galactic bulge demands more CCSNe than that expected from a 8-18 M_{\odot} mass range with the Salpeter ($x=-1.35$) IMF



This argument for **a flat IMF** in the Galactic bulge can be extended to an insight into the form of **the IMFs in elliptical galaxies.**

↳ **a flat IMF**

Galactic chemical evolution suggests
the variable IMF in the Universe

How star formation proceeds?

moderate mode

bursting mode

||

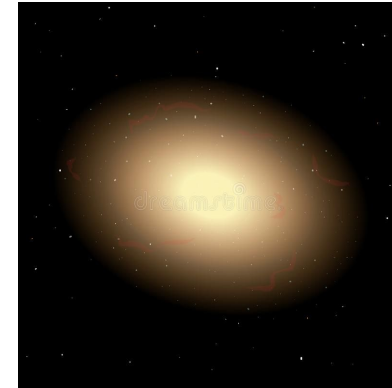
||

(Pouteau+2022)

late-type galaxies



early-type galaxies



the IMF

the Salpeter

($x=-1.35$)

the one generating

numerous CCSNe

($x=-0.9$)

If the IMF is universal

proportional

Cosmic star formation rate \propto Cosmic CCSN rate

If the IMF is non-universal

& galaxy composition (z)

a break in the proportionality

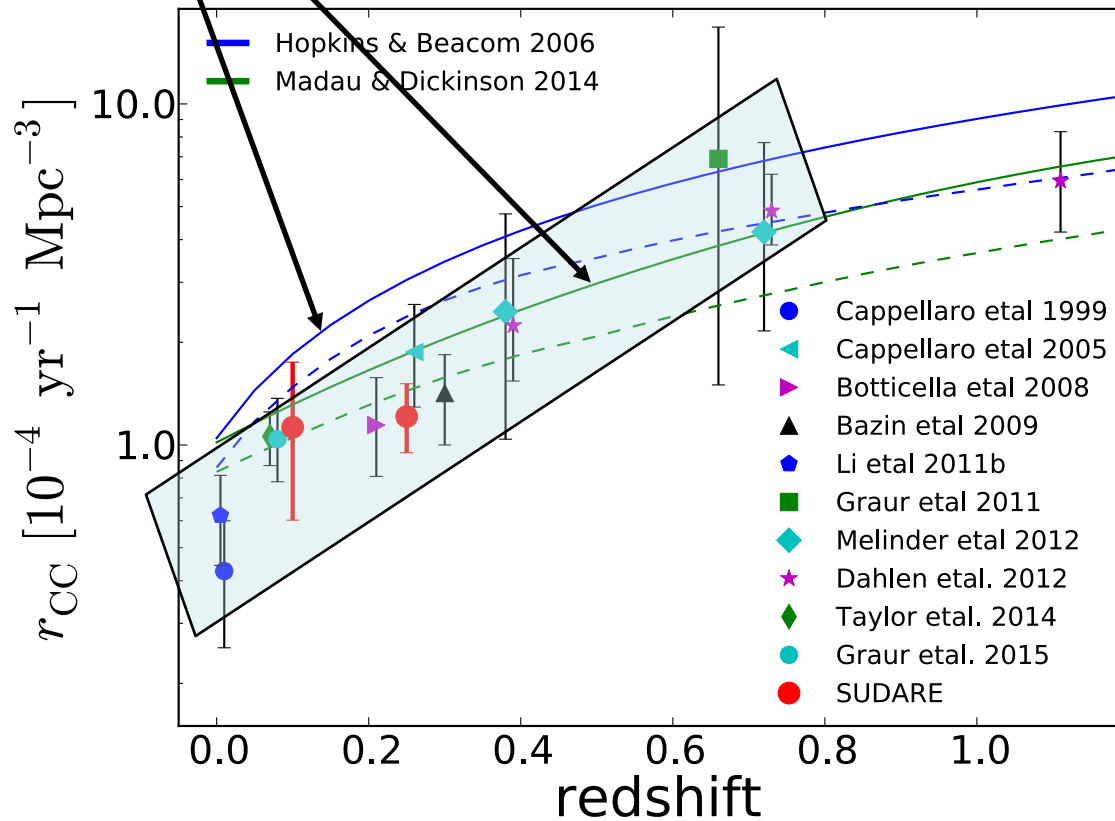
Cosmic star formation rate ~~\propto~~ Cosmic CCSN rate

The observed CCSN rate's slope is steeper than
the predictions from the observed cosmic star formation rate

with the Universal IMF

$$r_{\text{cc}}(z) = k_{\text{cc}} h^2 \Psi(z)$$

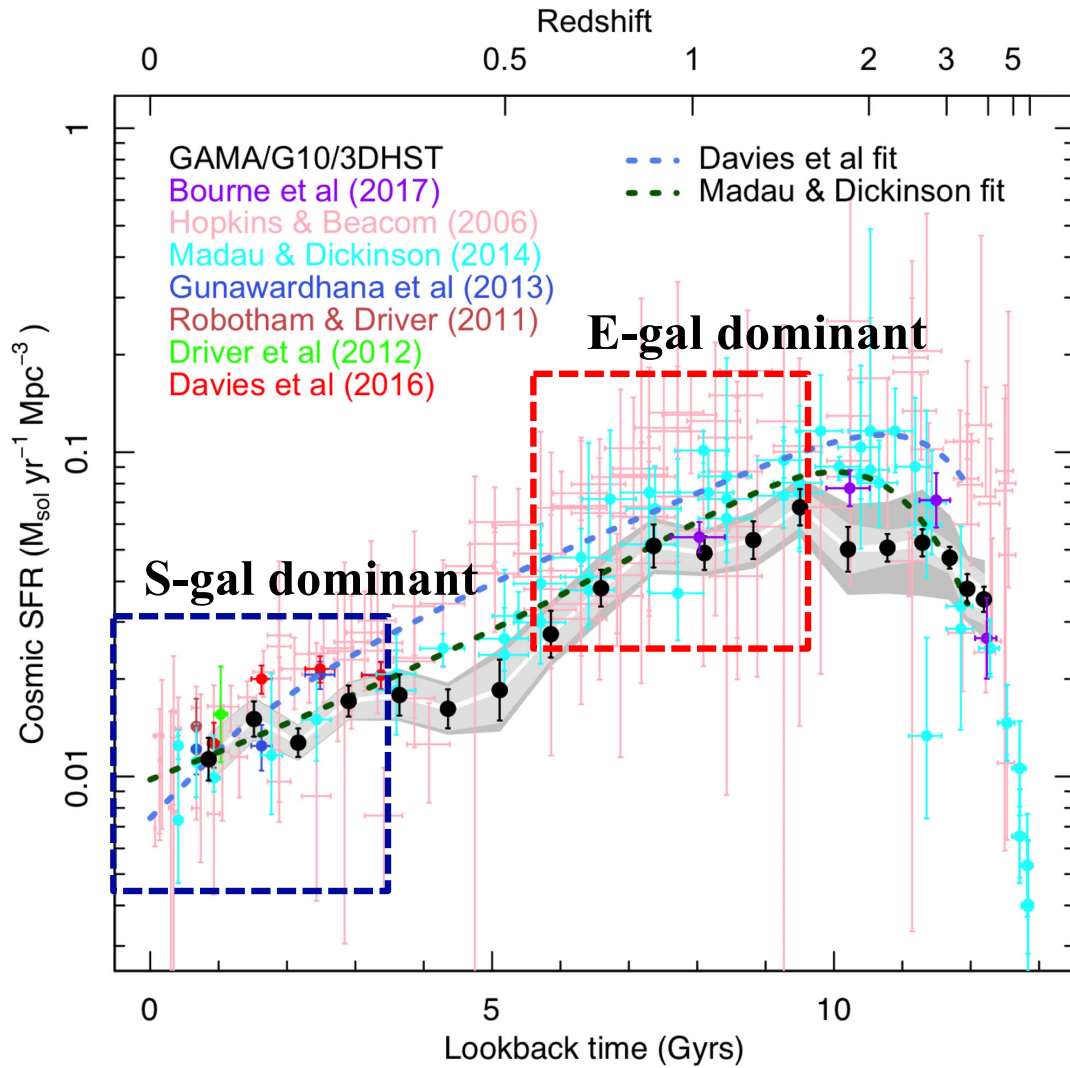
||
 a scale factor of massive stars
 that explode as CCSNe per unit mass of the IMF



Assuming,
 $k_{\text{cc}} = \text{const.}$

(Cappellaro+2015)

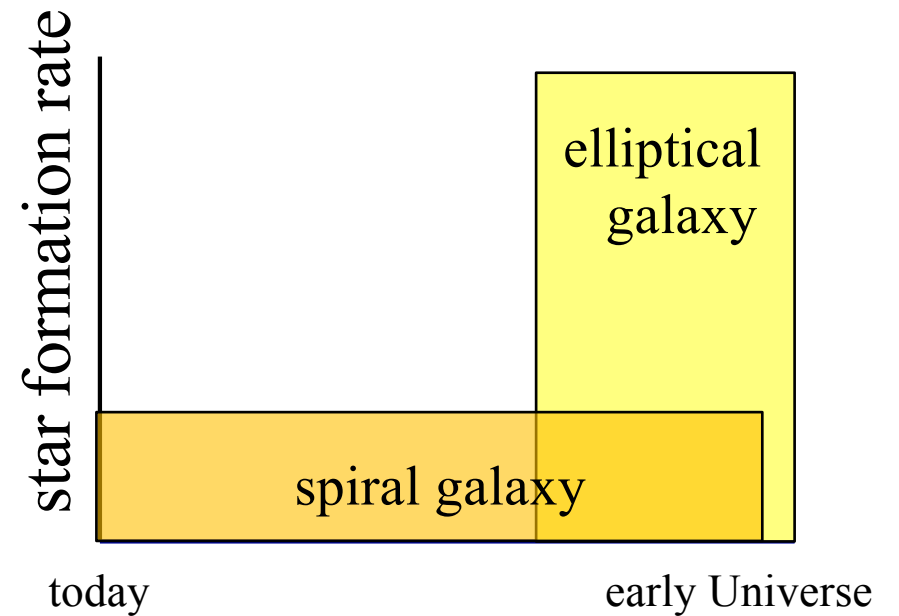
Cosmic star formation history



(Driver+2018)

Star formation history

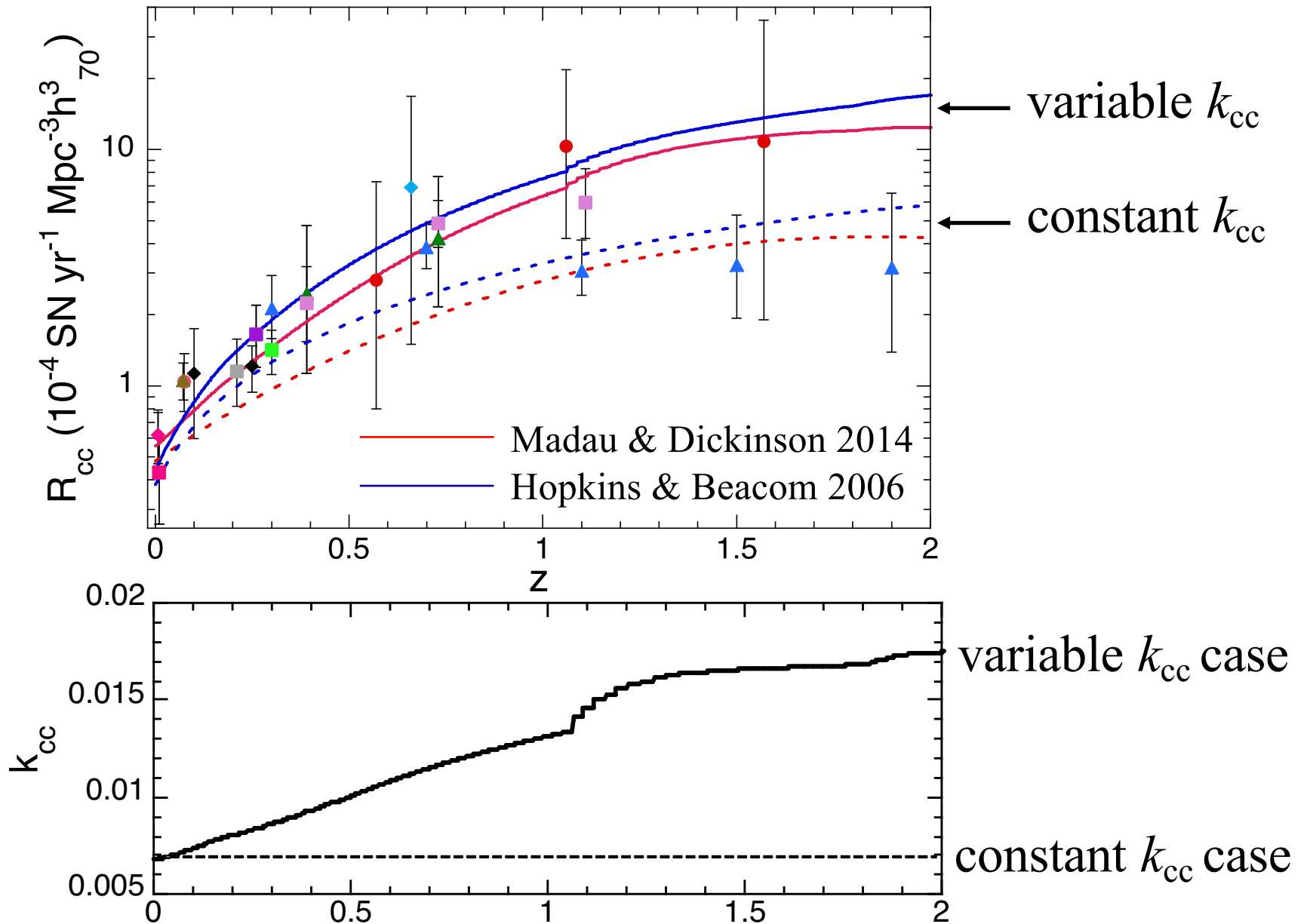
Ellipticals vs. Spirals



k_{cc}

CCSN rate contrast

The evolution of cosmic CCSN rate with redshift



Summary

- ❑ The narrow mass range ($8-18 M_{\odot}$) for CCSN progenitors is found to be accepted by Galactic chemical evolution
- ❑ This narrow mass range strongly supports a variable IMF among different type of galaxies
- ❑ This variable IMF well explains an observed large contrast in the cosmic CCSN rates
- ❑ Our result **predicts a high rate of BH formation**, which must greatly influence the count of DBSN neutrinos

