

この宇宙に、  
宇宙文明は  
いくつあるのだろうか？

太田耕司  
京都大学 大学院理学研究科  
宇宙物理学教室

2014年2月2日 宇宙ユニットシンポ

# 最初に注

- 普段こういう研究を専門的にしているわけがありませんので、間違い・勘違いなど含む可能性があります。ご注意ください。
- もっと適任の方がおられると思いますが、以下の話はまだ宇宙ユニットでどなたも話されていないようなので、お引き受けした次第です。

# 宇宙文明

- カルダシェフによる分類 (1964)

タイプI 惑星規模のエネルギー  $10^{19}$  erg/s  
(太陽からのエネルギーの10万分の1)

タイプII 恒星規模のエネルギー  $10^{33}$  erg/s

タイプIII 銀河規模のエネルギー  $10^{44}$  erg/s

ここでは、IかII程度を想定

# ドレイク(Drake)の方程式(1961)

- 他の星と通信する(を試みる)文明レベル

$$N = R f_p n_e f_l f_i f_c L$$

R: 1年間に銀河系内で誕生する恒星の数 (10)

$f_p$ : 誕生した恒星が惑星を持つ確率 (0.5)

$n_e$ : その惑星系で生命の存在が可能となる範囲にある惑星の数 (2)

$f_l$ : そのような惑星に生命が誕生する確率 (1)

$f_i$ : 誕生した生命が知的生命体にまで進化する確率(0.01)

$f_c$ : 知的生命体が他の星に向かって通信を行う文明を形成する確率(0.01)

L: そのような文明が存続する年数 (1万年)

ドレイクの値を使うとN=10

# R 銀河系内で年間誕生する恒星数

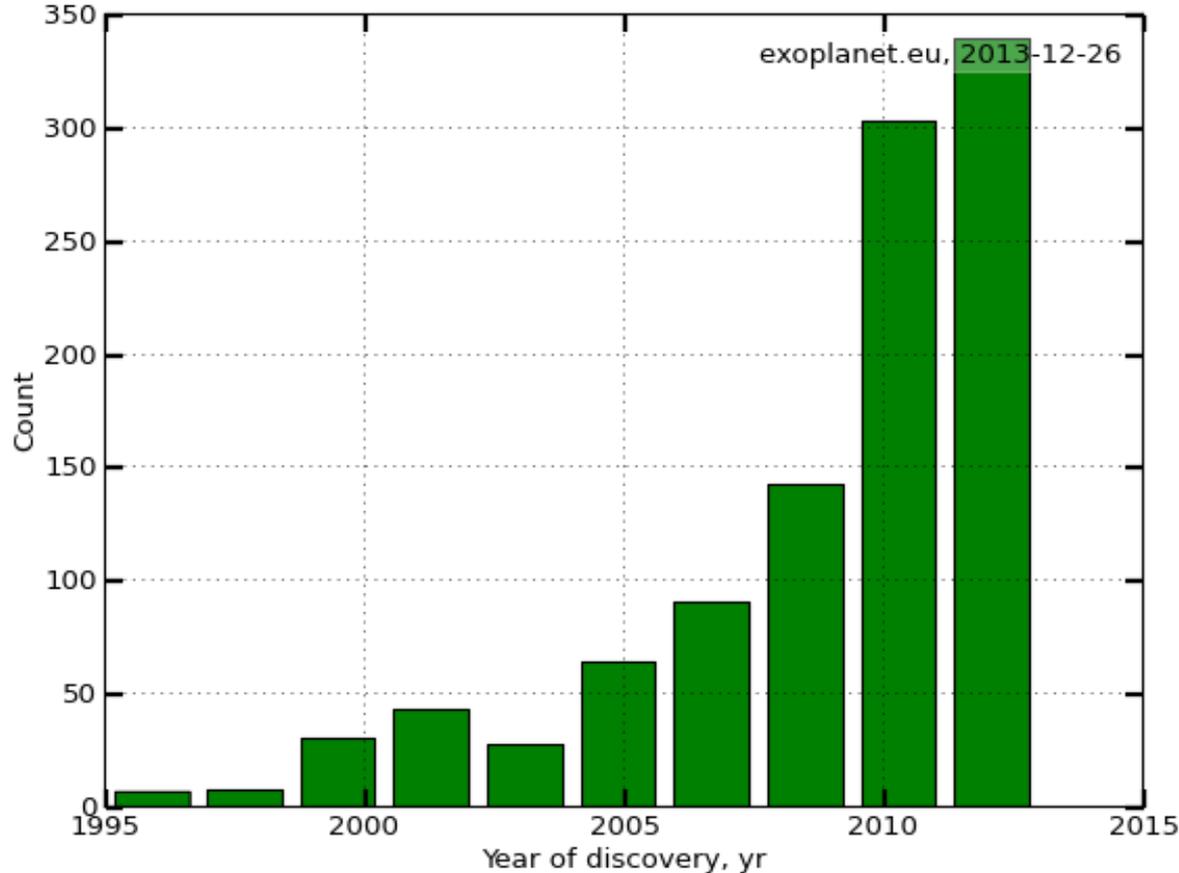
- 銀河の中で1年間に誕生する星の数
- 現在の恒星数 約1000億個
- 銀河の年齢 約100億年
- $\Rightarrow R \sim 10$

# fp 惑星(系)を持つ恒星の割合？

- 約20年前まで、ほとんど不明
- 1995年 ペガサス座 51番星に惑星発見
- その後、どんどん見つかってきた

# 系外惑星の発見数の推移

発見数



近年ケプラー衛星による発見が多い

毎年約100個発見

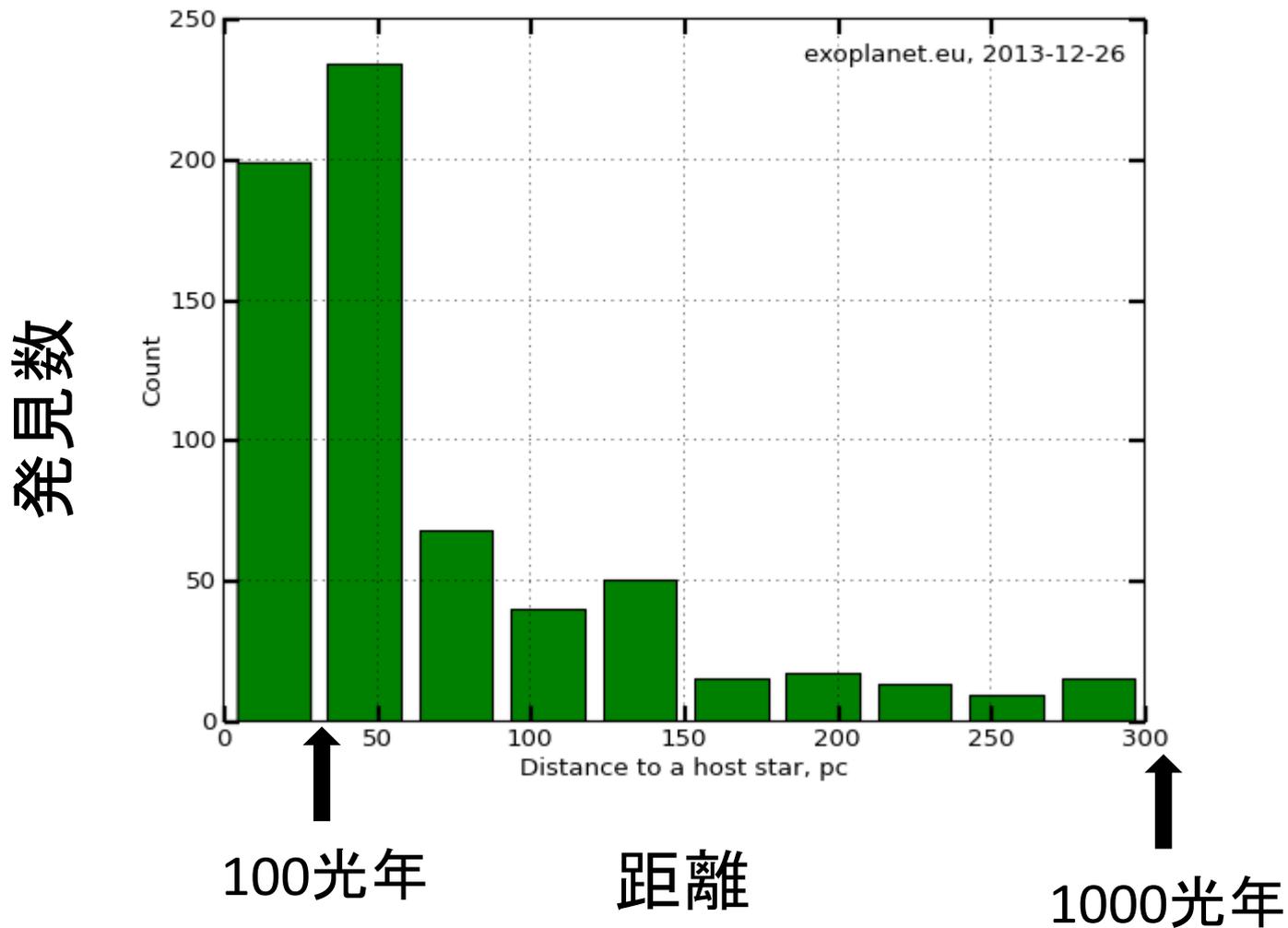
候補まで含めると  
2000-3000個

1995

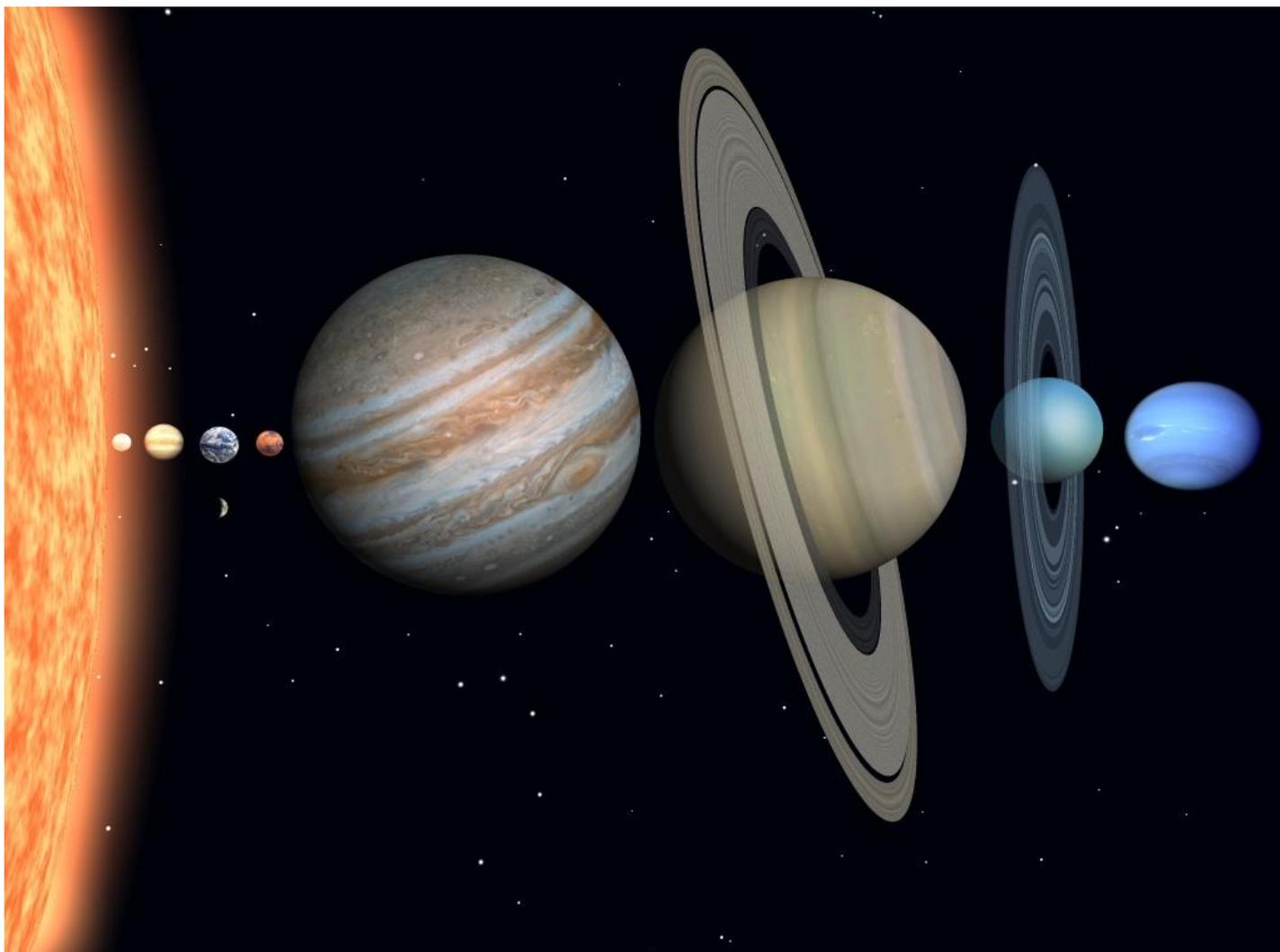
2010

惑星の発見された年

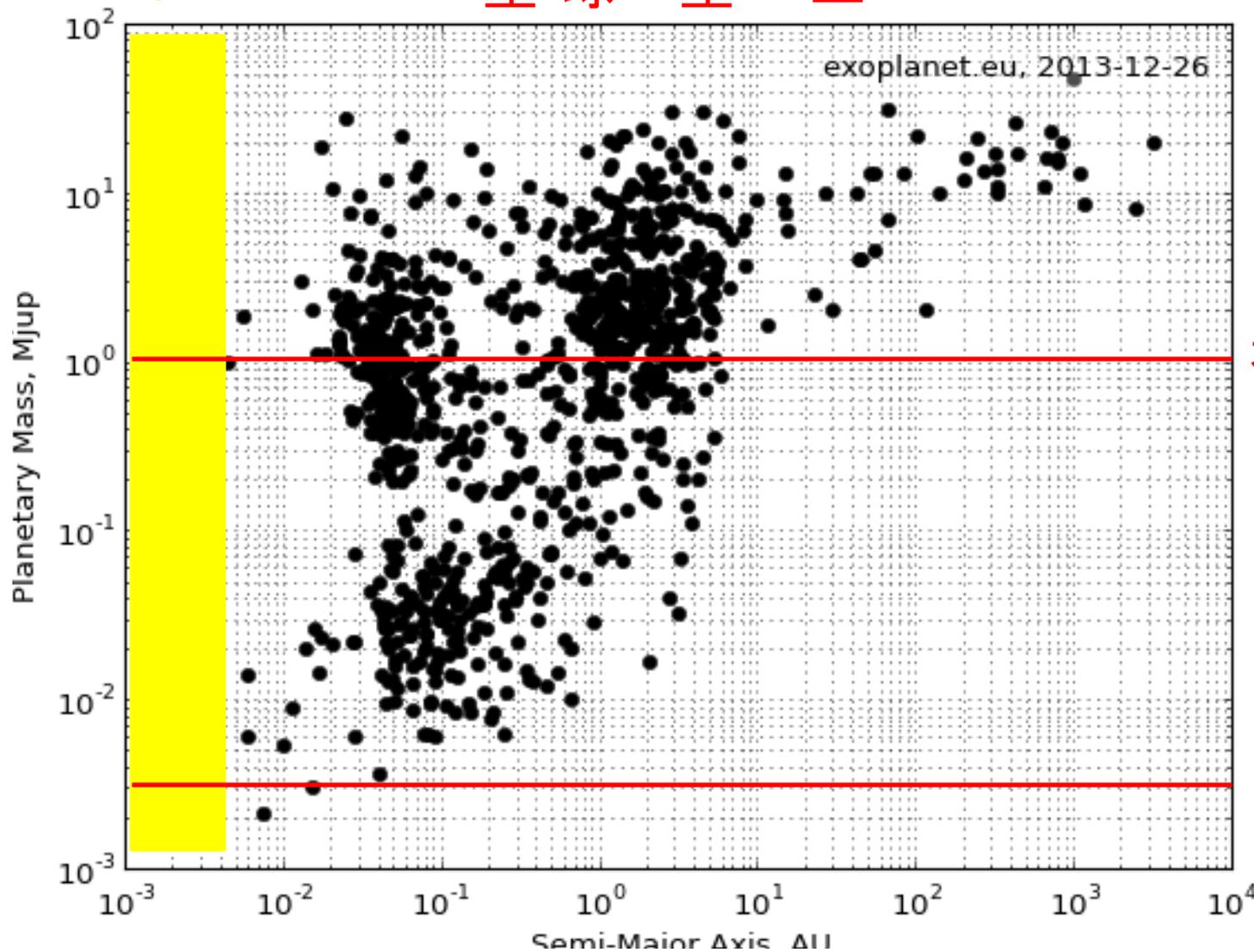
# どの位遠くの惑星が見つまっているか？



# 太陽系の惑星



惑星の質量(単位:木星質量)



太陽

水星

地球

木星

海王星

木星質量

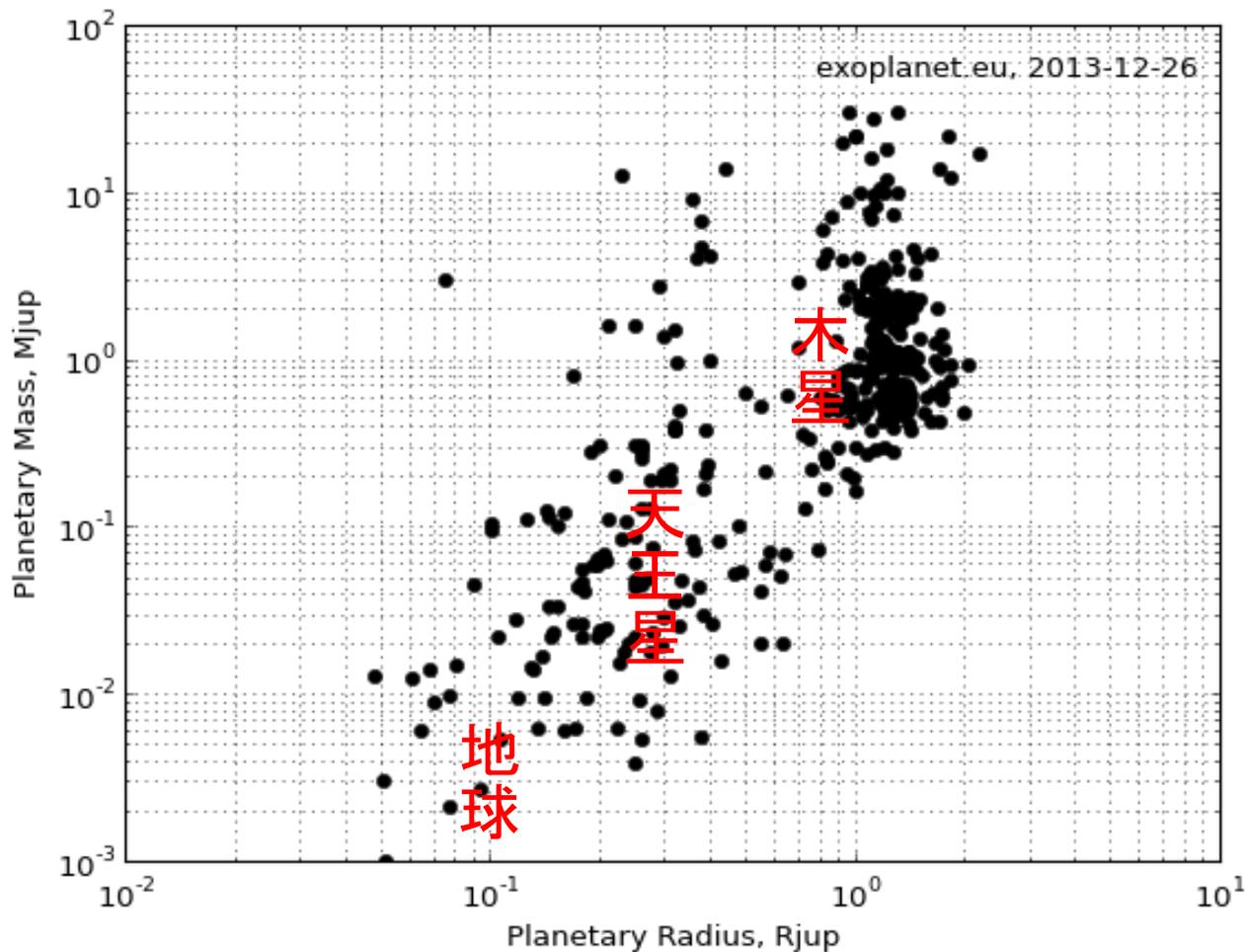
地球質量

厳密には  
下限値

惑星の軌道半径(太陽と地球の距離を1)

# 惑星の大きさと重さ、密度

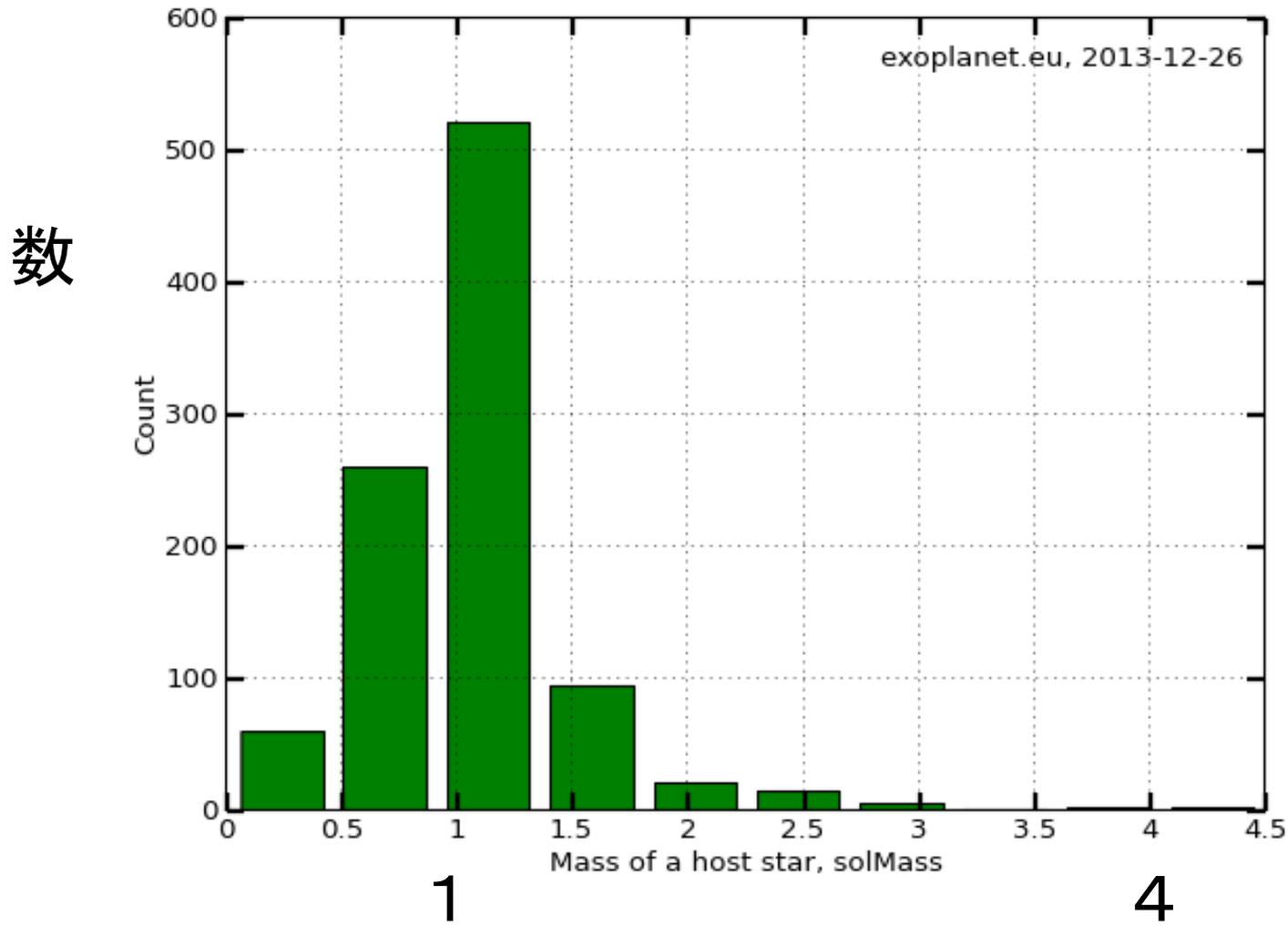
惑星の質量(単位:木星質量)



厳密には下限値

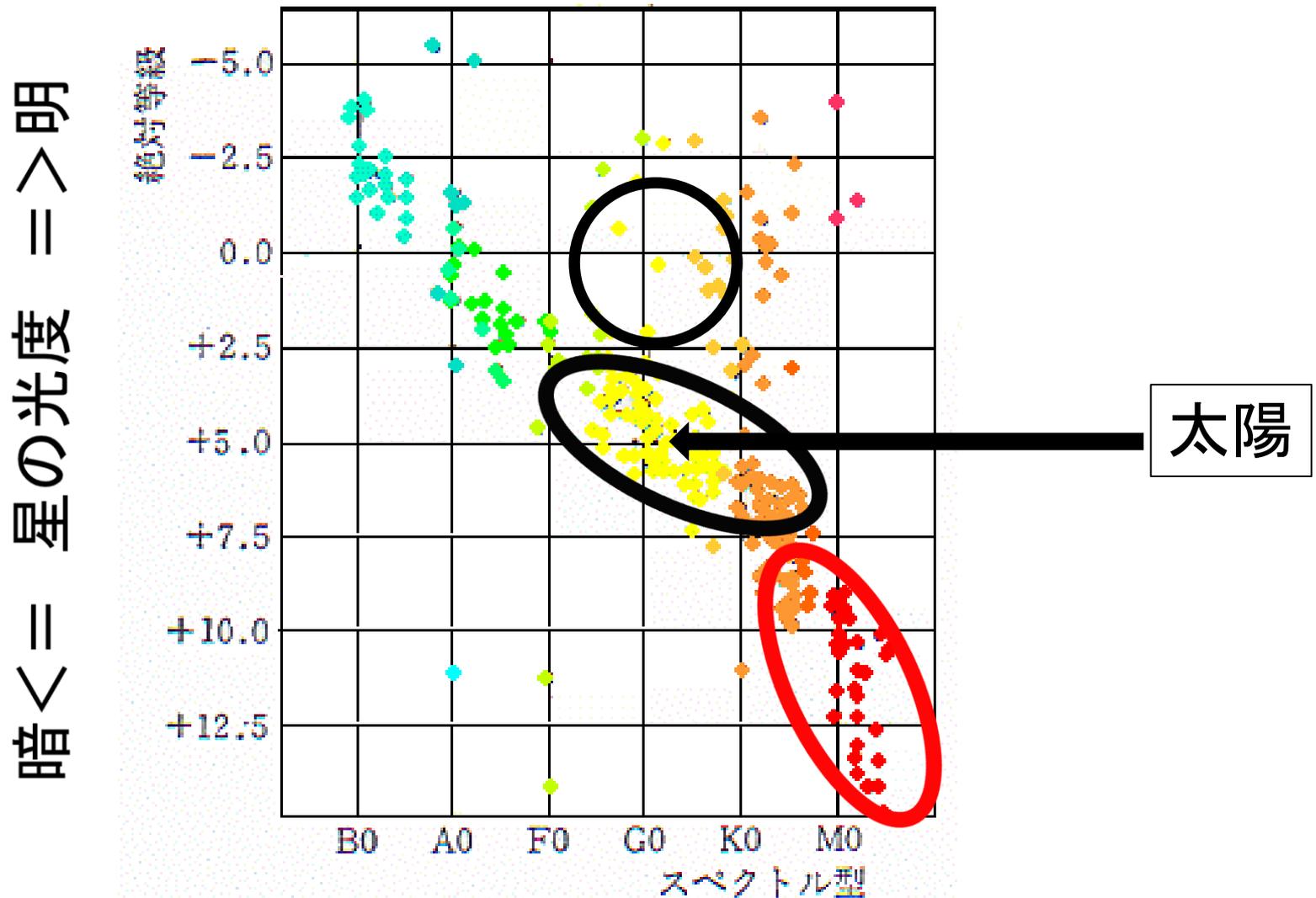
惑星の半径(単位:木星半径)

# どんな恒星に惑星が見つかっているか？



太陽質量を単位とした恒星の質量

# 恒星のいろいろと惑星探査されている恒星

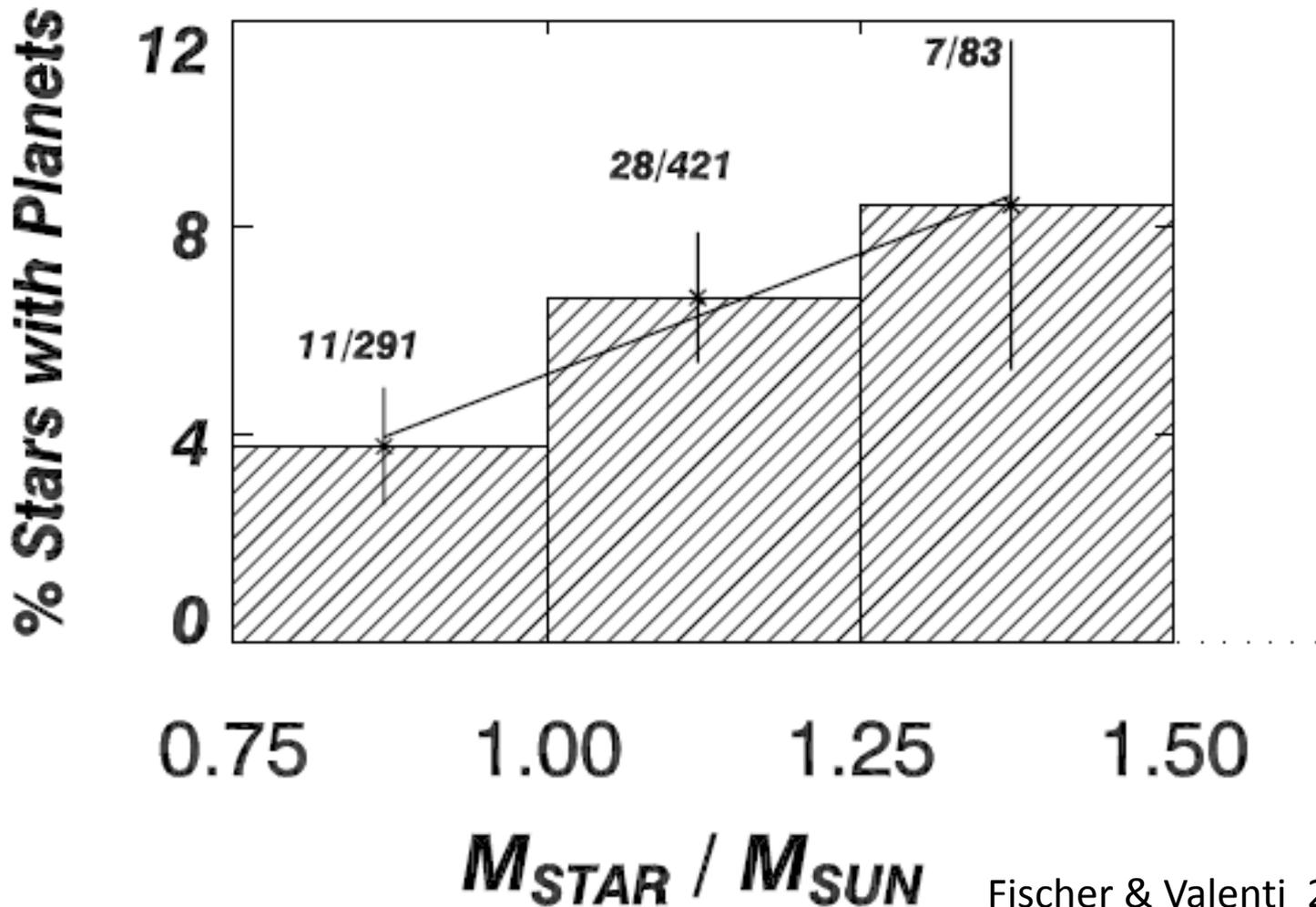


高 <= 温度 => 低

大 <= 星の質量 => 小

# fp 惑星を持つ星の割合

5%位だが、軽い惑星はまだ見つかっていない  
かもしれないので **まあ、一声 10%**



ne その惑星系で生命の存在が可能となる  
範囲にある惑星の数

## 系外惑星のハビタブルゾーン

恒星からの距離によって、惑星の温度が変わる

近いと、高温になって水が蒸発してしまう

遠いと、低温になって二酸化炭素が凍ってしまう(温室効果なくなる)

この中間帯を、habitable zone と呼ぶ

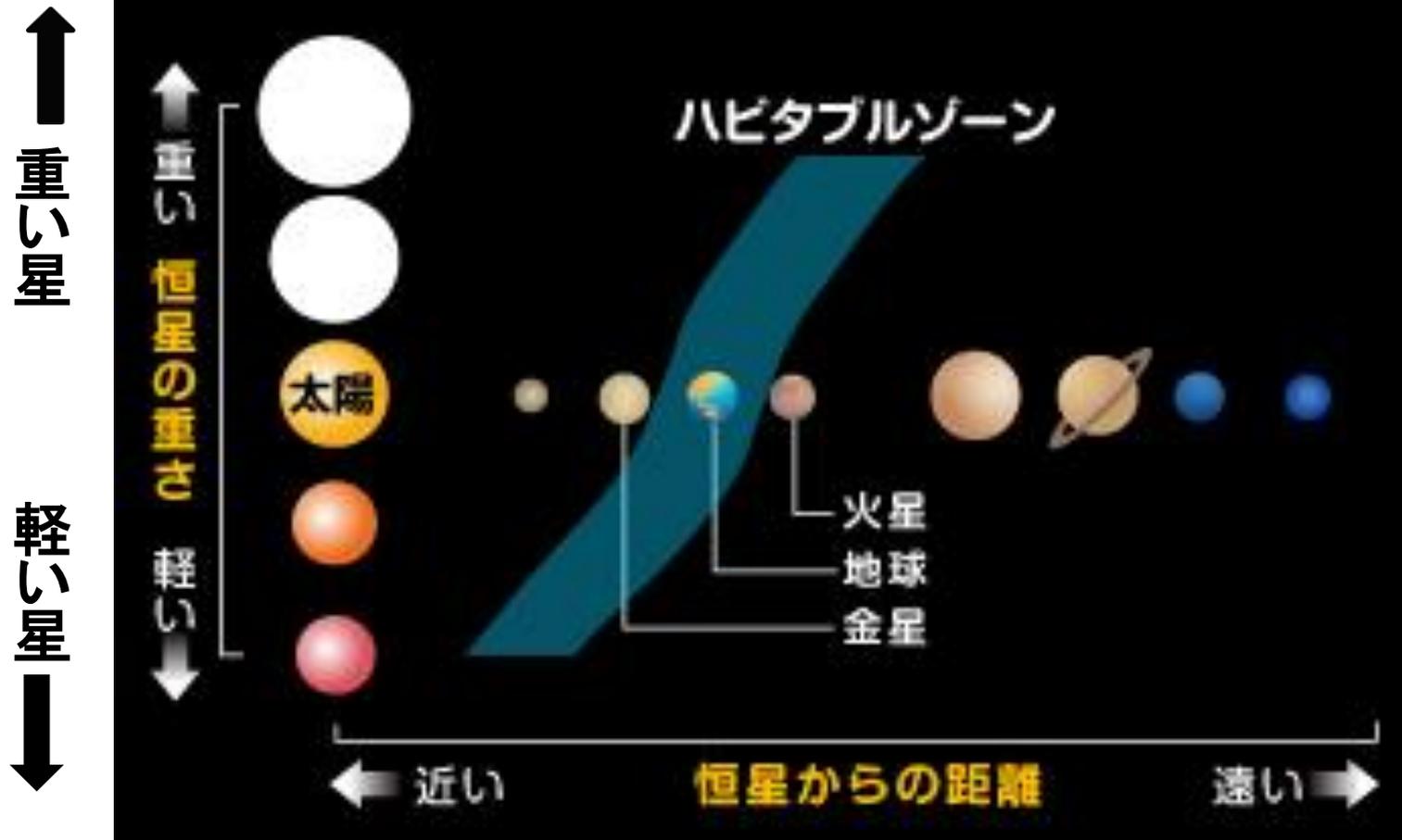
太陽系なら 0.97-1.4 天文単位の間

つまり、地球軌道付近だけ

太陽系の場合の  
ハビタブルゾーン

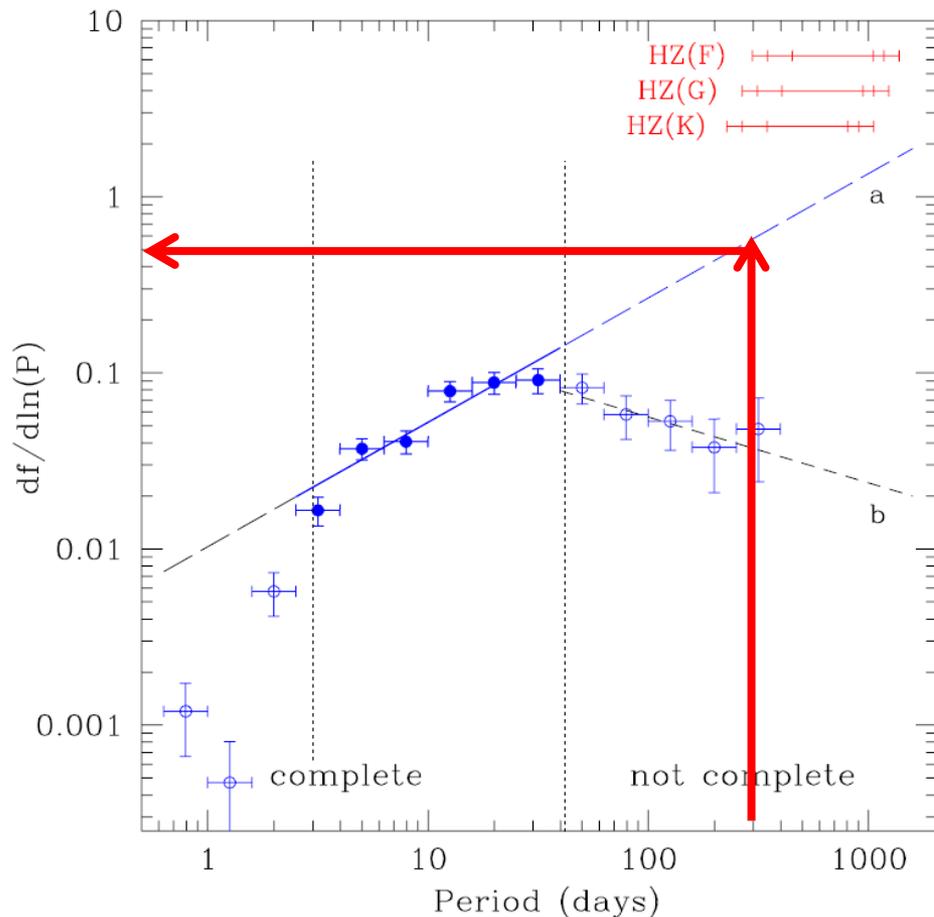


# 恒星によって異なるハビタブルゾーン



軽い恒星での惑星探査はまだこれから

# 最近の研究では・・・



ケプラー衛星によるFGK星における惑星探査の結果より

FGK星では、約3分の1の星で、少なくとも1つの地球型のHZ惑星が予想される

とりあえず  $ne=1$ とする

# その他の考慮すべき点

## \* Rやfpは、星の(初期)質量関数に依存

太陽型星に惑星が多いなら、恒星中の太陽型星の割合を考慮すべき

## \* 銀河ハビタブルゾーン

銀河内でも住みやすそうなところとそうでないところがある

銀河外側だと重元素量が少なく、地球型惑星形成や生命誕生には不利  
銀河中心に近すぎると、星による擾乱・超新星爆発・活動銀河核の悪影響

## \* 衛星に生命が誕生して文明を持つ可能性

木星の衛星イオのような潮汐力加熱のあるような衛星には生命があるかも

## \* 連星系をどう勘定するか

但し、連星系にも惑星あり

いずれにしても、次の要因の不定性の方が大きい！

# 生命要因

**$f_l$** : そのような惑星に生命が誕生する確率

ハビタブルゾーンというのは、  
生命が誕生する可能性の高いゾーンであることが  
定義みたいなものなので、  **$f_l=1$**  としよう

**$f_i$** : 誕生した生命が知的生命体にまで進化する確率

これは、私には皆目わからない  
**とりえあず  $f_i=0.01$  とする**

# 文明要因

**fc**: 知的生命体が他の星に向かって通信を行う文明を形成する確率

ひとたび、知的生命体が出現すれば、通信はするだろうと、楽観的に考えると

**fc = 1** ではないだろうか

**L**: そのような文明が存続する年数

これも皆目わからない。しかも人類は未経験。長く続くかもしれないが、意外と滅ぶのは早いかも。まあ約1万年の実績はあると考え、とりあえず

**L=10,000年** とする

# 結局、我々の銀河系に 宇宙文明はいくつあるか？

$R=10$ ,  $fp=0.1$ ,  $ne=1$ ,  $fl=1$ ,  $fi=0.01$ ,  $fc=1$ ,  $L=10,000$

=>

**$N=100$**

個人的には多少楽観的かと思いますが、  
多いと思う人と少ないと思う人がいそう・・・

# 「この」宇宙に拡張

- 見えている範囲の宇宙 ということでは

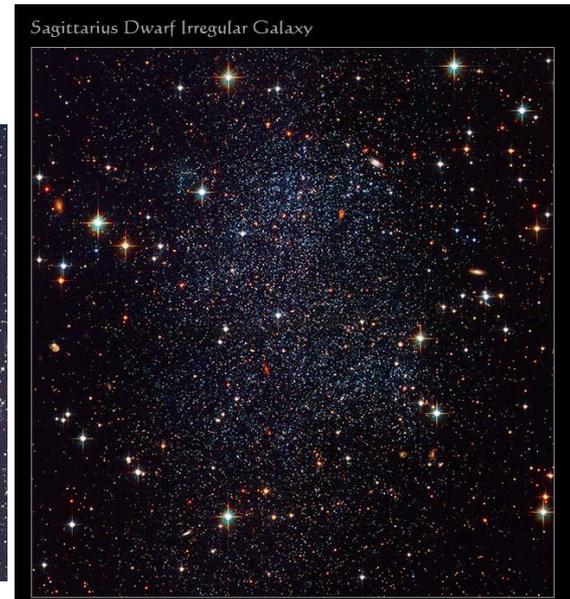
最近見えている最遠方銀河は約130億光年

実際の距離は、約300億光年(約1万Mpc)

を考えてみる

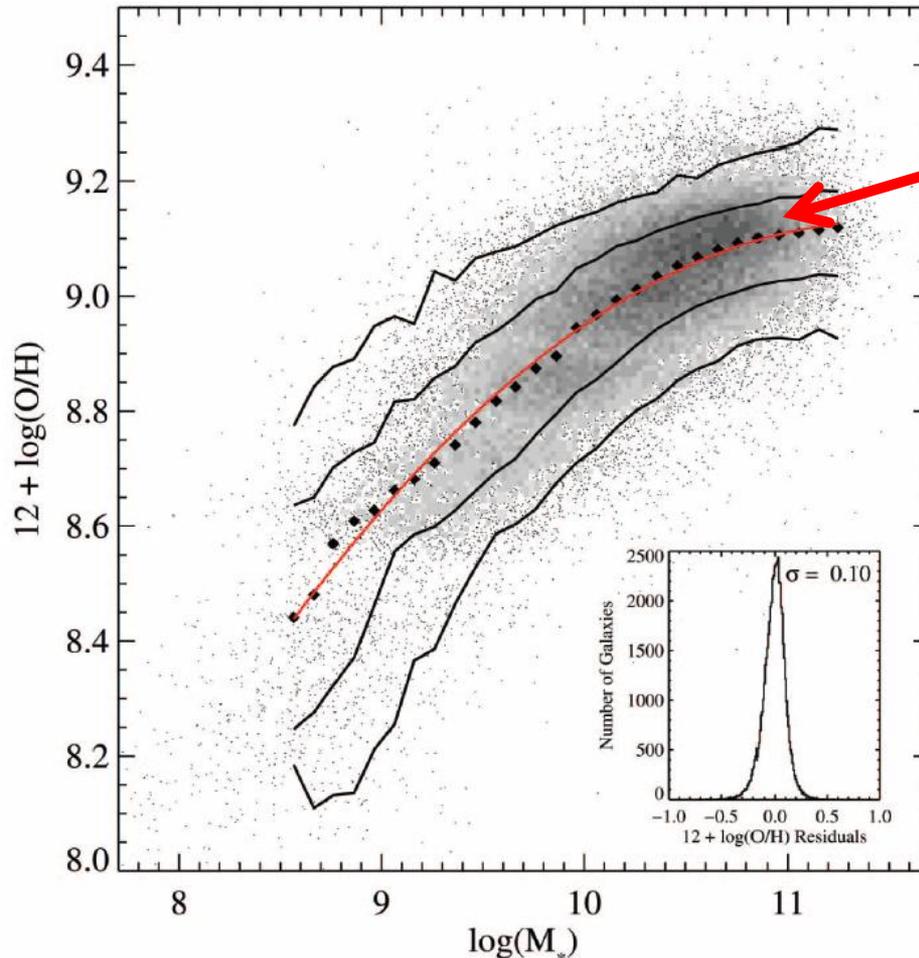
(宇宙背景放射までと考えると5割増。体積で約3倍)

# 銀河のいろいろ



# どんな銀河に惑星や生命が？

銀河内の重元素量



我々の銀河

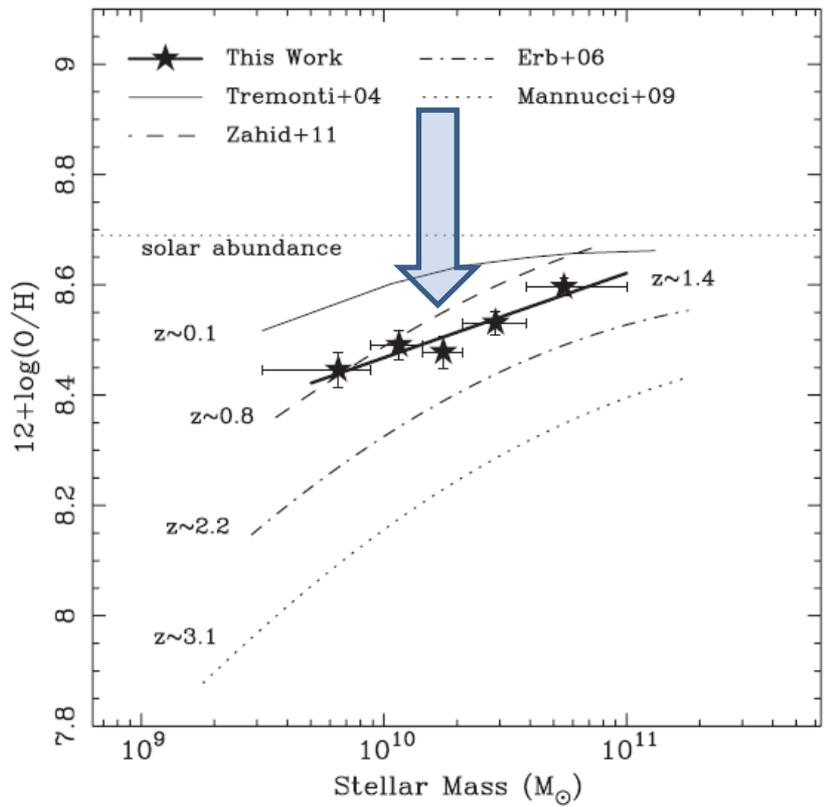
- 軽い銀河には  
重元素少ない  
=> 惑星や生命が  
あまり期待できない？
- 星形成の盛んな銀河も  
アブナイかも??

軽 <= 銀河の重さ => 重

# 昔は重元素が少なかった

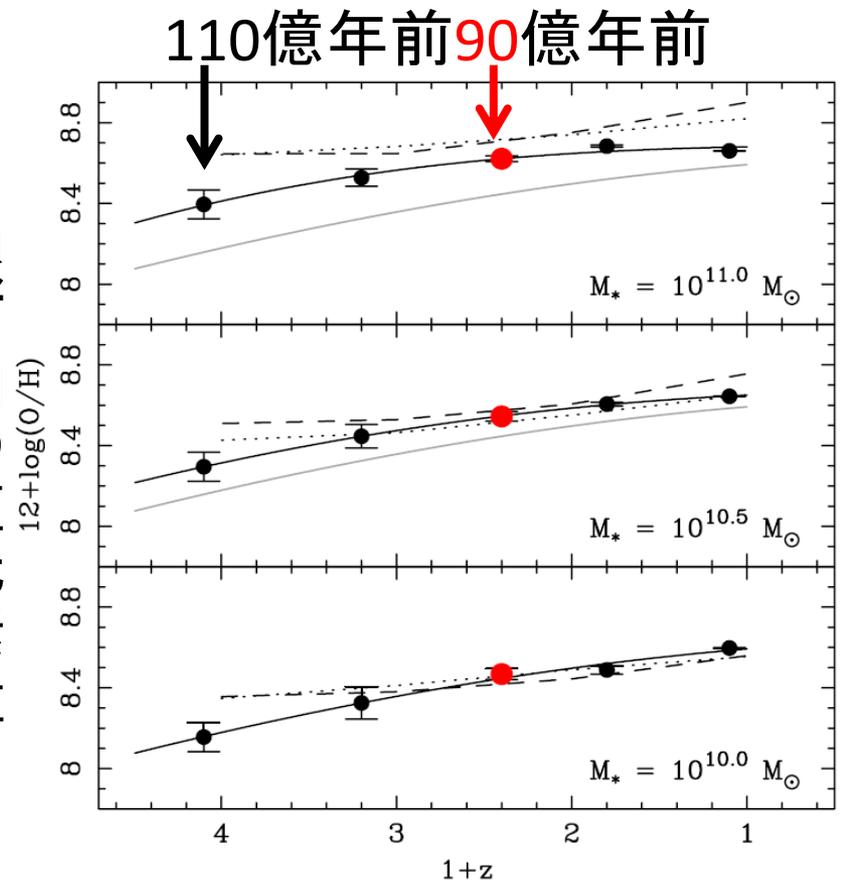
とはいえ、100億年前には、銀河の重元素量は現在の約半分  
=>それなりに重い銀河はその頃から惑星や生命があった？

銀河内の重元素量



軽 <= 銀河の重さ => 重

銀河内の重元素量



昔 <= 今

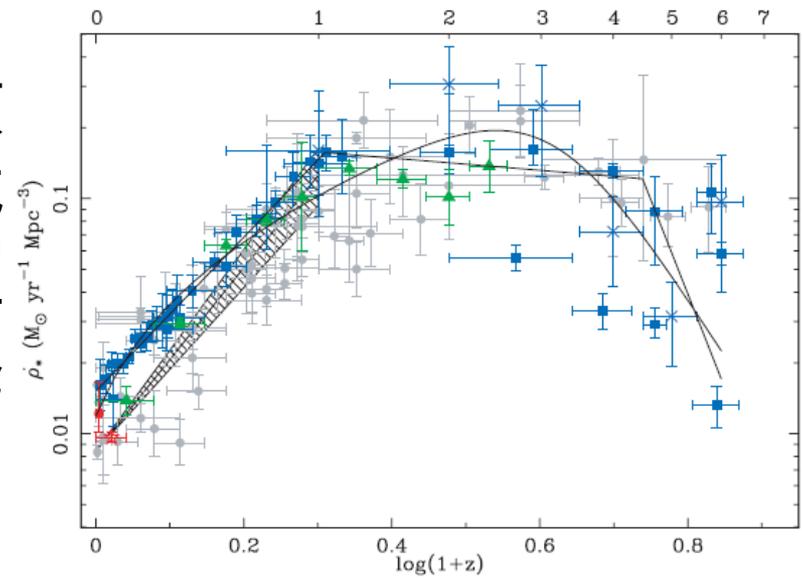
ちょっと脇道

# 昔は紫外線やX線が強かった

100億年前には、銀河内での星形成やクエーサー活動が激しくアブナイ時代だった。宇宙全体で平均すると10倍位強い。  
=>が、効くかどうかは??

星形成の活発さ

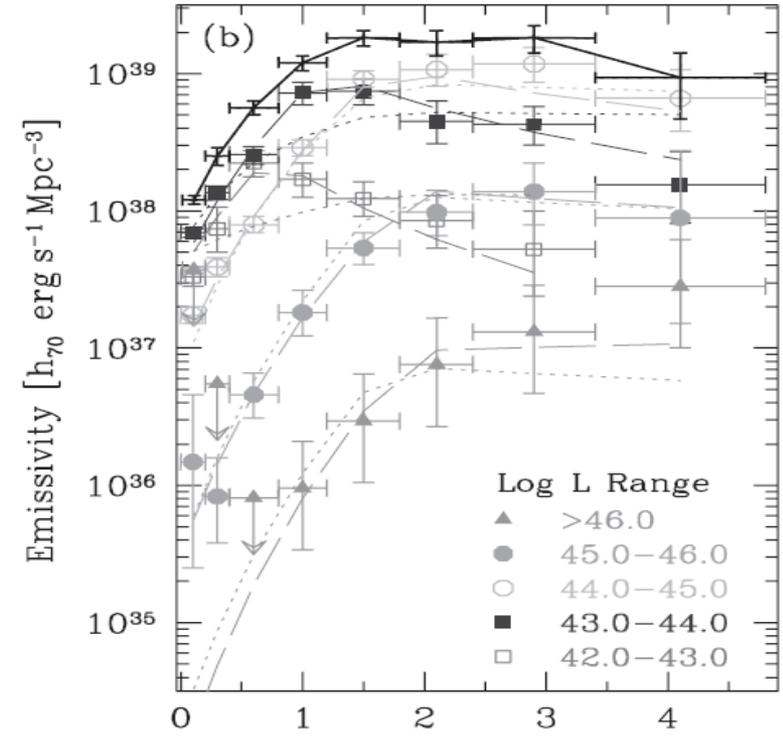
100億年前



今 => 昔

クエーサーのX線光度密度

100億年前



今 => 昔

# この宇宙に、宇宙文明は いくつあるのだろうか？

- ある程度以上重い銀河が、「130億光年」までにいくつあるか？
- 現在の体積  
 $4.2 \times 10^{12} \text{ Mpc}^3$
- $M_s > 0.1 M_s^*$  (金属量1/2)  
 $\Rightarrow \sim 3 \times 10^{10}$  個
- $M_s > 0.01 M_s^*$  (金属量1/4)  
 $\Rightarrow \sim 7 \times 10^{10}$  個
- 一声  $10^{11}$  個 (1千億個)
- 重い銀河1つで  
 $N=100$   
軽い銀河は質量に応じてNが小さいとして、この宇宙には
- $N \sim 10^{12}$   
1兆文明 ! ?

# SETI:

## Search for Extra-Terrestrial Intelligence

### 地球外知的生命探査

- 他の惑星に住む知的生命体からの電波(や光)を検出できないか？
- 今のところ成功例はないが、
- SKA (square kilometer array)に期待

低周波電波の巨大電波望遠鏡計画(下図は想像図)



# SKAによるSETI

- Penny 2003 SETI with SKA (SKA workshop)
- 地球のテレビ電波程度なら 10光年まで受信可能
- 10光年までにある星 7個 (理科年表)
- 13光年までにある星 24個 (同上)
- Gliese 581は20光年
- 惑星数は右図

5pc内近い順に

$\alpha$ Cen B b

$\epsilon$  Eri b

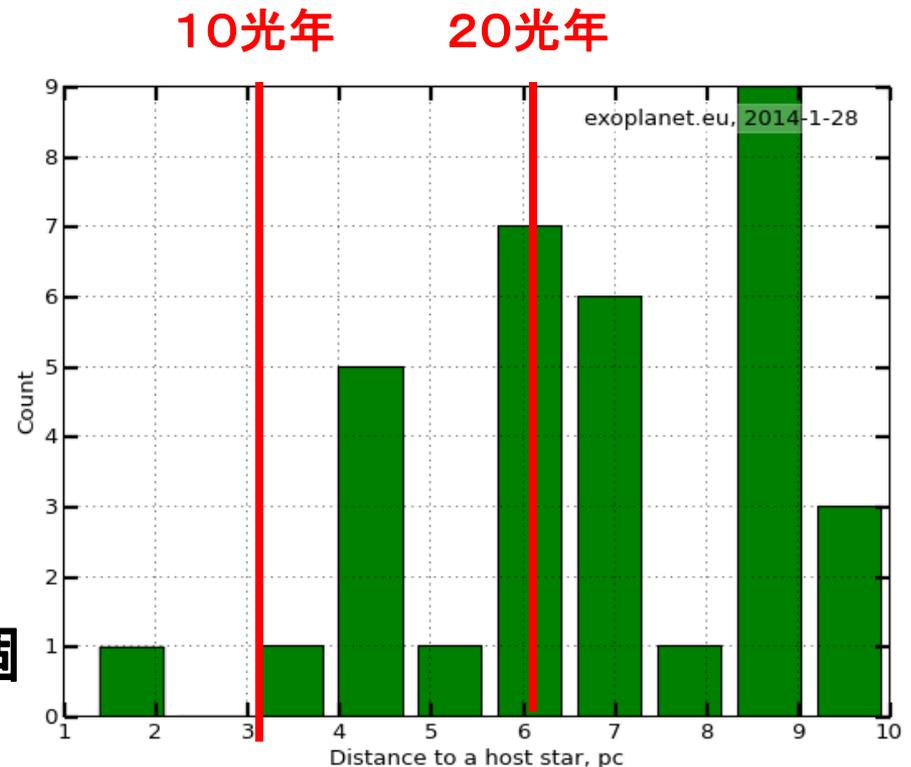
GJ 674b

Gliese 876 b, c, d, e

GJ 832 b

$\alpha$ CenBb: 地球型ぽいが、  
表面温度が高い？

1個



# 道は遠い？

- 地球のテレビ電波程度なら 10光年までなら受信可能
- $N=100$  が、銀河円盤(半径5万光年として)内に一様に分布しているとすると、お互いの間隔は約1万光年
- 銀河ハビタブルゾーンがあればもっと近い(2000光年とか？)
- 漏れ出る電波ではなく、意図的に出す電波は検出可能かもと期待される(ビームを絞って、バンド幅を狭くすれば)

# 人類の文明はいつまで続くのだろうか？

Drake 方程式を逆に使って  $L$  を求めればよい

$$N = R f_p n_e f_l f_i f_c L$$

$R, f_p, n_e, f_l$  天文学で研究

$n_e, f_l, f_i$  生物学で研究

$f_i, f_c$  生物学？社会学？で研究

$\Rightarrow$

$N$ を観測から求めれば、 $L$ がわかる

しかし、長い文明、短い文明あるかも？

宇宙文明・人類文明の研究ともいえるかも