

宇宙線の起源と加速機構の解明

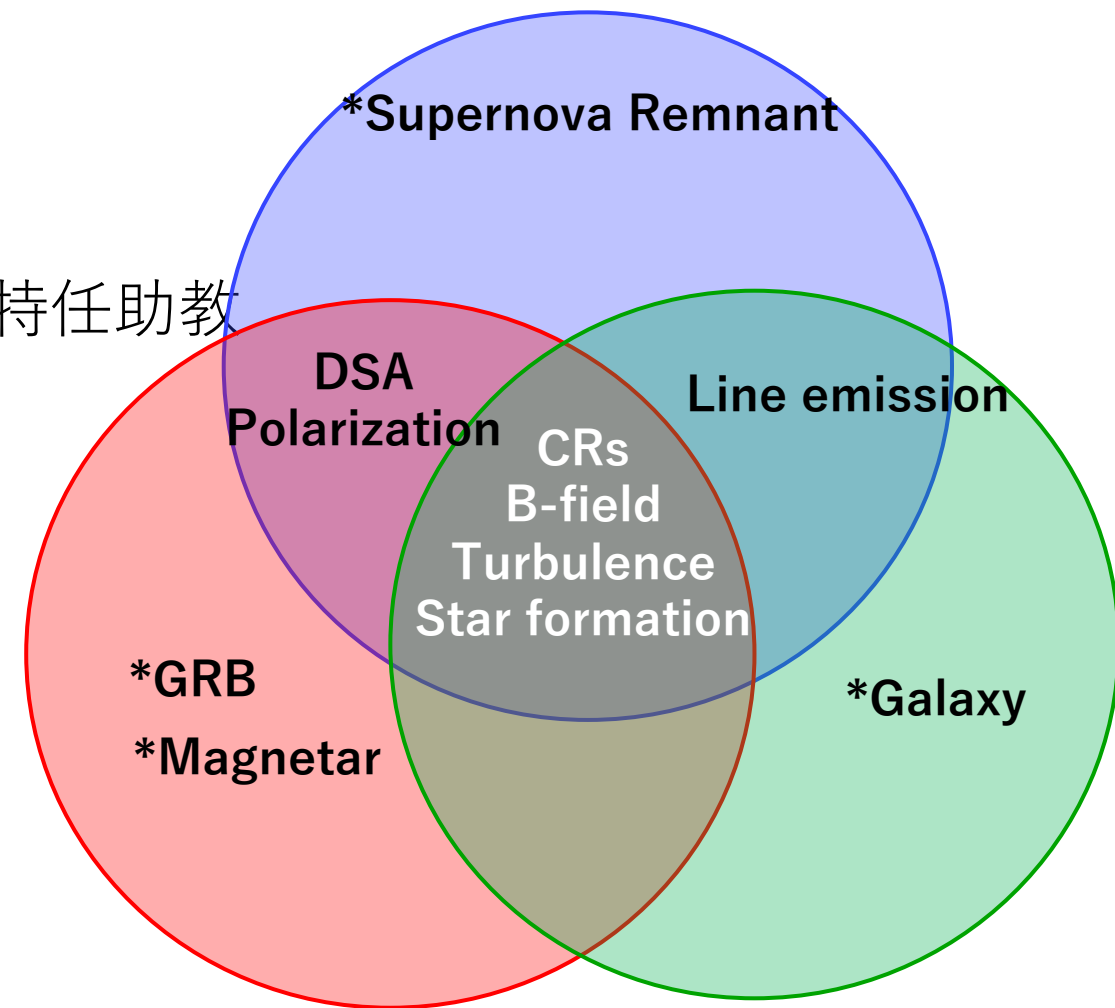
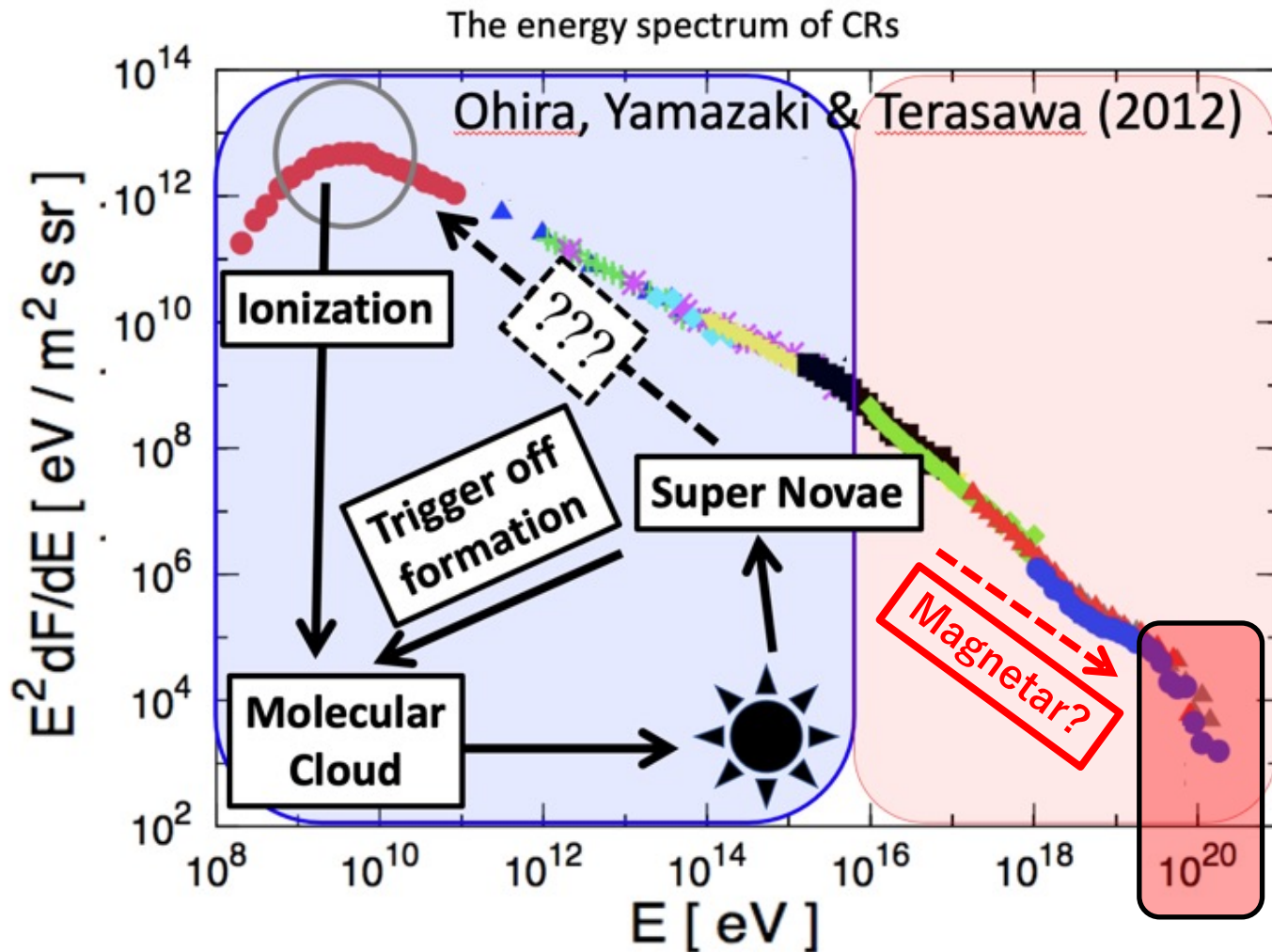
霜田治朗

CRCオンラインセミナー (2025/07/3)

よろしくお願いします

名前：霜田治朗

所属：宇宙線研究所高エネルギー天体グループ特任助教

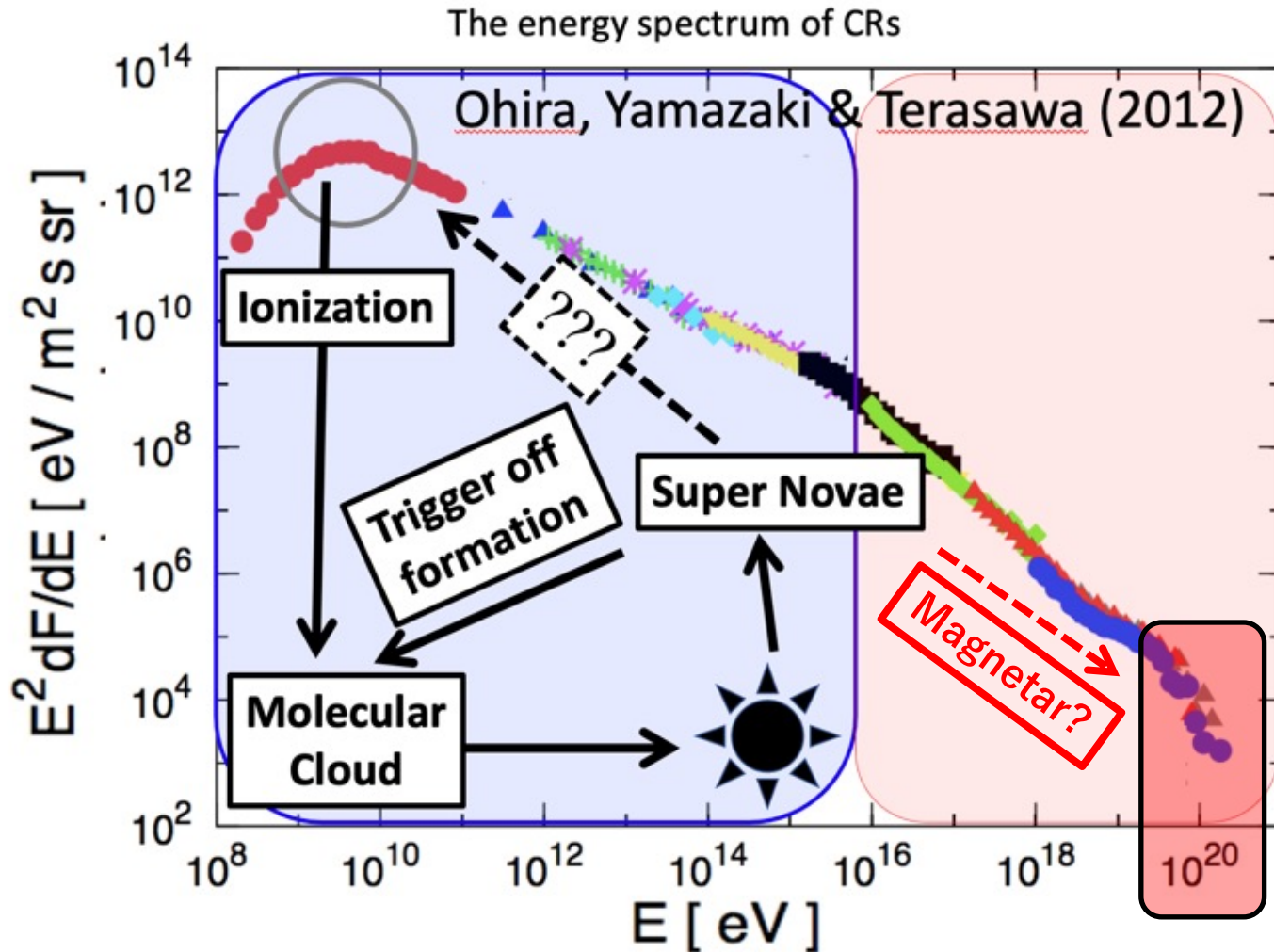


宇宙線の起源と，宇宙における役割
をキーワードにして研究しています．

よろしくお願いします

名前：霜田治朗

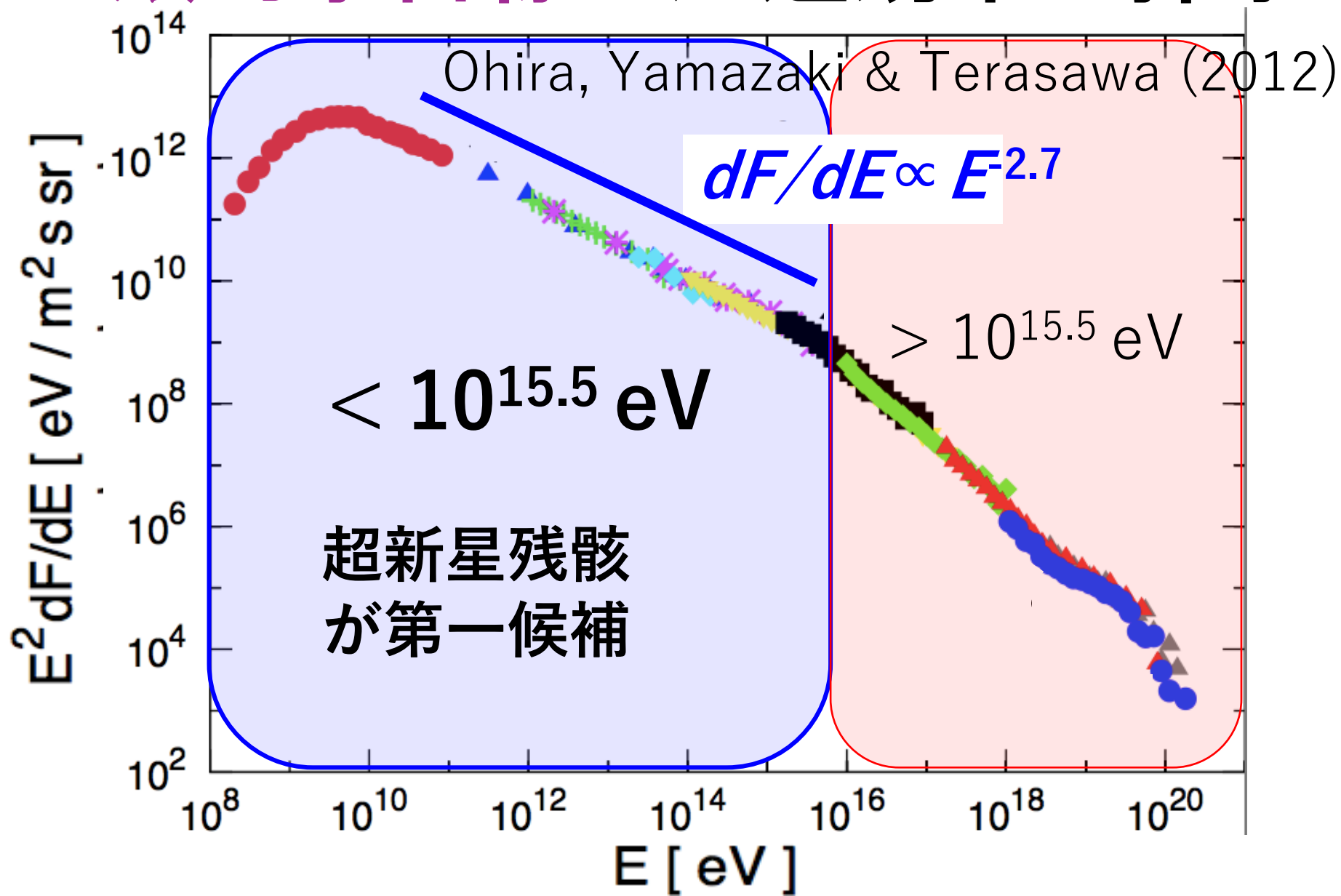
所属：宇宙線研究所高エネルギー天体グループ特任助教



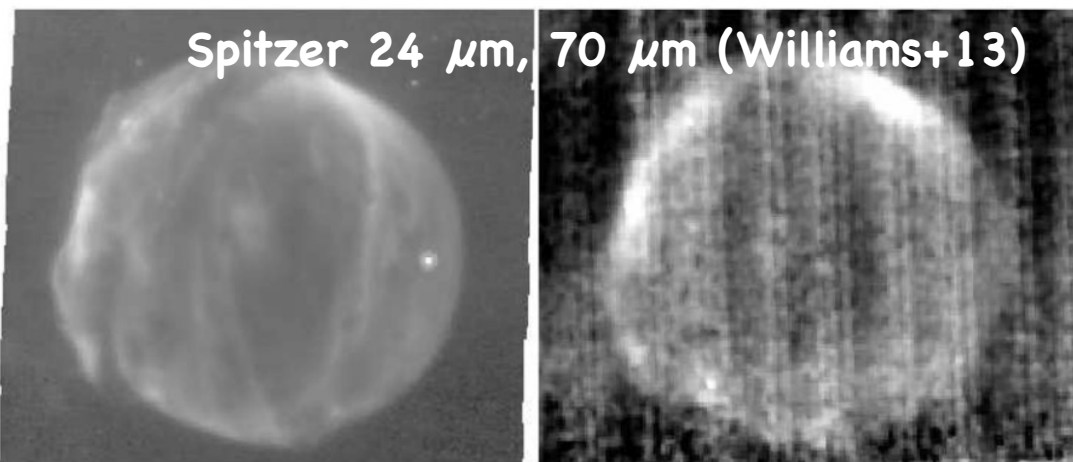
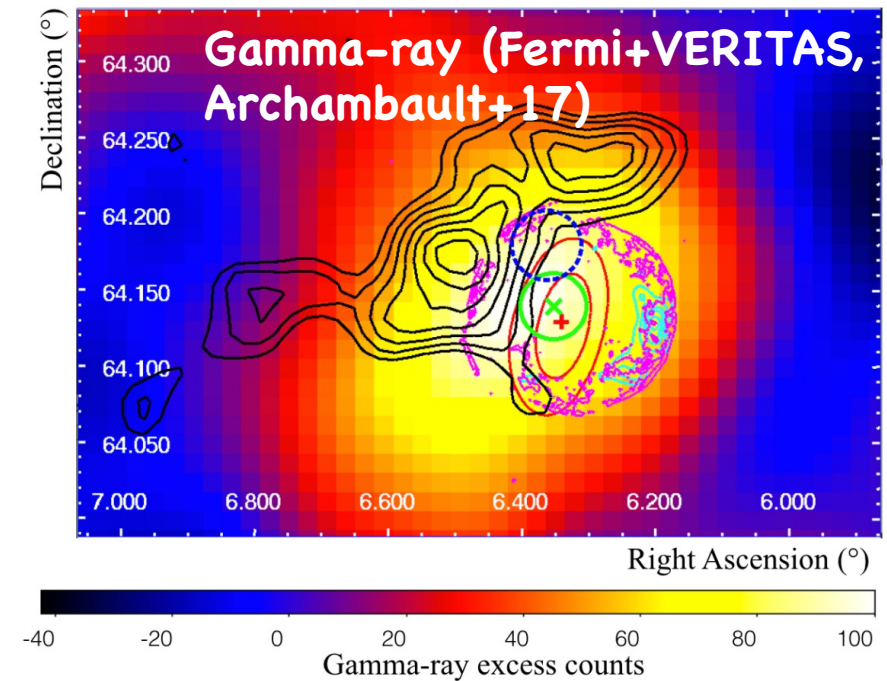
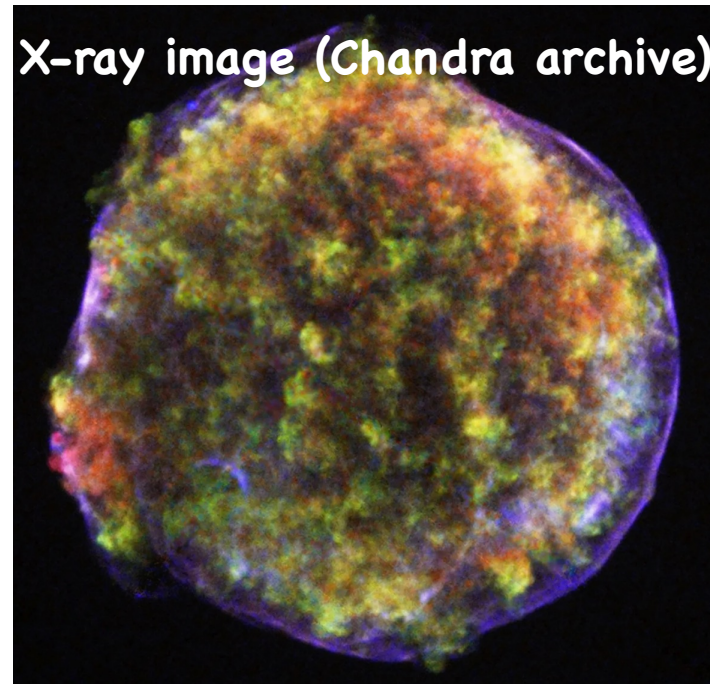
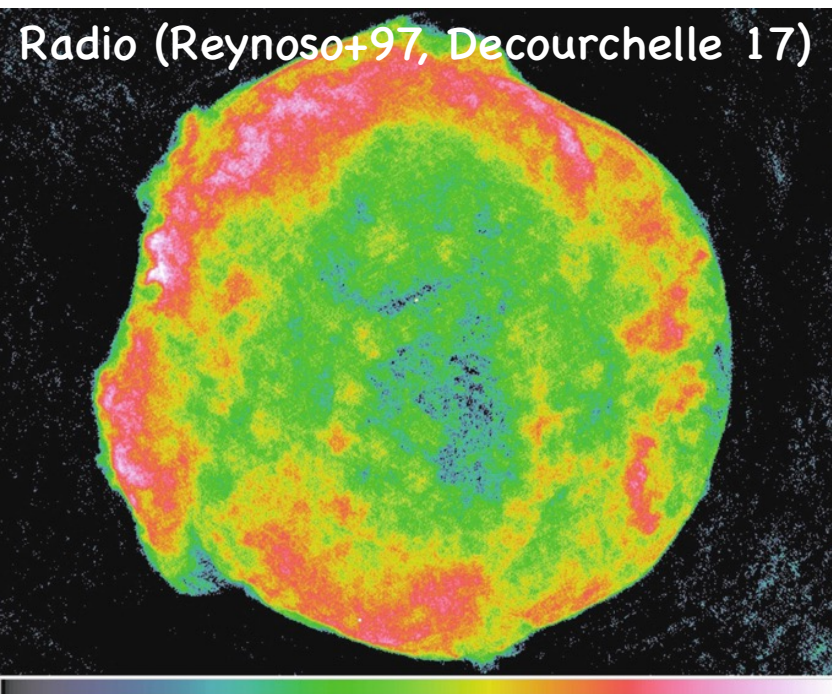
- 1) 銀河宇宙線の起源解明のための研究
- 2) 宇宙線と星形成史の関係について
- 3) >100 EeV宇宙線の加速機構について

宇宙線の起源と，宇宙における役割
をキーワードにして研究しています。

銀河宇宙線の加速効率の探求



Supernova Remnants: e.g., Tycho's SNR (SN 1572, Ia)



Supernova Remnant (SNR)

• Supernovaの*残骸*

天文学的に、SNとSNRを区別する厳密な定義は無いとされる。発見者の気持ち次第。

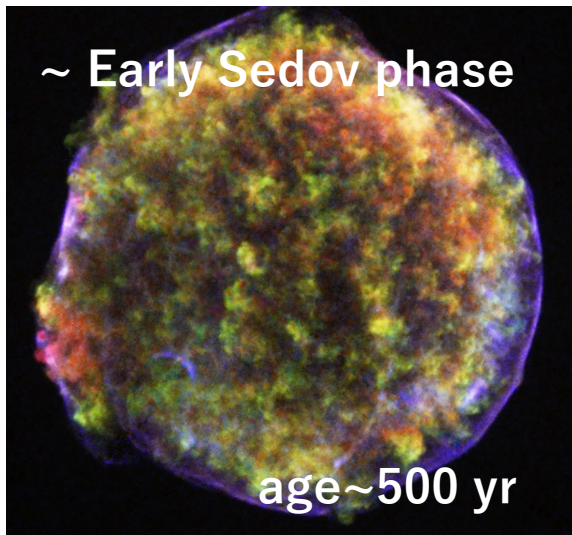
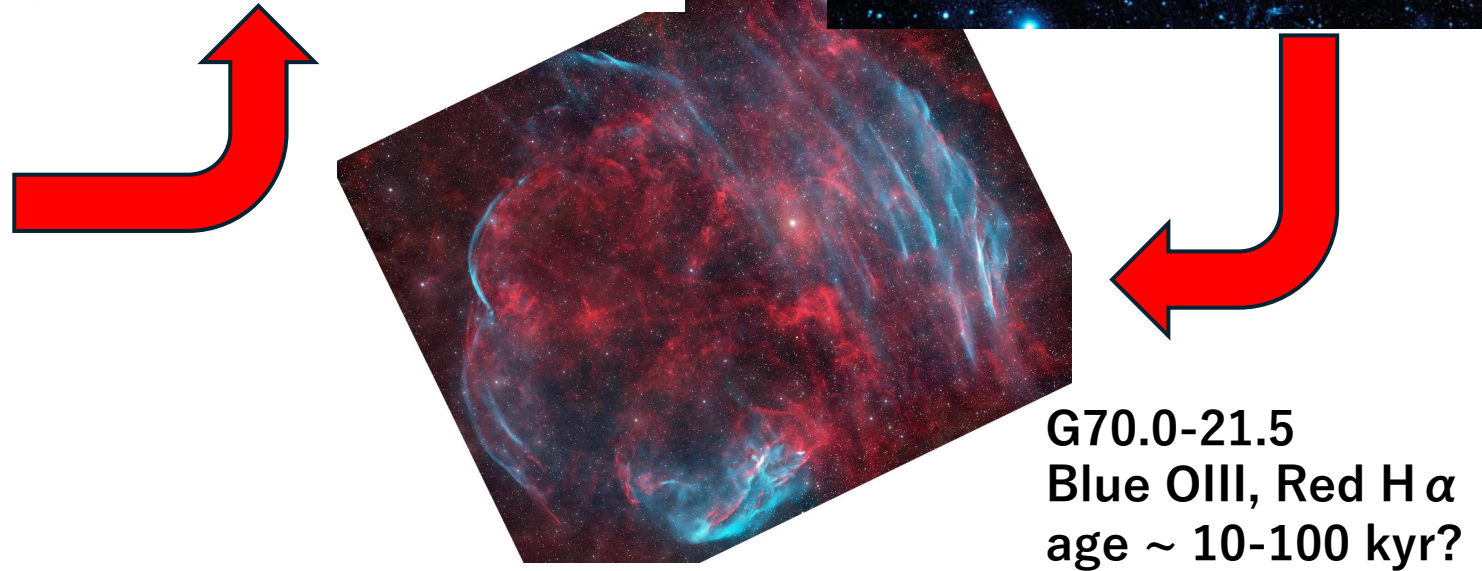
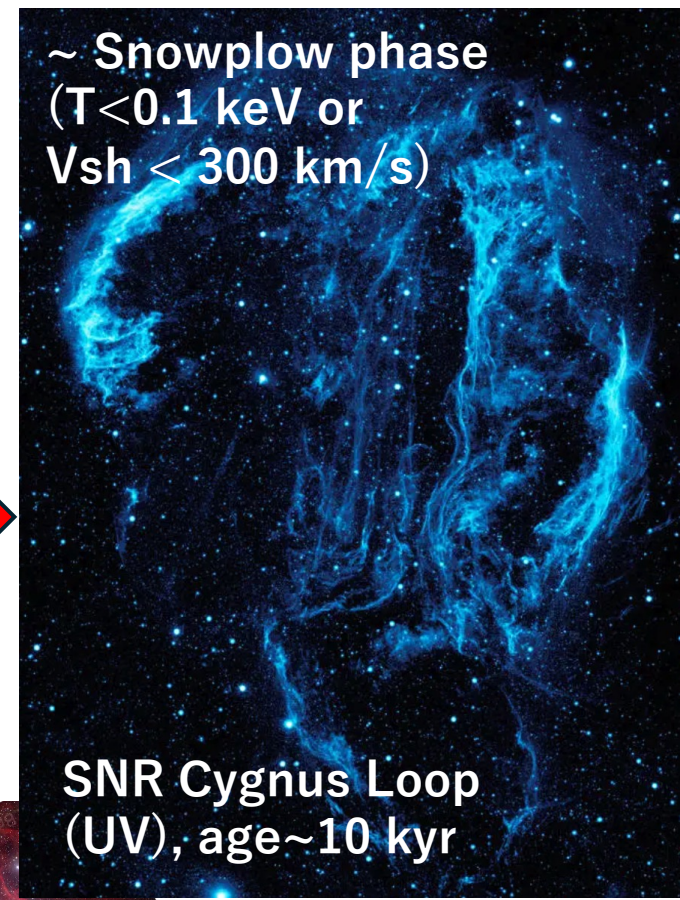
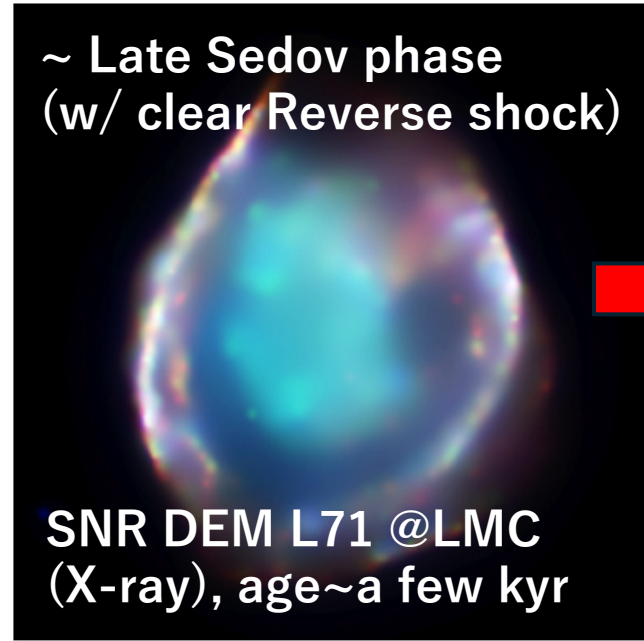
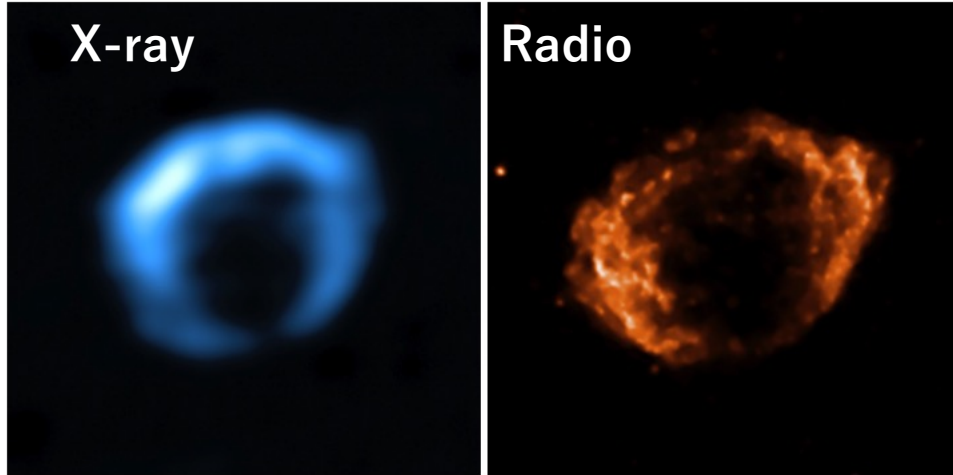
• 粒子加速の現場

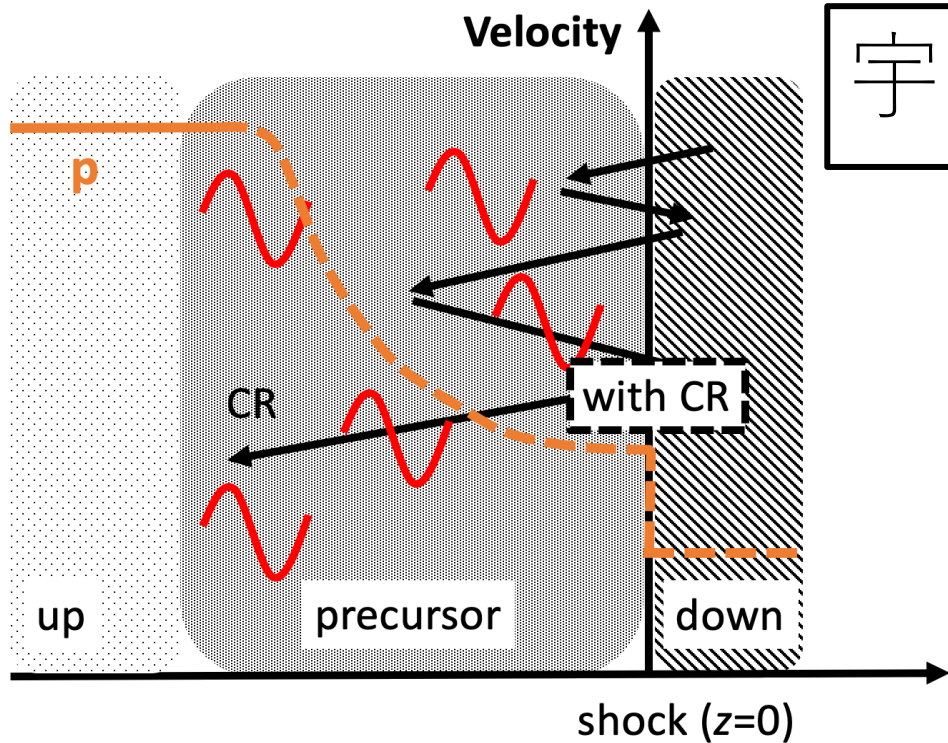
• ダスト=惑星・生命の材料の生成場所？

• ISMの相転移（分子雲形成）を促す、重要なエネルギー源 (McKee&Ostriker 77, Inutsuka+15)

Supernova Remnants: Temporal Evolution

G1.9+0.3: Youngest SNR in our Galaxy
(age~140 yr, Bamba & Williams 22)
Free Expansion Phase





upstream → subscript "0"

downstream → subscript "2"

宇宙線圧力で衝撃波構造が変調？
→ Cosmic Ray Modified Shock

宇宙線の加速効率問題（注入問題）

Diffusive Shock Acceleration (DSA)

→ 衝撃波を往復して粒子が加速していく

良いところ

① ~PeV宇宙線を作りうるくらい，加速に時間がかからない．

② 被加速粒子のエネルギースペクトルが，ベキ型になる．

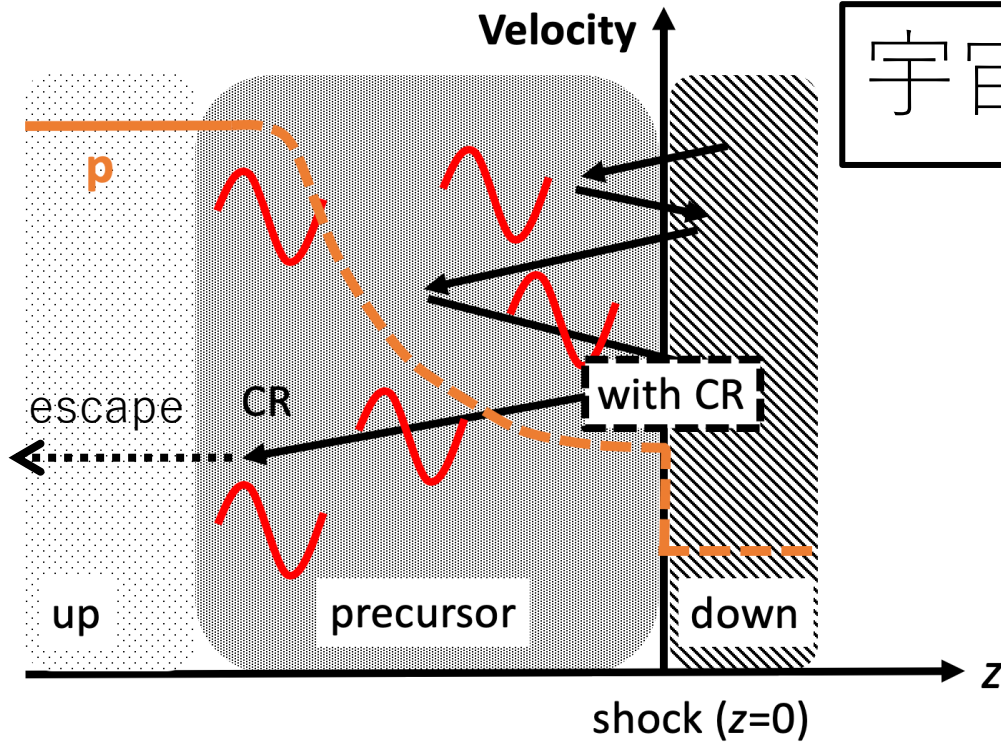
ダメなところ

被加速粒子の量は予言しない．

→ 独立な検証が必要だが，特に理論的な理解はほとんど進んでいない．

(cf. Shimoda et al. 2022)

宇宙線の逃走問題（拡散係数問題）



upstream → subscript "0"

downstream → subscript "2"

宇宙線圧力で衝撃波構造が変調？
→ Cosmic Ray Modified Shock

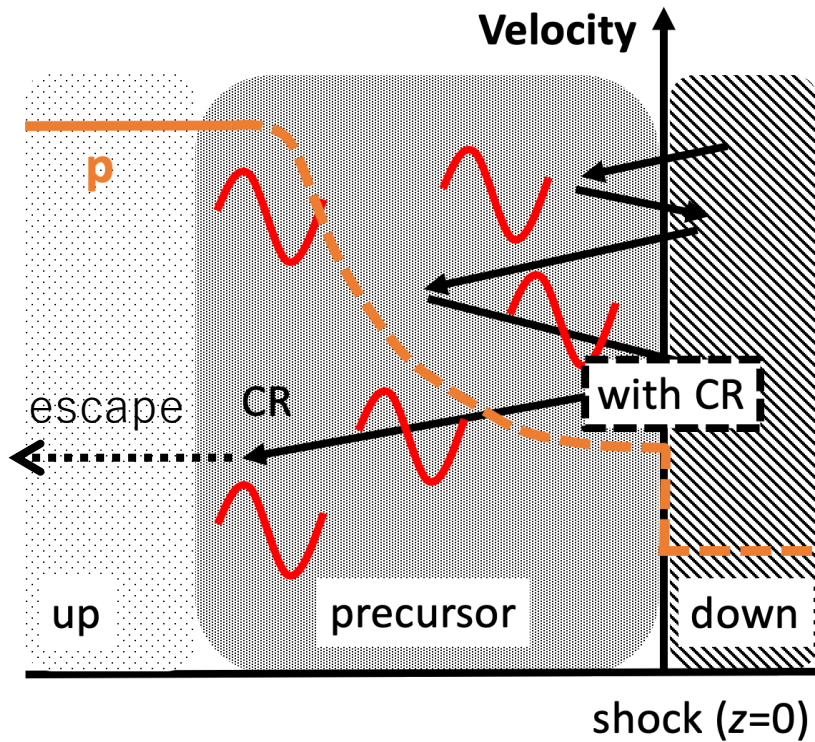
Diffusive Shock Acceleration (DSA)
→ 衝撃波を往復して粒子が加速していく

→ V_{sh} が小さくなると、衝撃波が拡散する宇宙線に追いつけない。

→ 宇宙線が上流に**逃走して加速終了**。

「いつ、どれだけ逃走しているのか？」は
分かっていない。

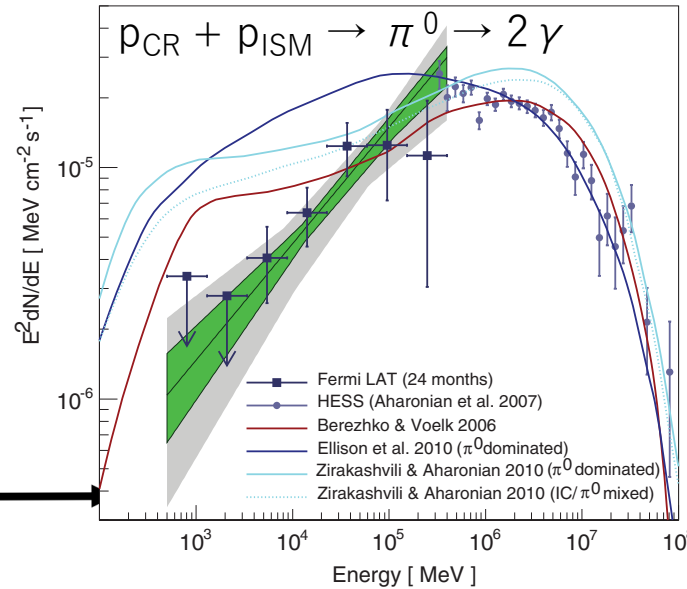
SEDによる宇宙線加速の検証



upstream → subscript "0"

downstream → subscript "2"

宇宙線圧力で衝撃波構造が変調？
→ Cosmic Ray Modified Shock



←RX J1713.7 3946 (Abdo+11)

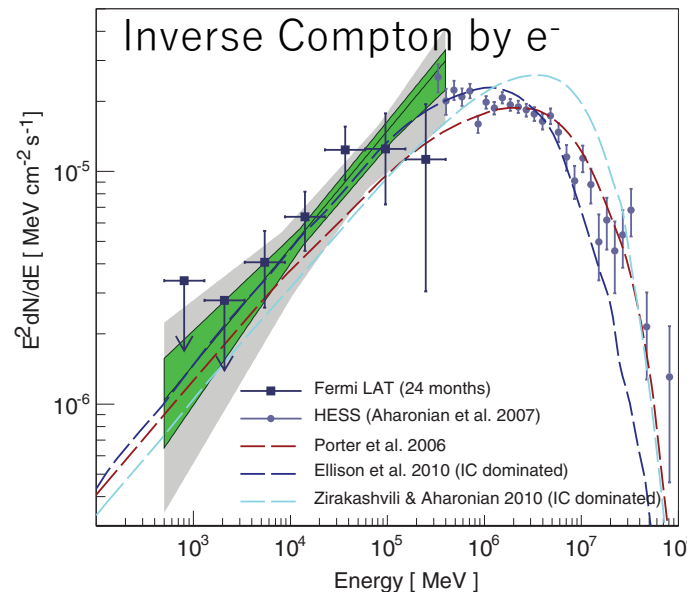
・2010年代に（当時大学院生）GeV-TeV gamma-rayのSEDに関する研究が大いに盛り上がった。

・それまでの『CR protonの加速効率が良く，宇宙線反作用効果の詳細が分かる』という期待を思い切り裏切った。

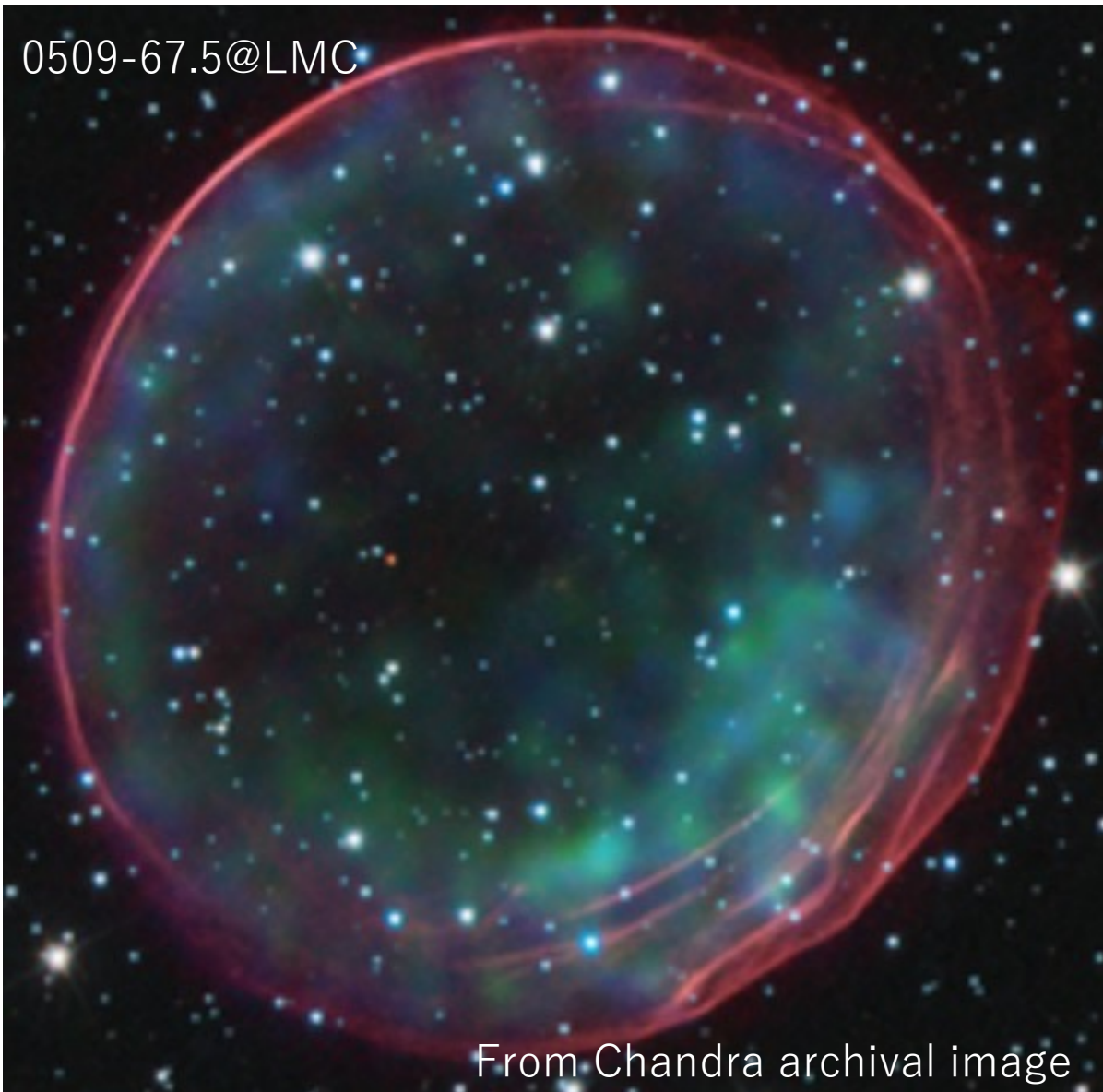
・なんなら，電子しか加速してないと言わんばかりだった。

加速理論・SED解釈の再検討や，ガス密度の不定性など様々な研究が行われたが，結局コンセンサスは得られていない。

→SEDと相補的に，加速効率・反作用効果を検証したかった。



H α from SNR shock



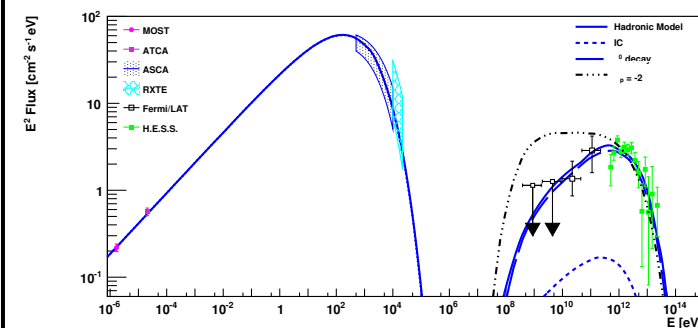
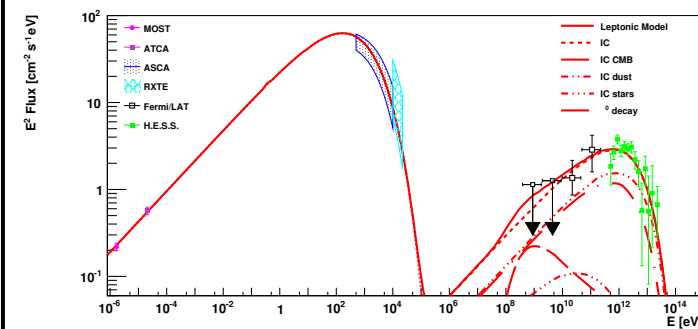
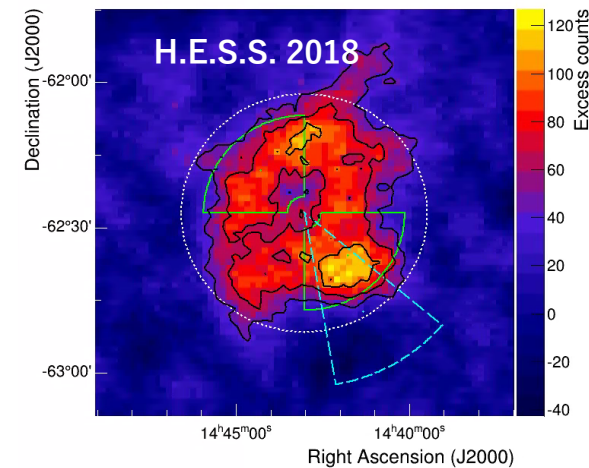
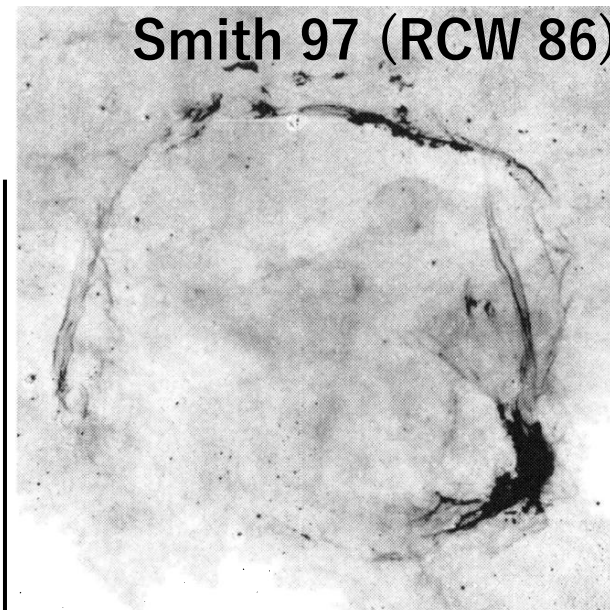
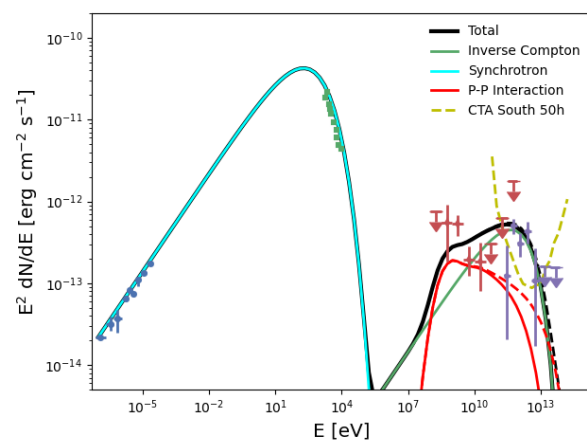
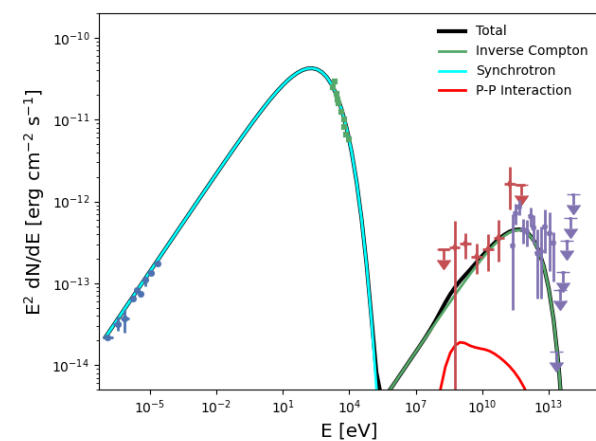
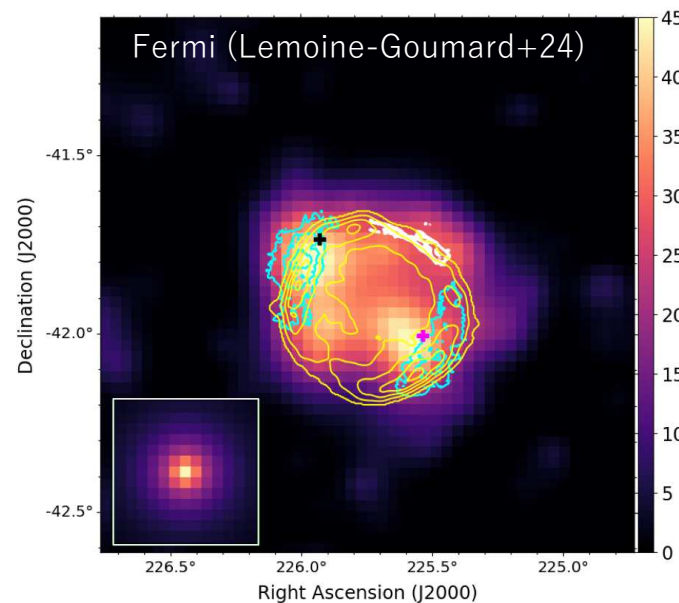
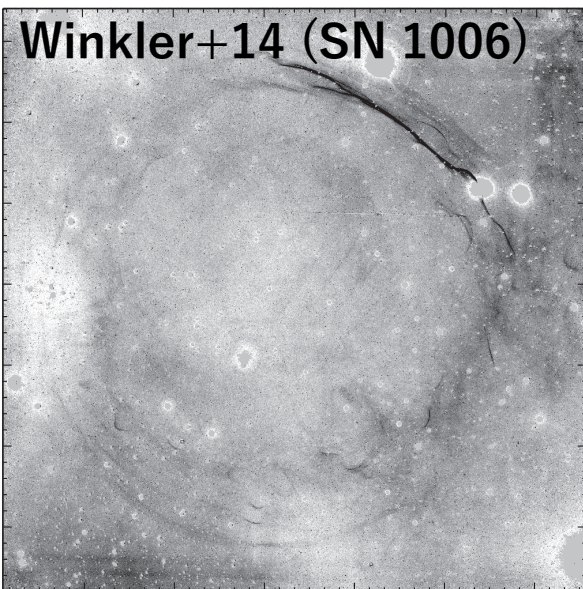
CR加速現場と思われるSNR Shockでは、 $H\alpha$ がshock面をトレースするように光っている。

→加速現場の物理状態をよく反映する
と考えられている。

→衝撃波での宇宙線加速効率の推定に
使える。
(Helder+09; Morlino+13; Shimoda+15,
18; Shimoda & Laming 19他)

*ざっくりとまとめてあります↓
霜田治朗「超新星残骸での宇宙線加速効率の探求」,
天文月報 2025.5, pp286-294,
<https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/2025/entry1028.html>

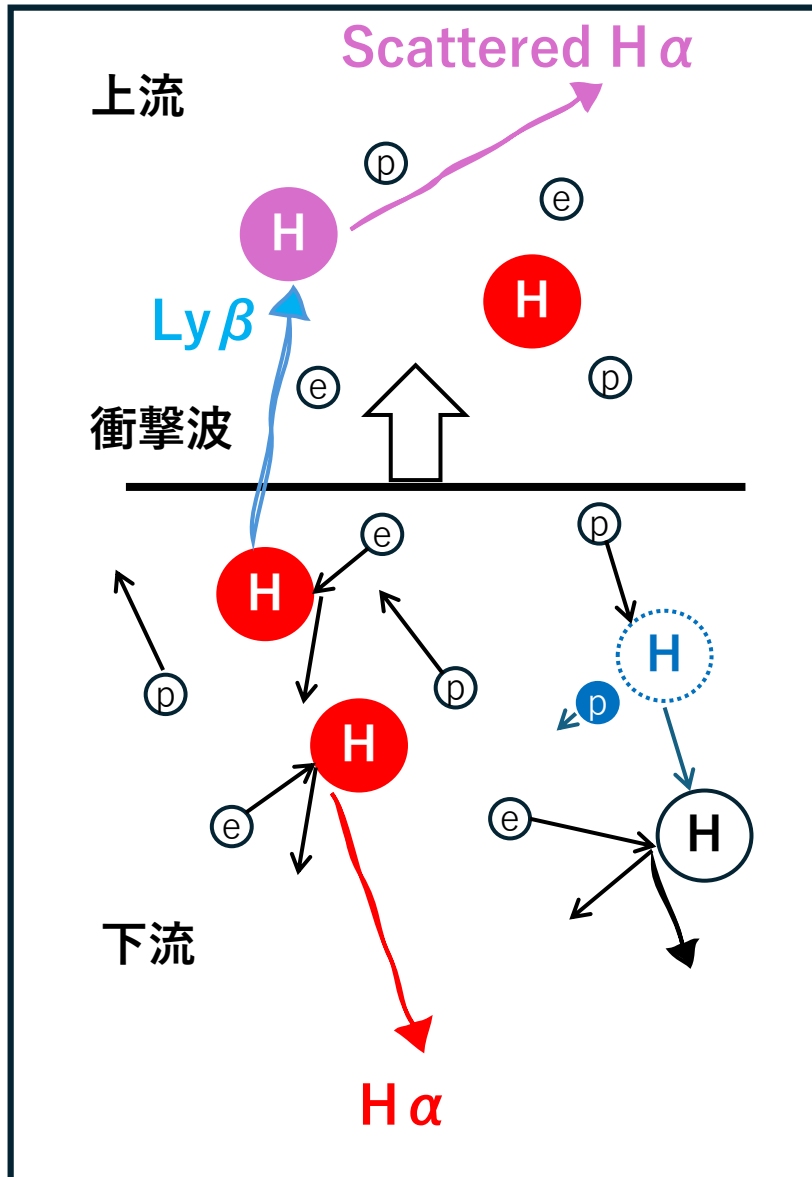
$H\alpha$ from SNR shock



色々なSNRで $H\alpha$ +
ガンマ線は確認され
ている。

CR加速と $H\alpha$ の
関係は？

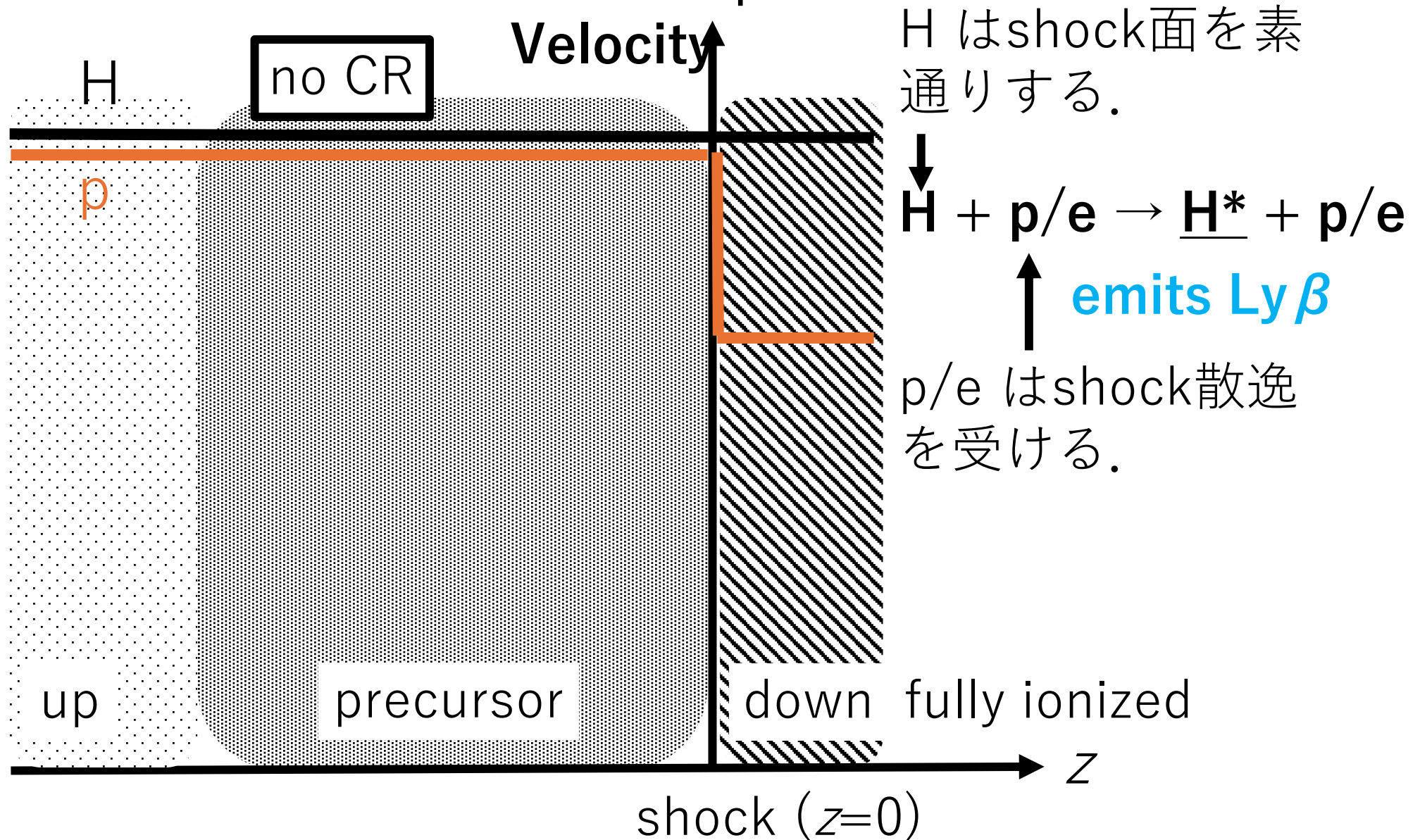
$H\alpha$ from SNR shock



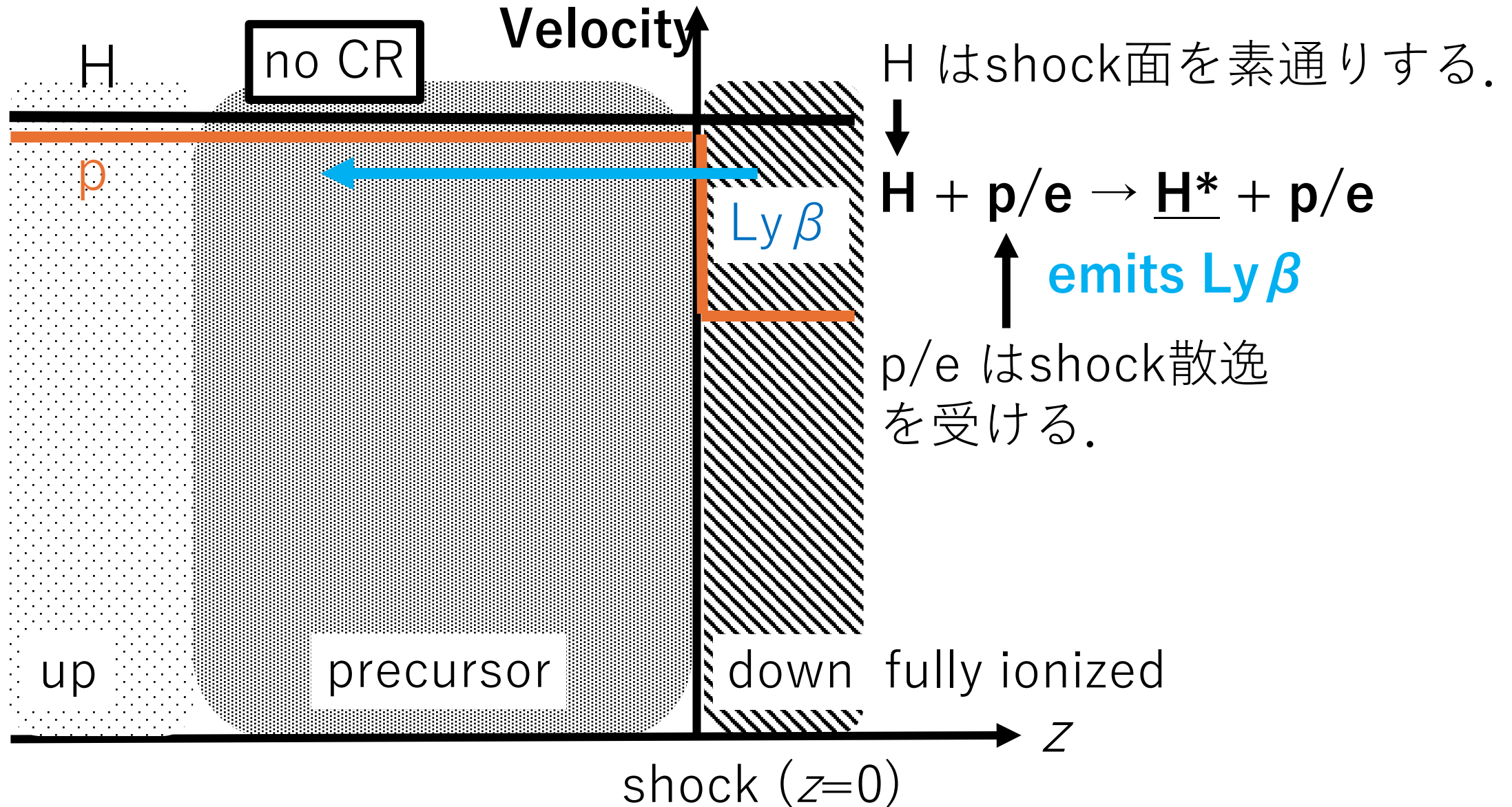
- ① Shockを経験した荷電粒子 (e, p) がH原子を叩く.
- ② 励起H原子から $H\alpha$ やLy β が放射される.
- ③ Ly β は吸収され($1s \rightarrow 3p$), 最終的に $H\alpha$ ($3p \rightarrow 2s$)として放射される. 『散乱』 → 『偏光 $H\alpha$ 』

宇宙線加速の有り・無しで『偏光 $H\alpha$ 』の『偏光角』が90度変わる (Shimoda & Laming 2019) .

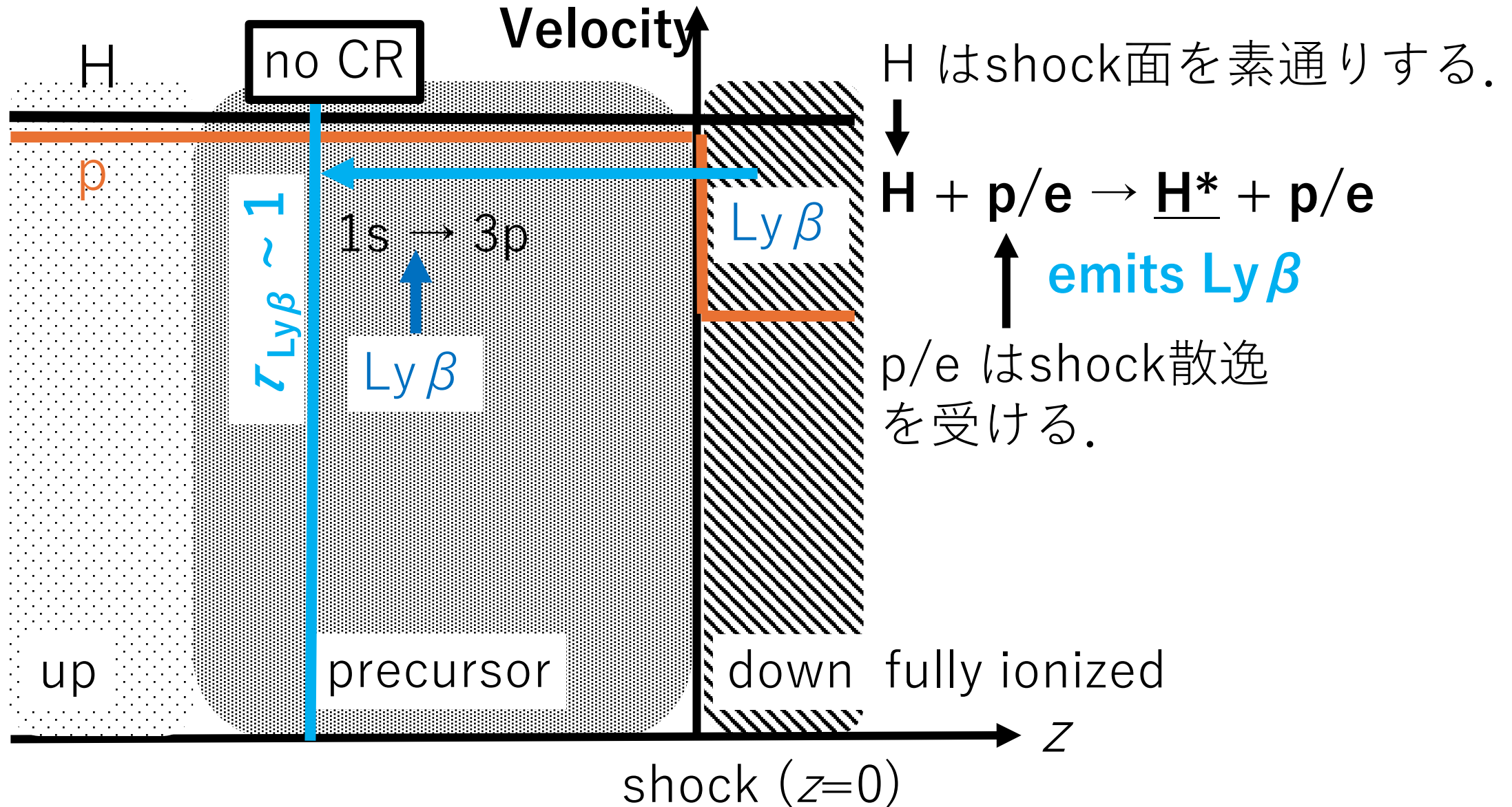
H α emission from upstream



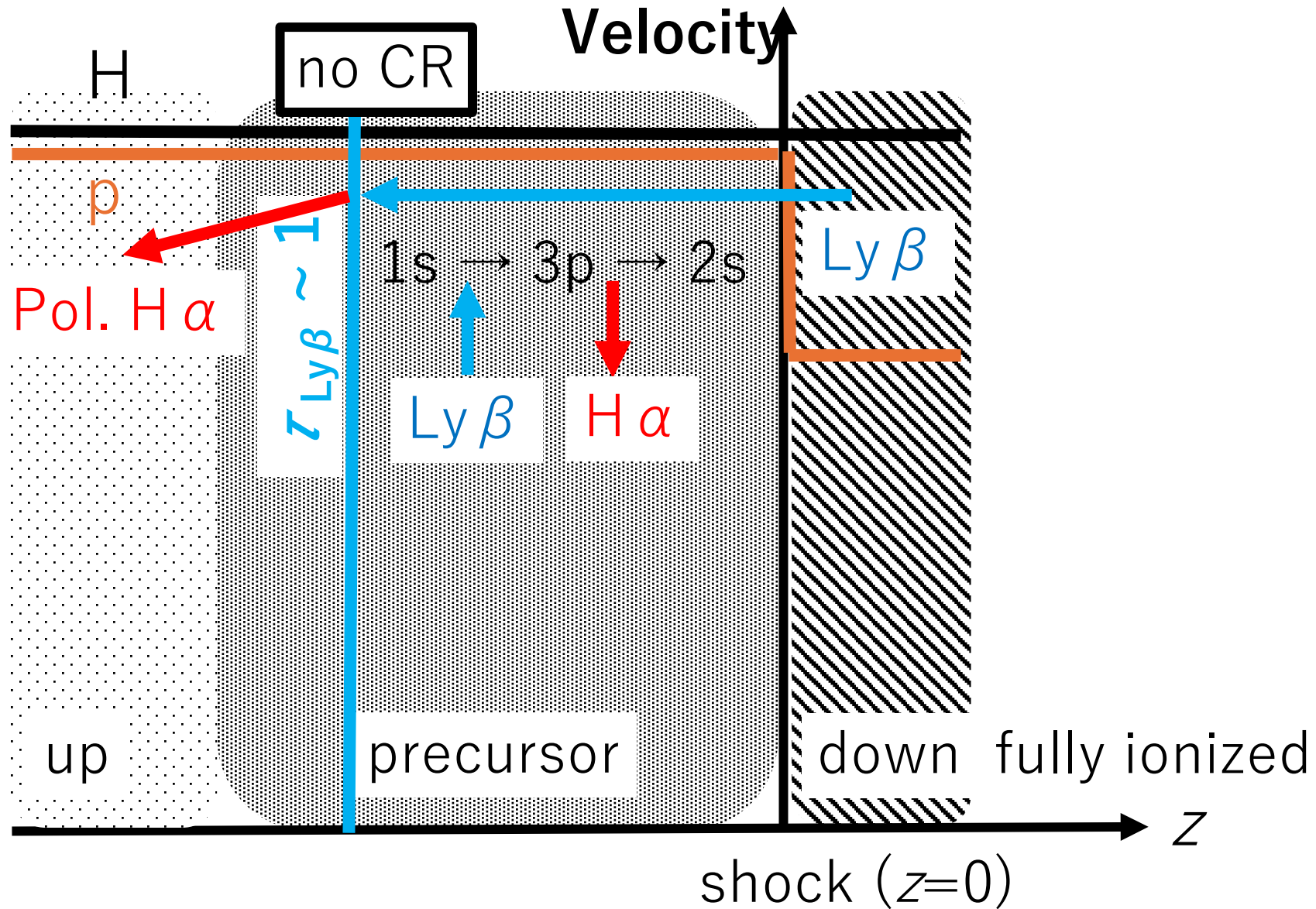
H α emission from upstream



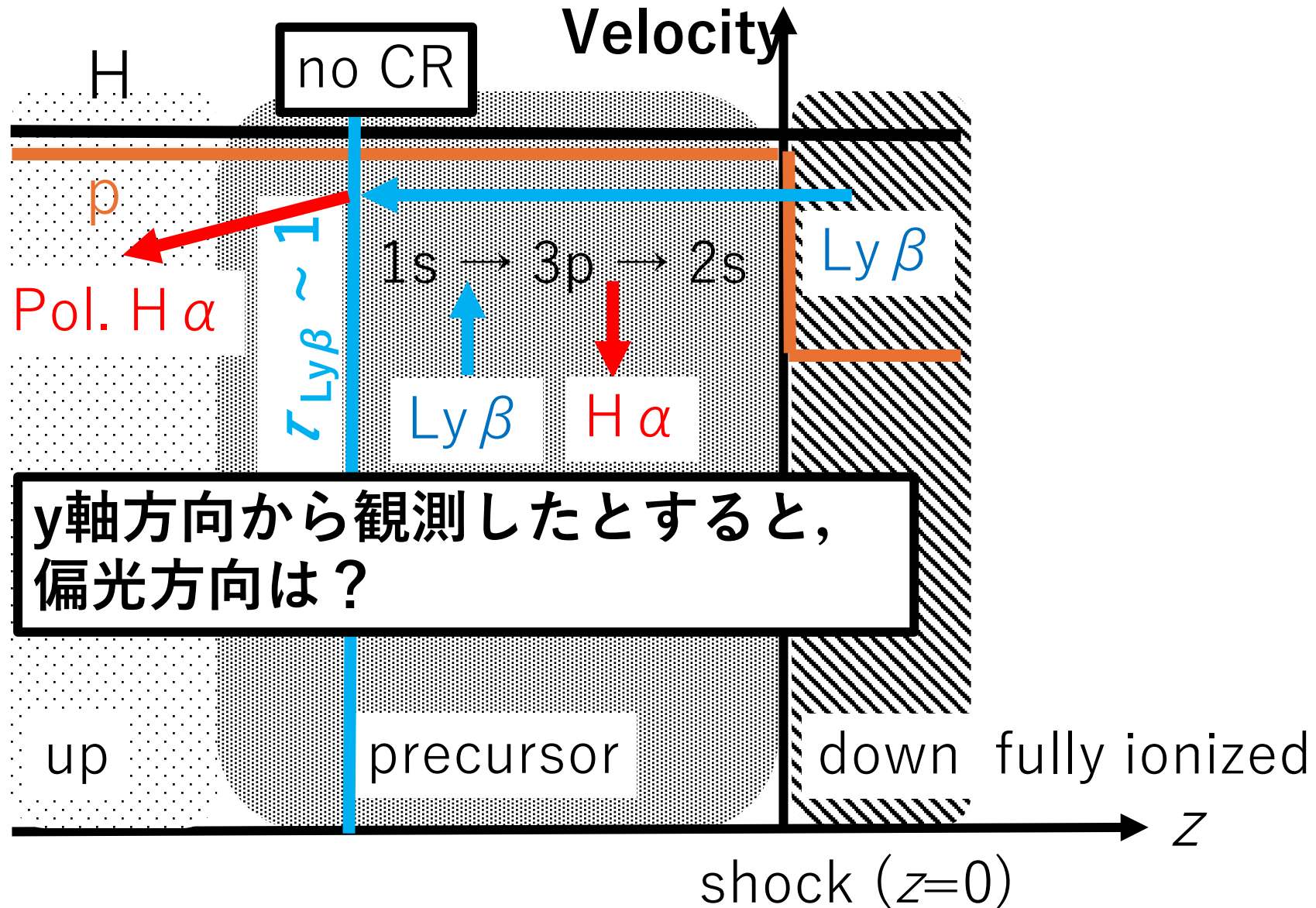
H α emission from upstream

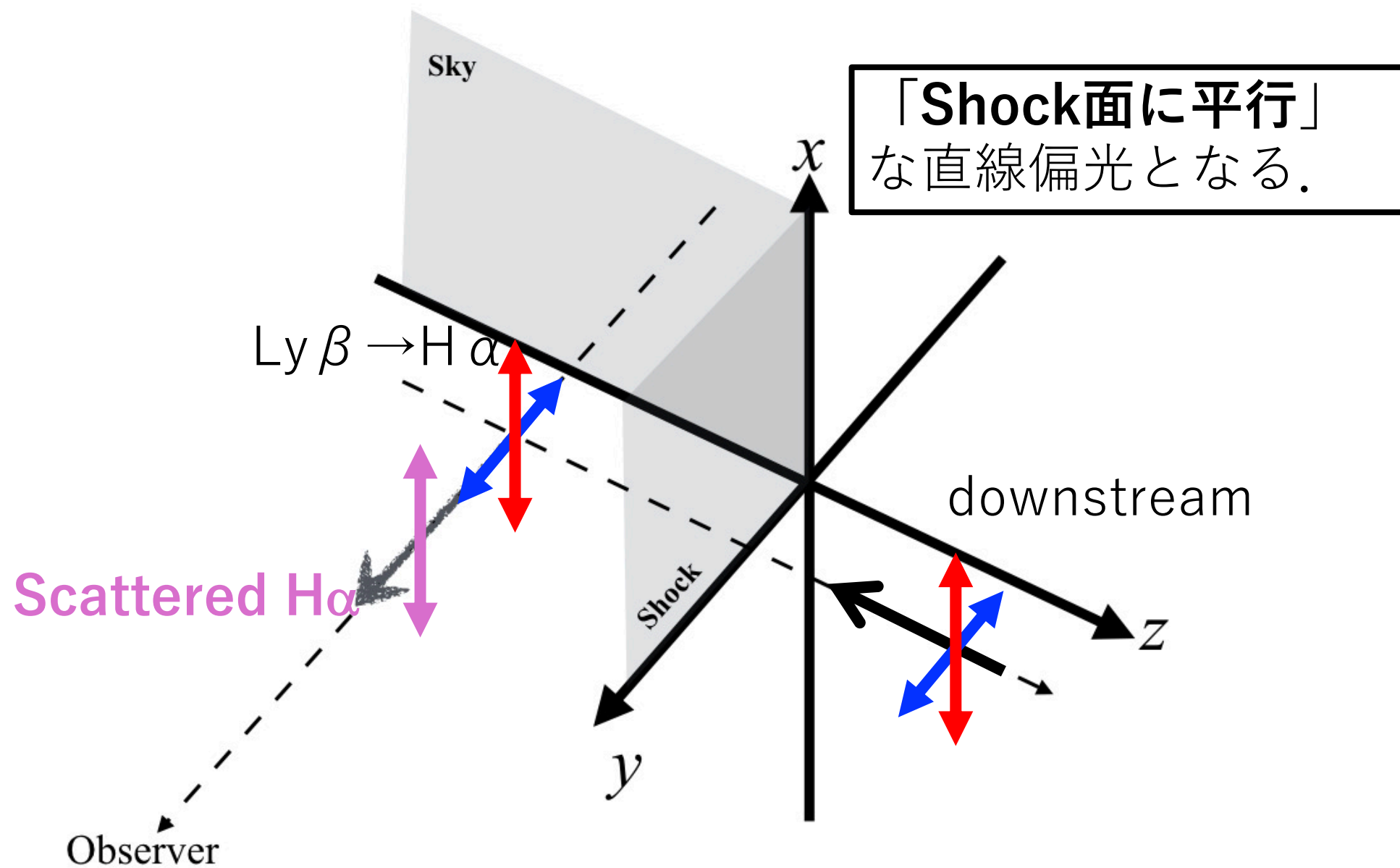


H α emission from upstream

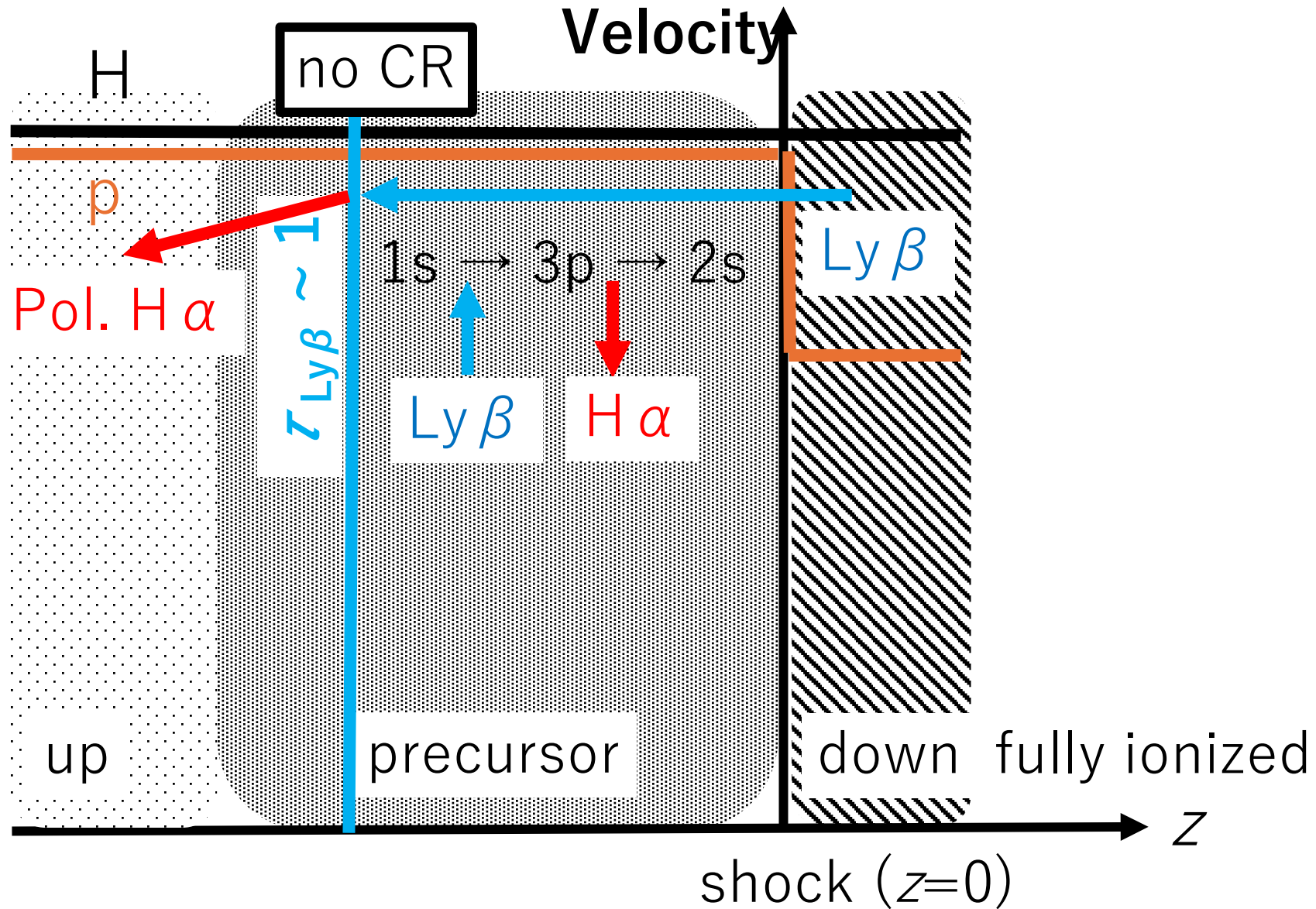


H α emission from upstream

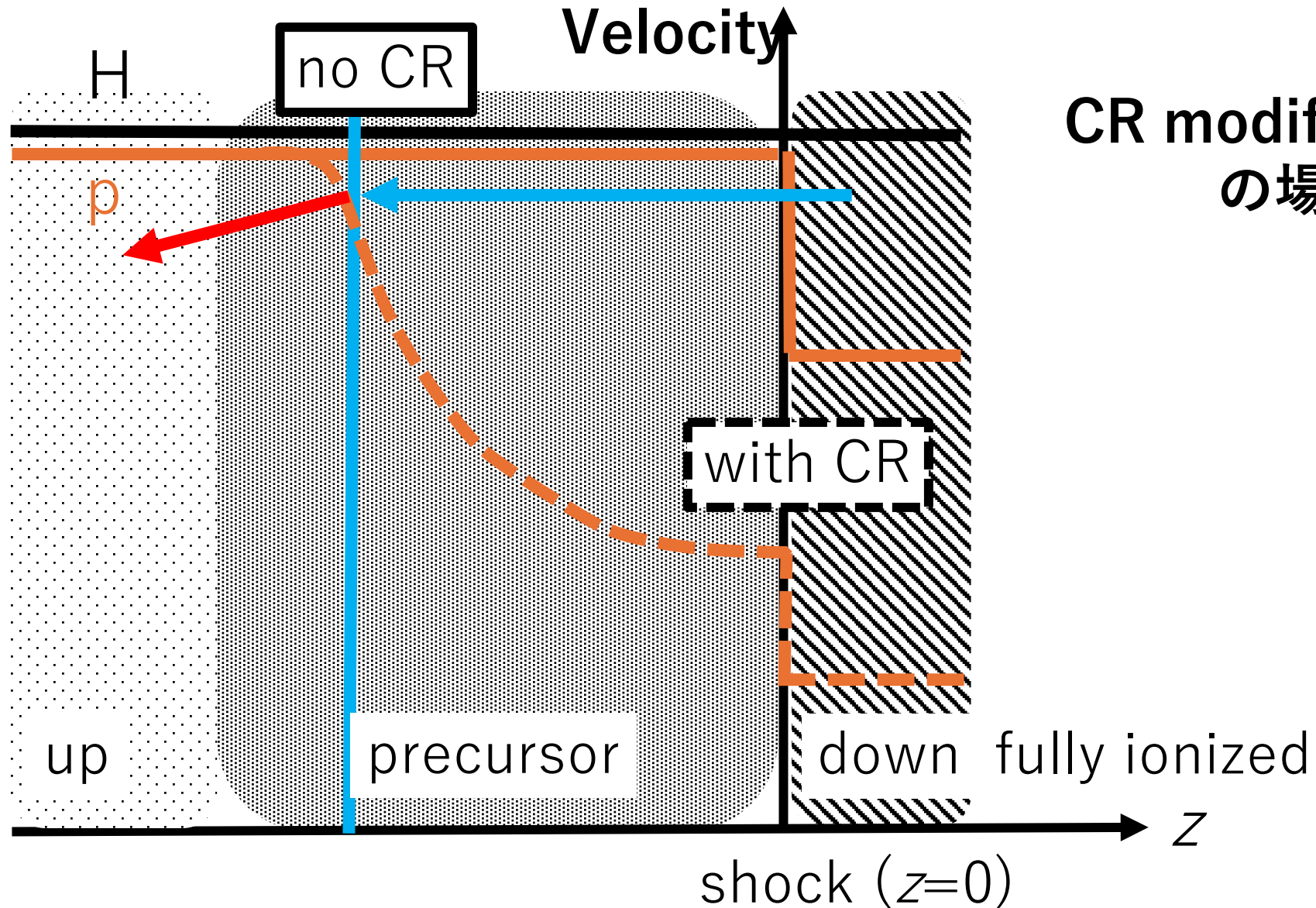




H α emission from upstream

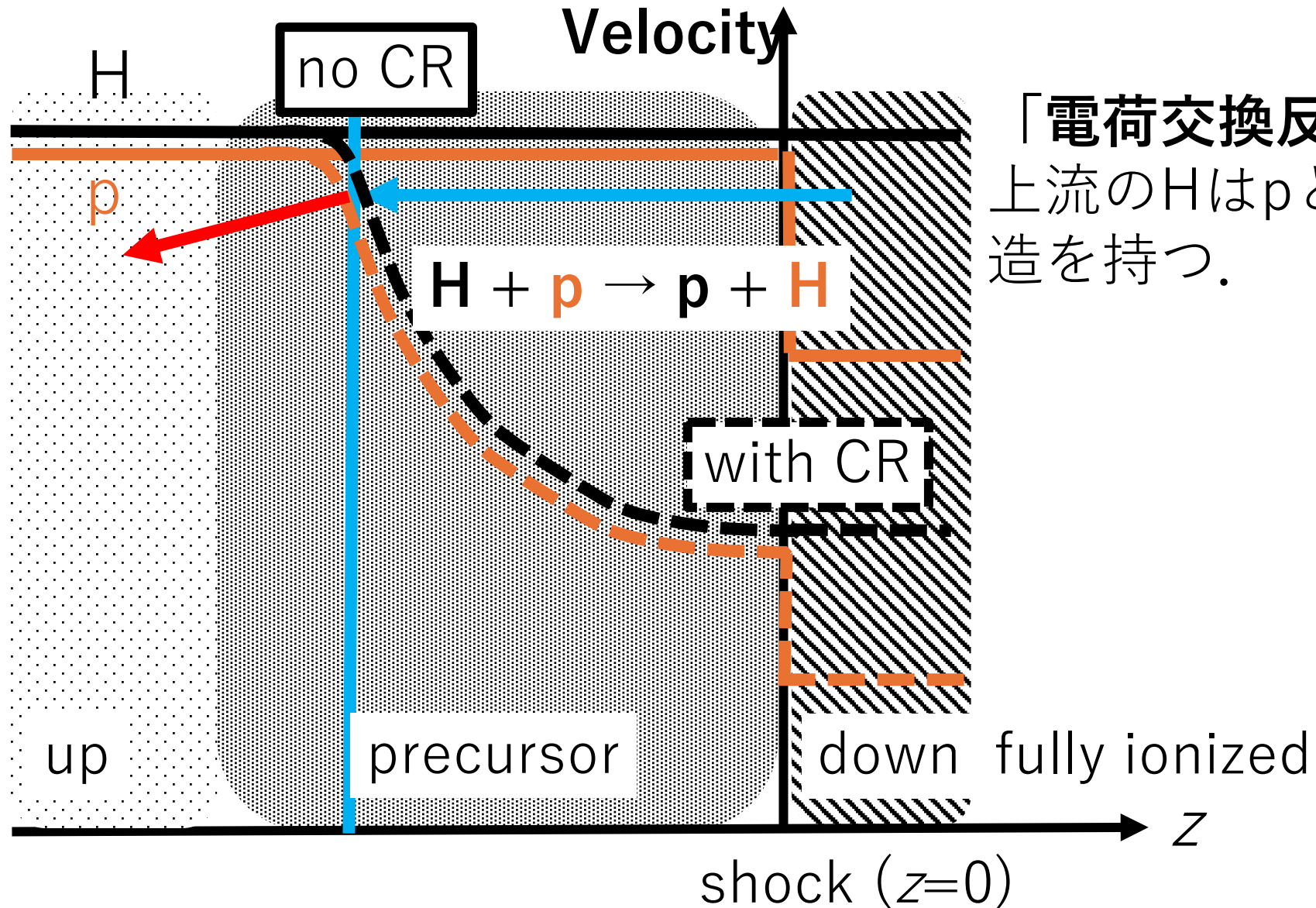


H α emission from upstream



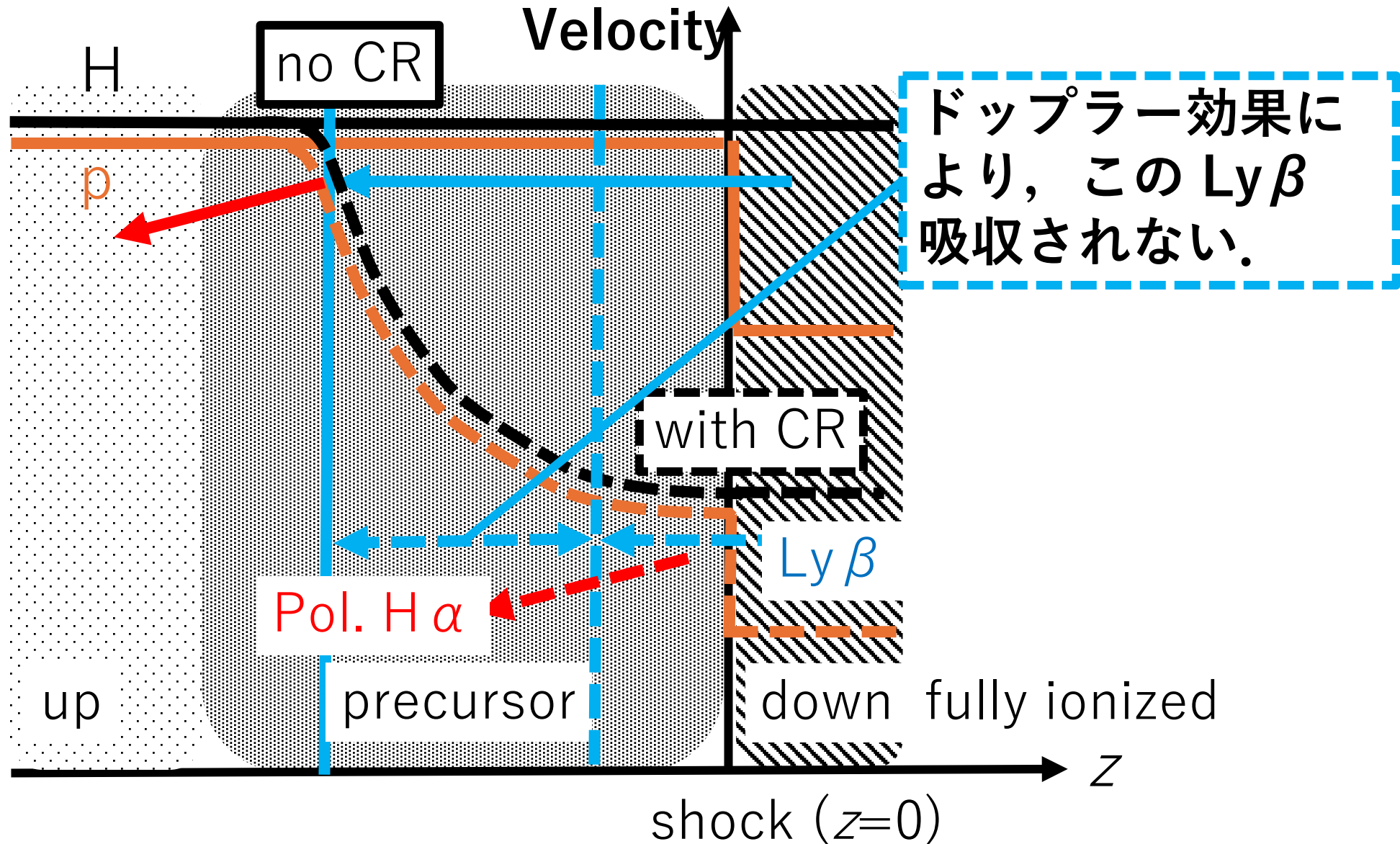
CR modified shock
の場合.

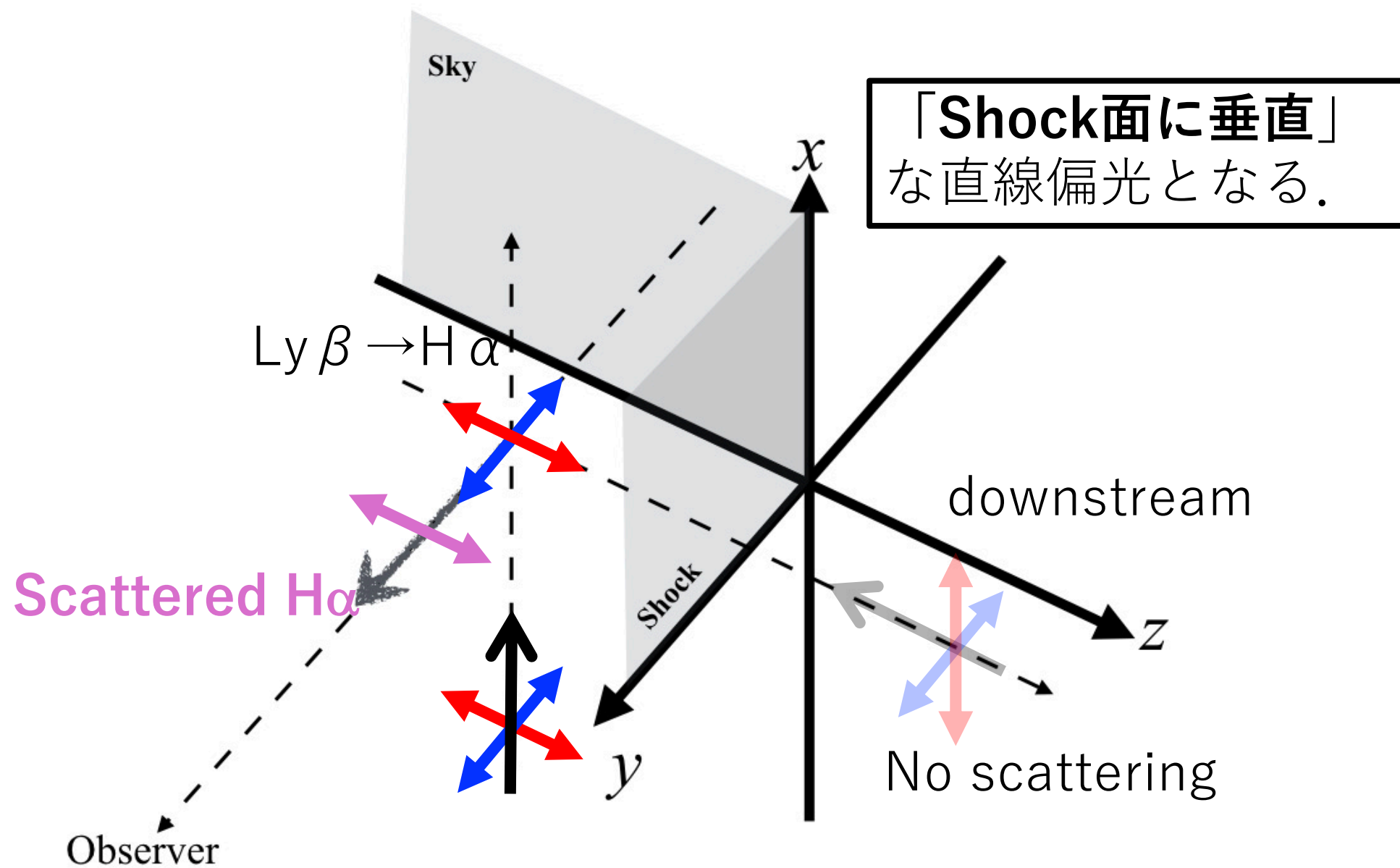
H α emission from upstream



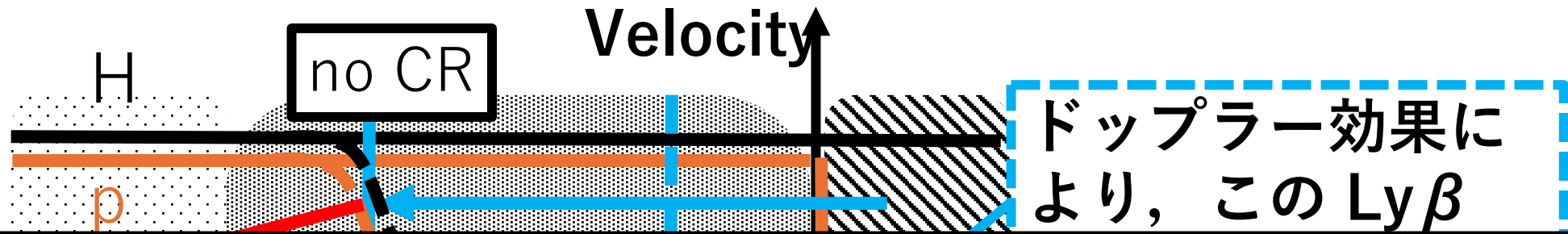
「電荷交換反応」を介して、
上流のHはpと同じ速度構造を持つ。

H α emission from upstream





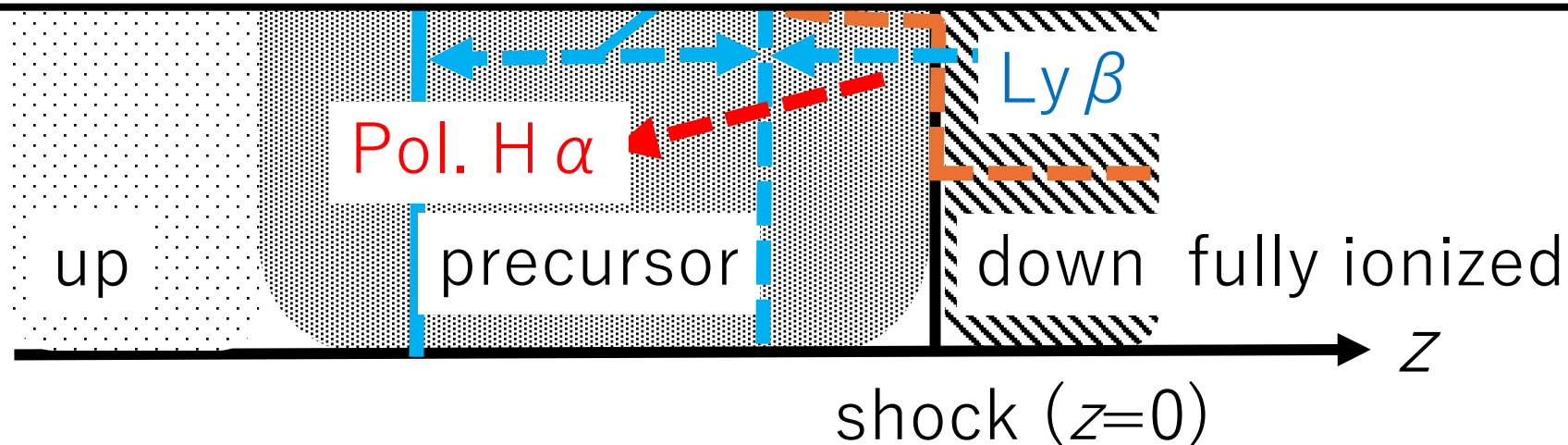
H α emission from upstream



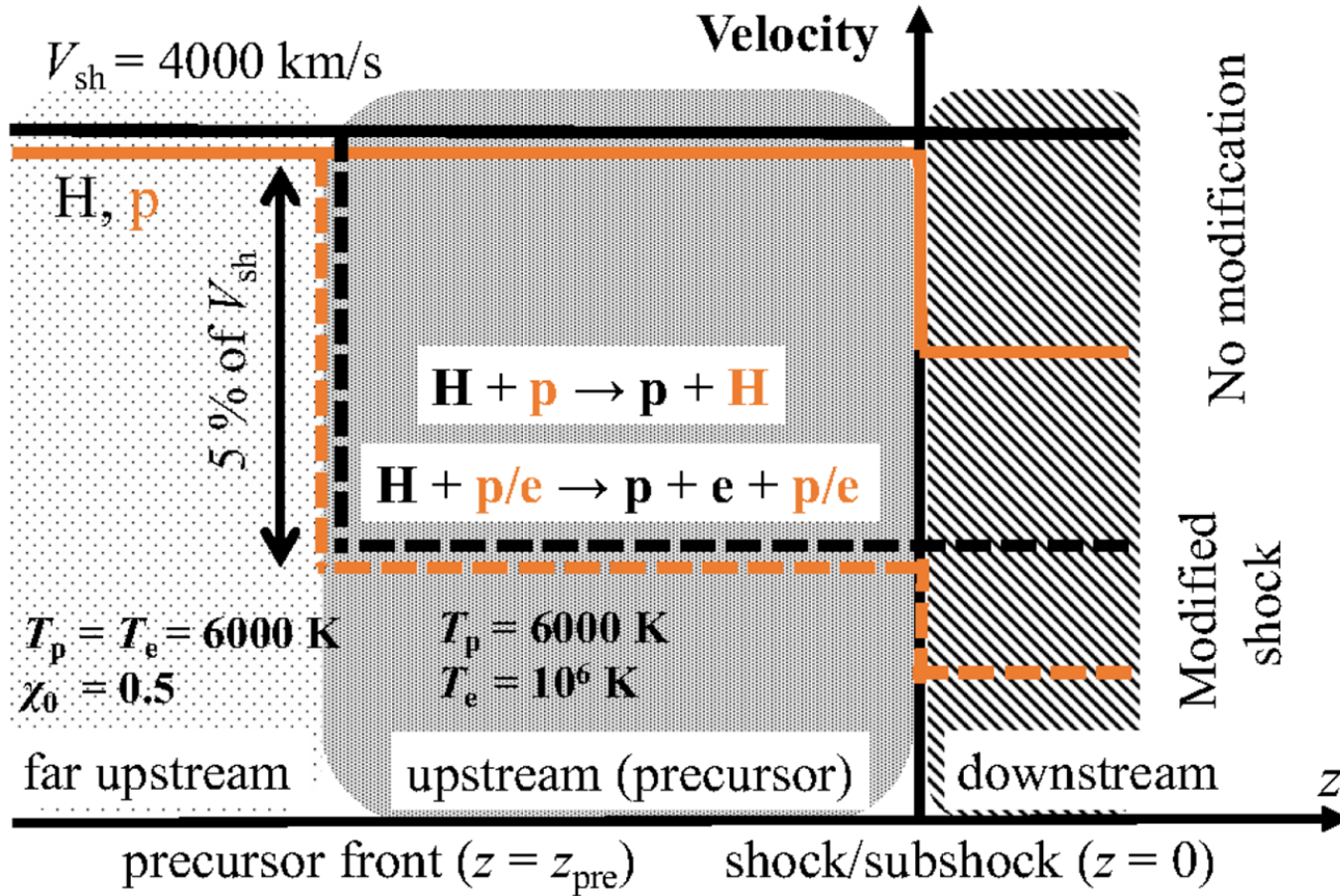
偏光方向と偏光度の定義:

「CRなし」 → 「shock面に平行」 → 偏光度 < 0

「CRあり」 → 「shock面に垂直」 → 偏光度 > 0

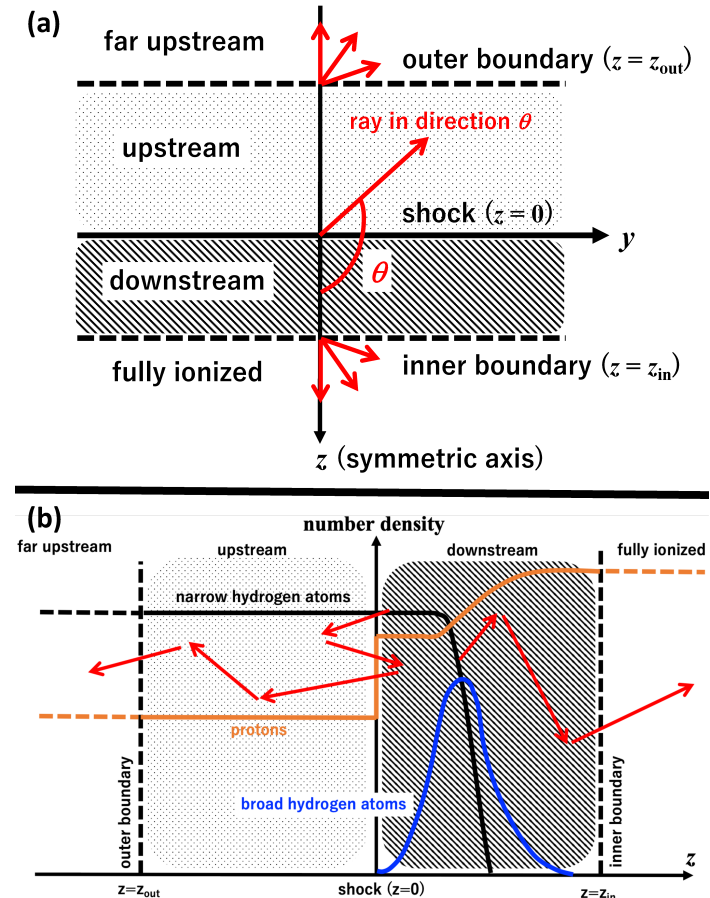


Model set up for the shock



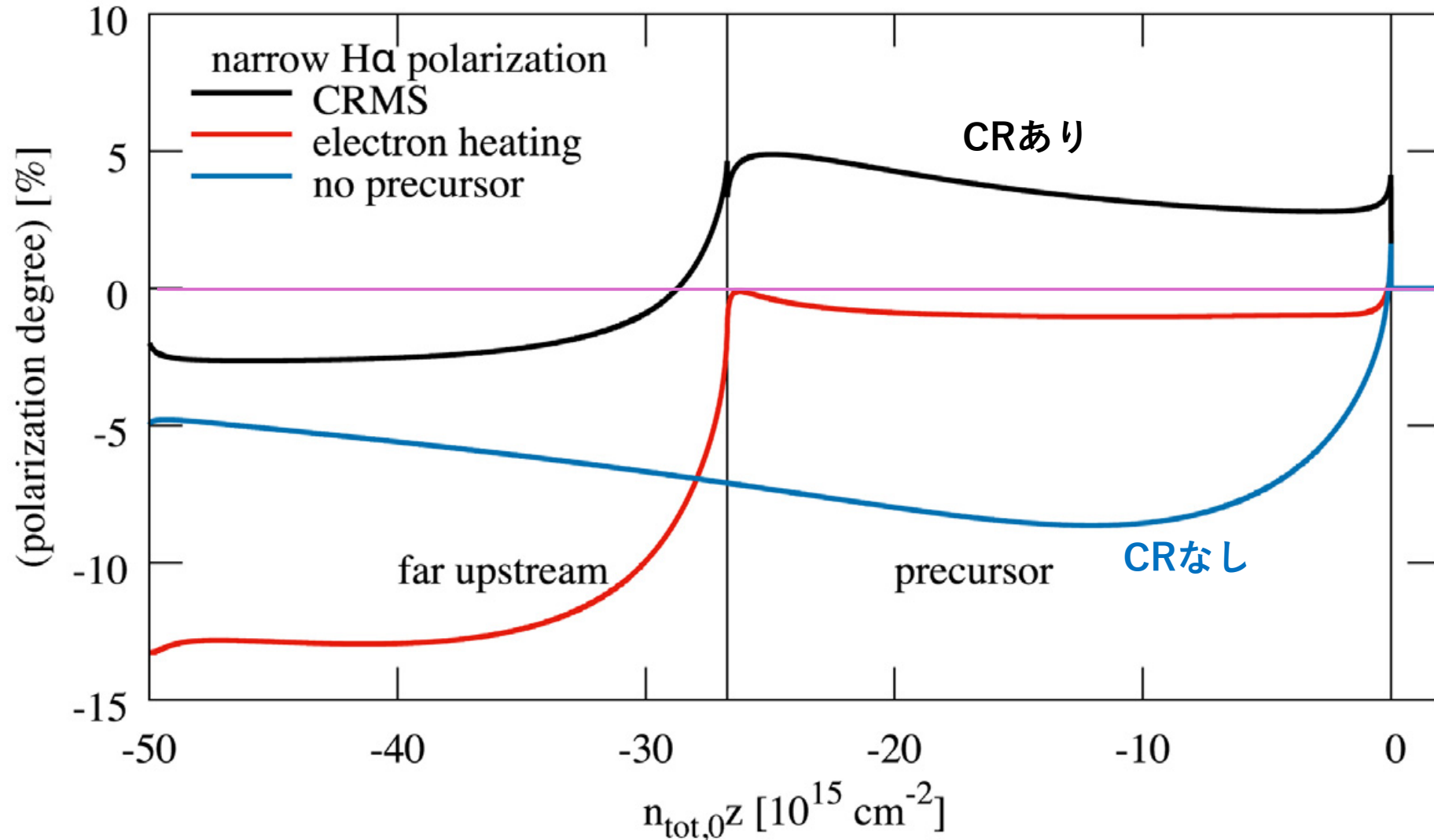
Shock下流は簡単のため，通常のランキン・ユゴニオ関係で与え， $T_e = 0.1 T_p$ を仮定する．

* Line transfer model

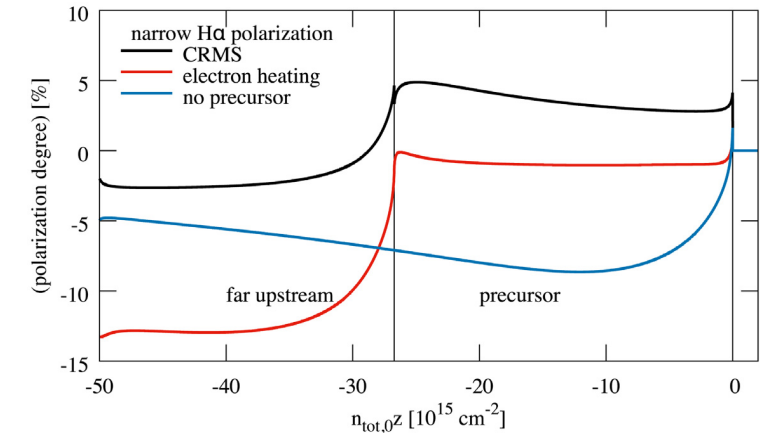
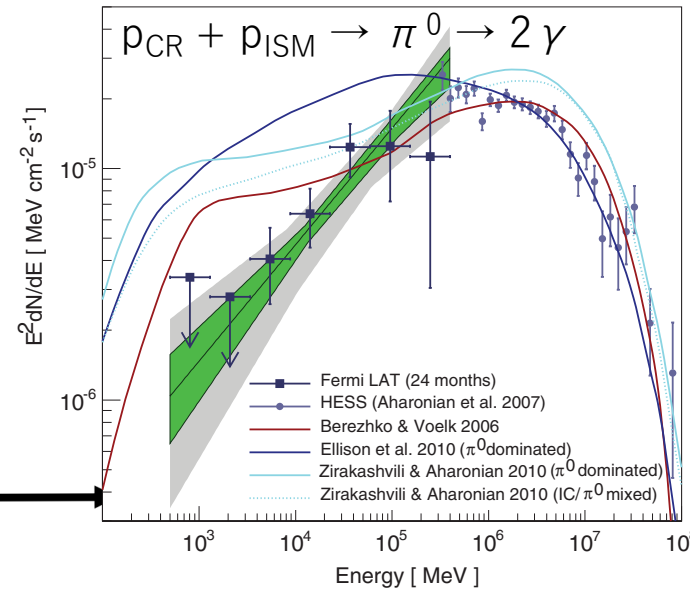
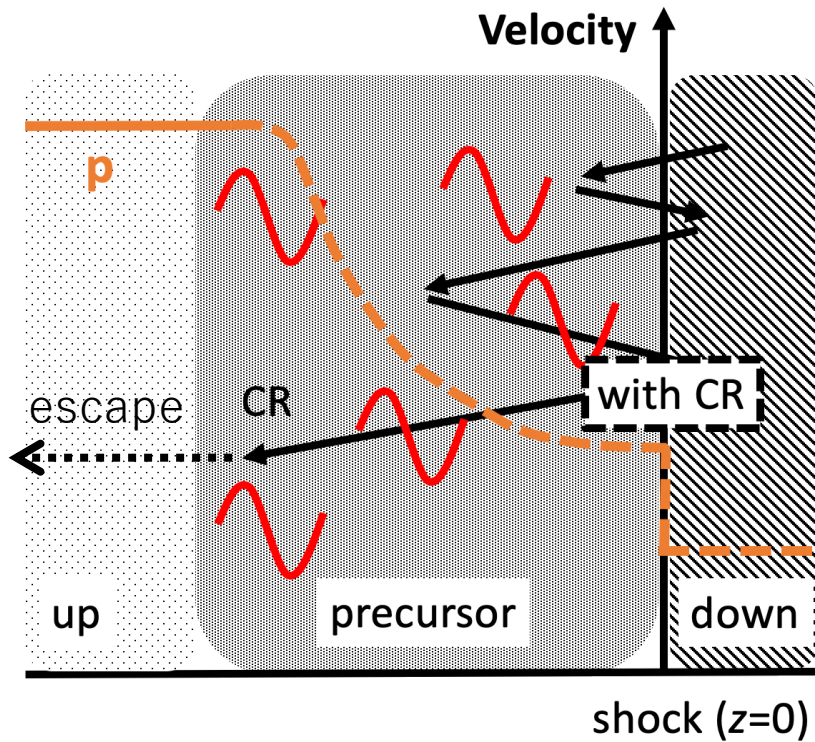


Results: Polarization of H α

The sign of degree indicates the polarization angle (Stokes Q).



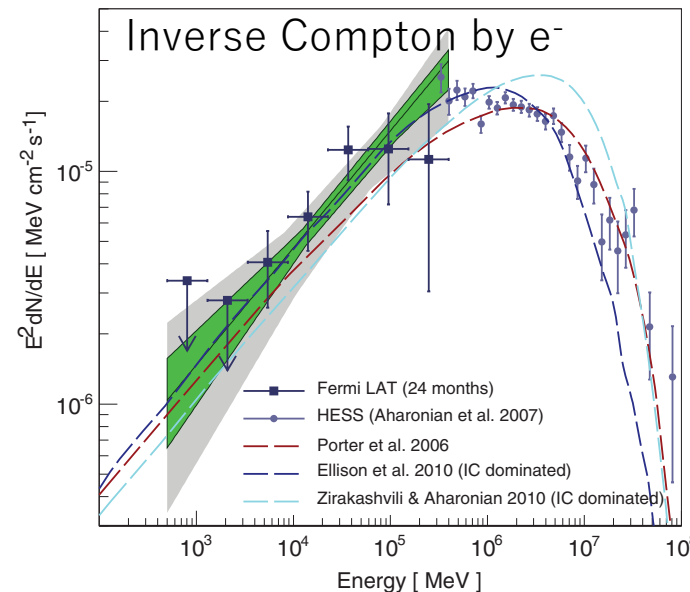
SEDによる宇宙線加速の検証



→ SEDと相補的に、加速効率・反作用効果を検証したかった。

upstream → subscript "0"

downstream → subscript "2"



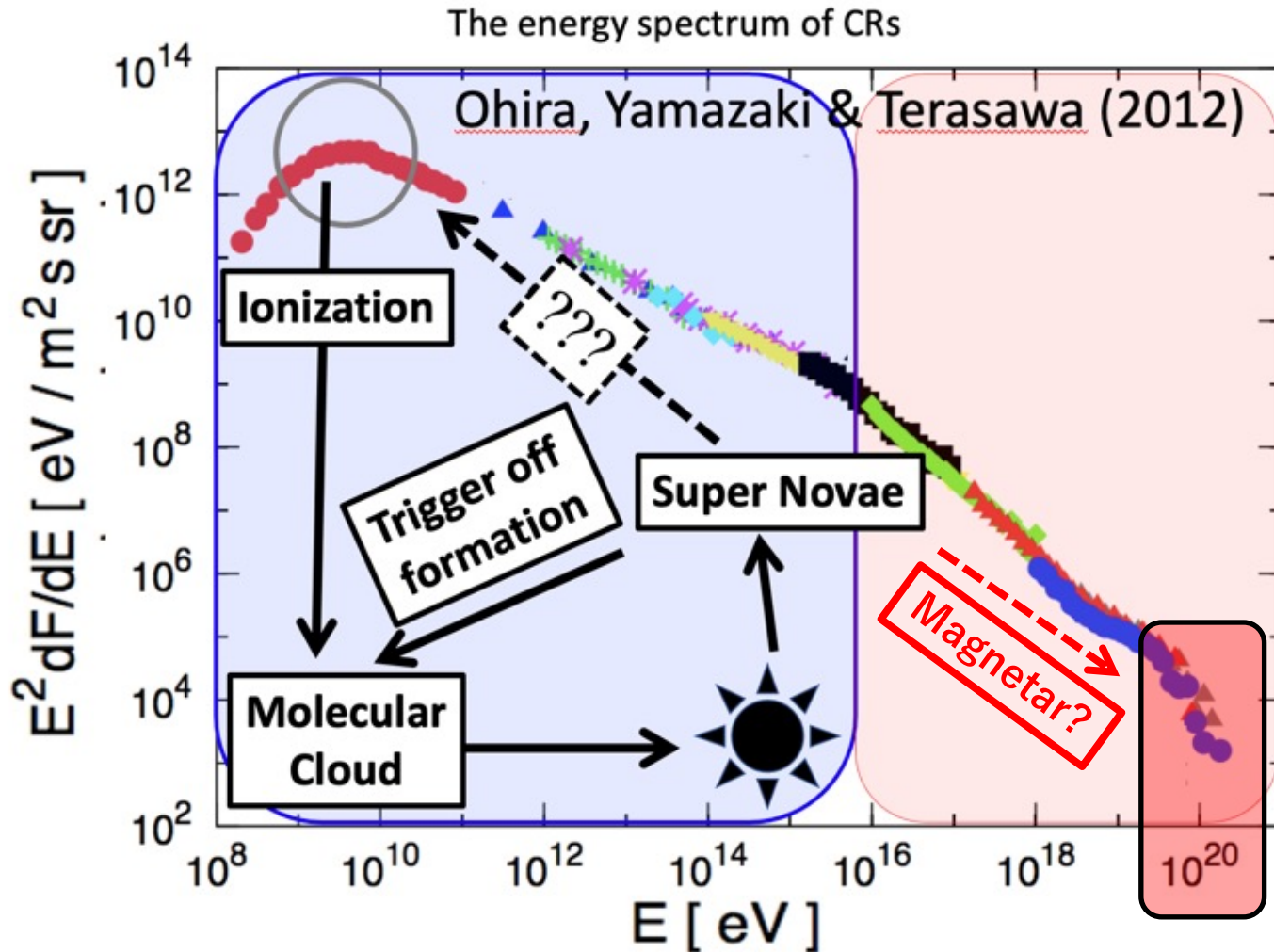
『偏光H α 』の『偏光角』を確認すれば、all or nothingでCR加速による反作用効果を制限できる！

Leptonic/Hadronic論争からの卒業。
SEDを使って、加速過程の詳細を理解していきたい。

よろしくお願いします

名前：霜田治朗

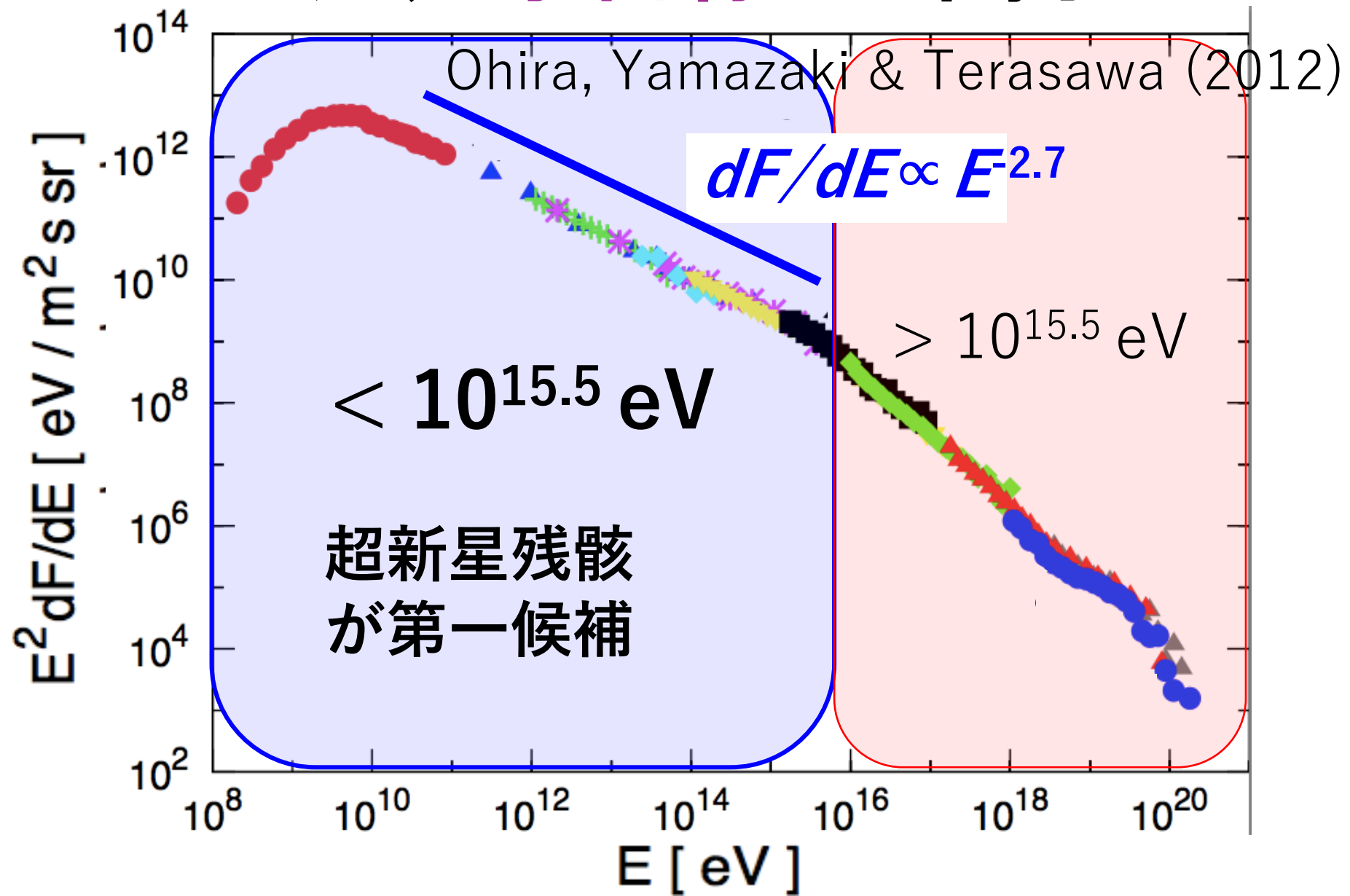
所属：宇宙線研究所高エネルギー天体グループ特任助教



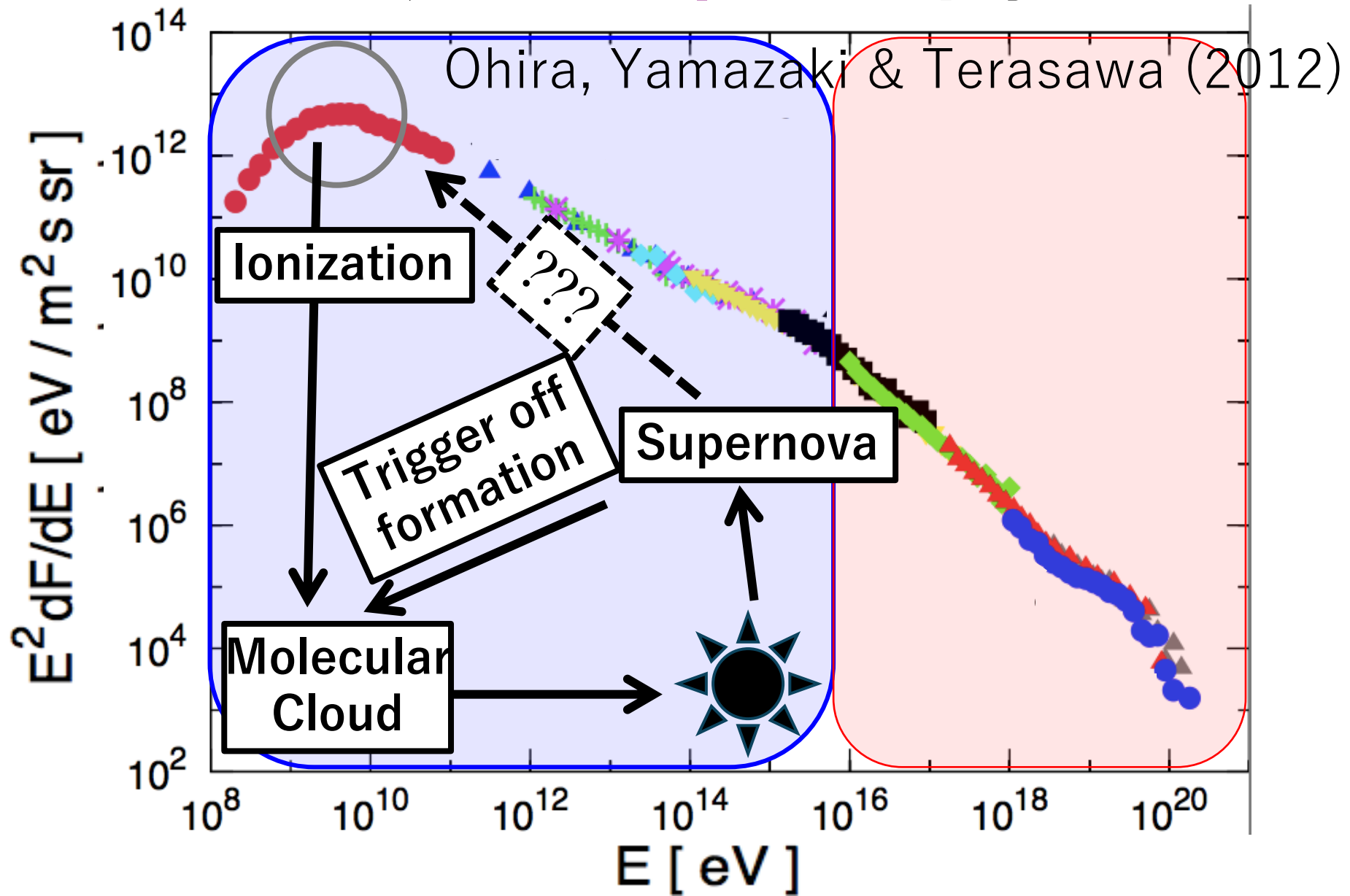
- 1) 銀河宇宙線の起源解明のための研究
- 2) 宇宙線と星形成史の関係について
- 3) >100 EeV宇宙線の加速機構について

宇宙線の起源と，宇宙における役割
をキーワードにして研究しています。

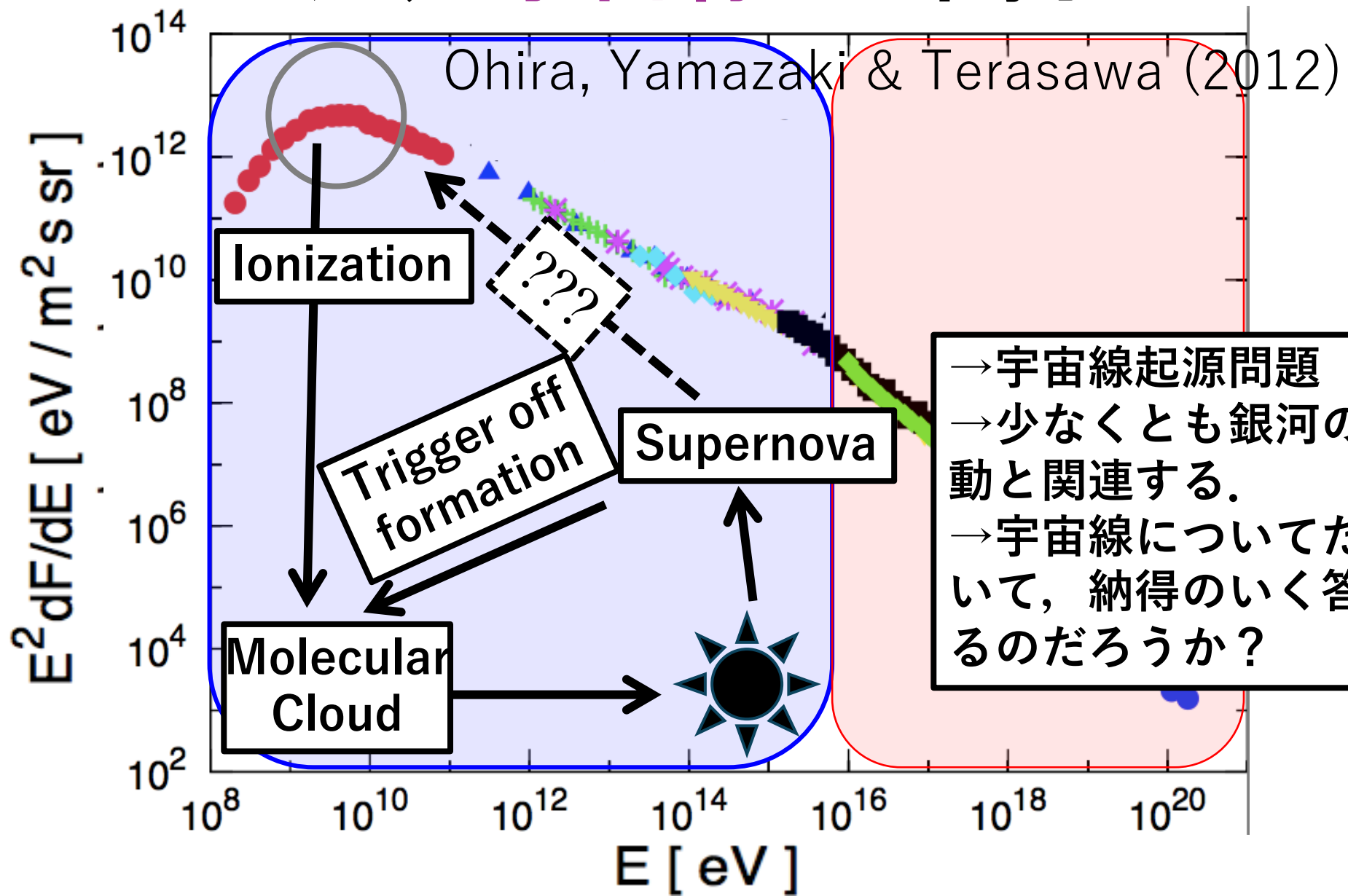
逃走宇宙線との闘争



逃走宇宙線との闘争



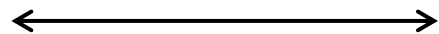
逃走宇宙線との闘争



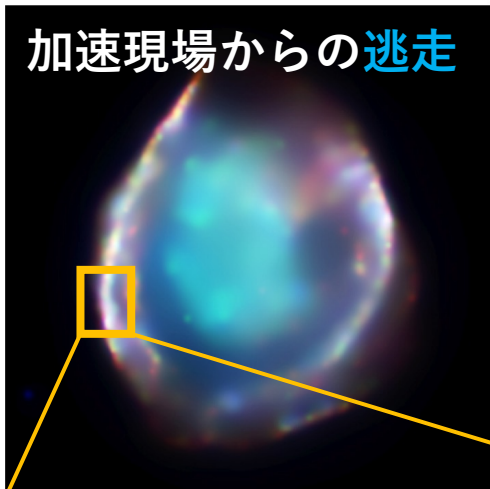
→宇宙線起源問題
→少なくとも銀河の星形成活動と関連する。
→宇宙線についてだけ考えていて、納得のいく答えが出せるのだろうか？

逃走宇宙線との闘争

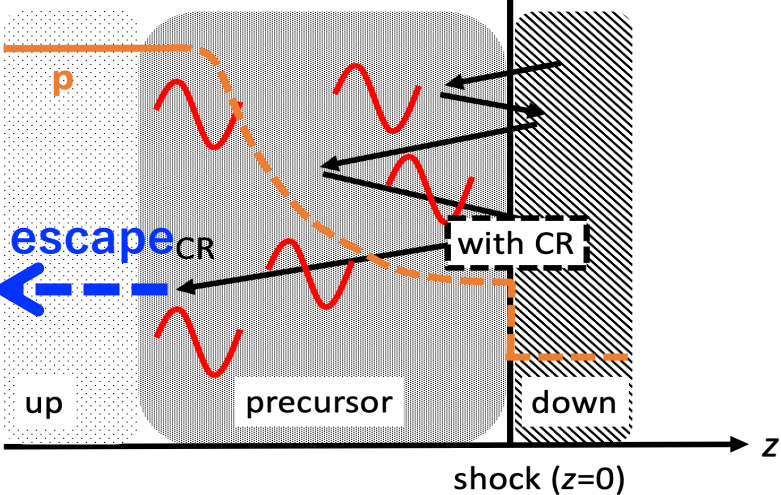
~1 pc



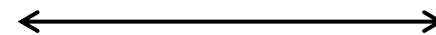
加速現場からの逃走



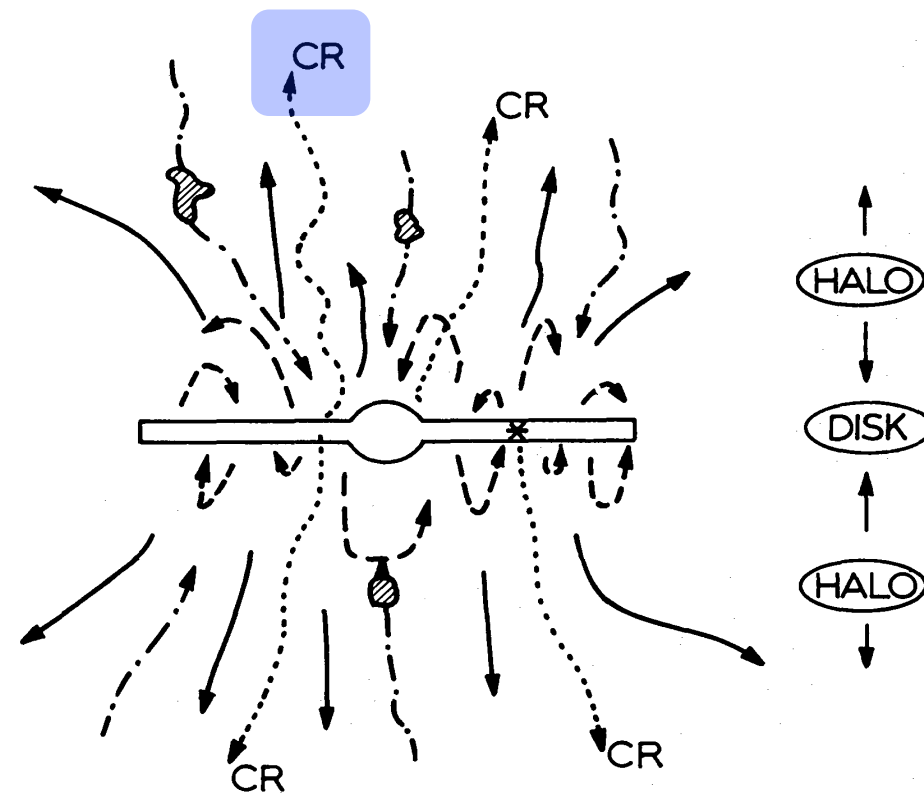
Velocity



~10 kpc



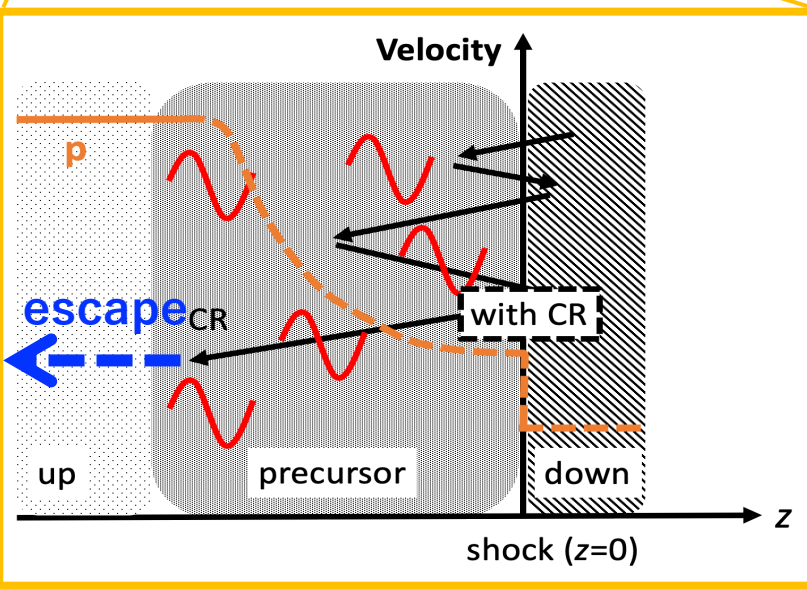
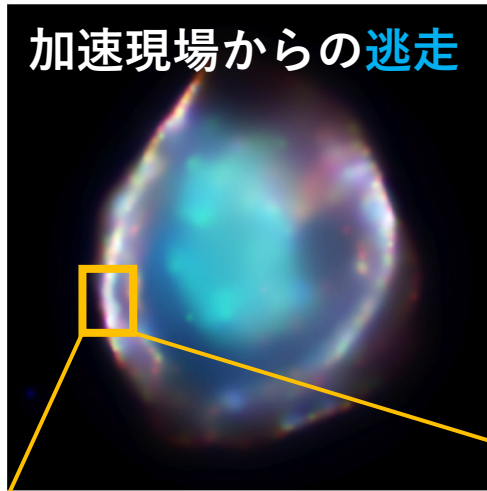
銀河系からの逃走



~1 pc

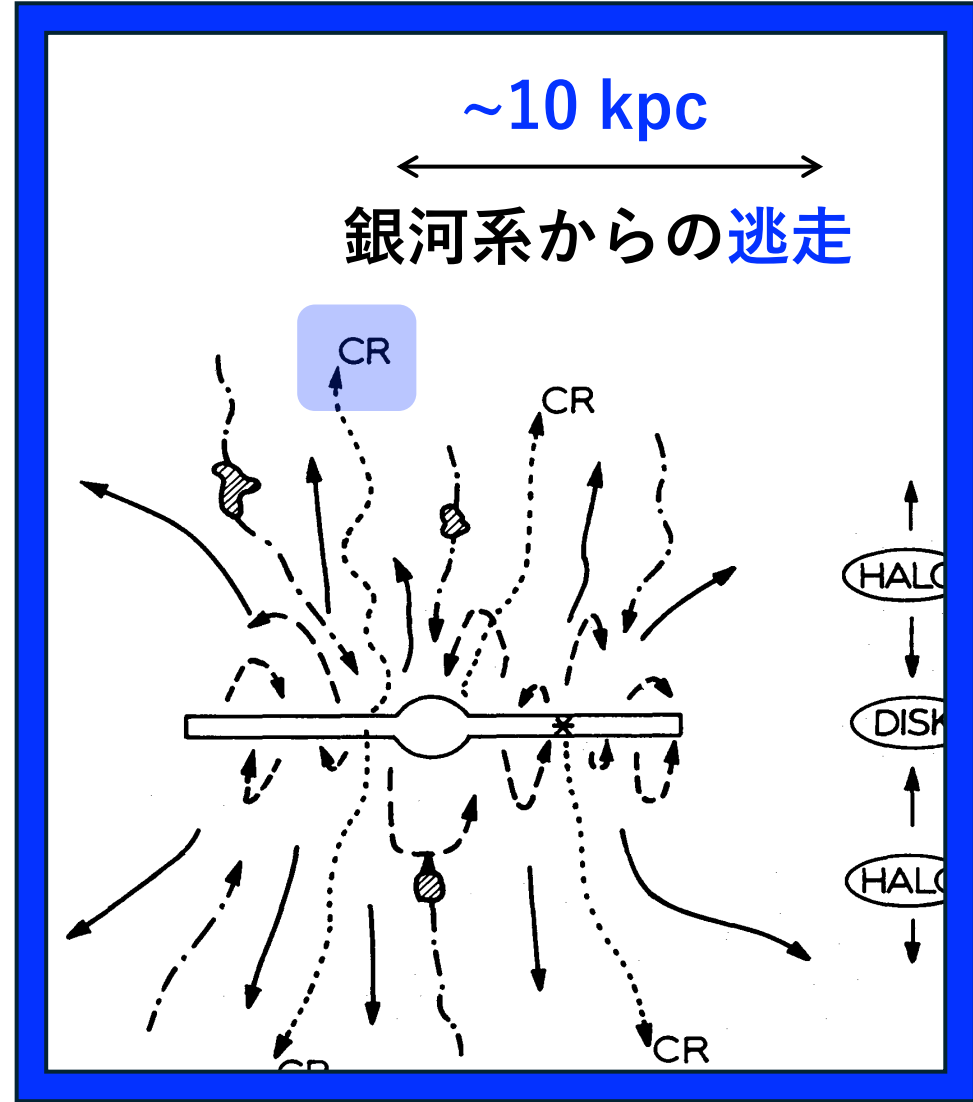
逃走宇宙線との闘争

加速現場からの逃走

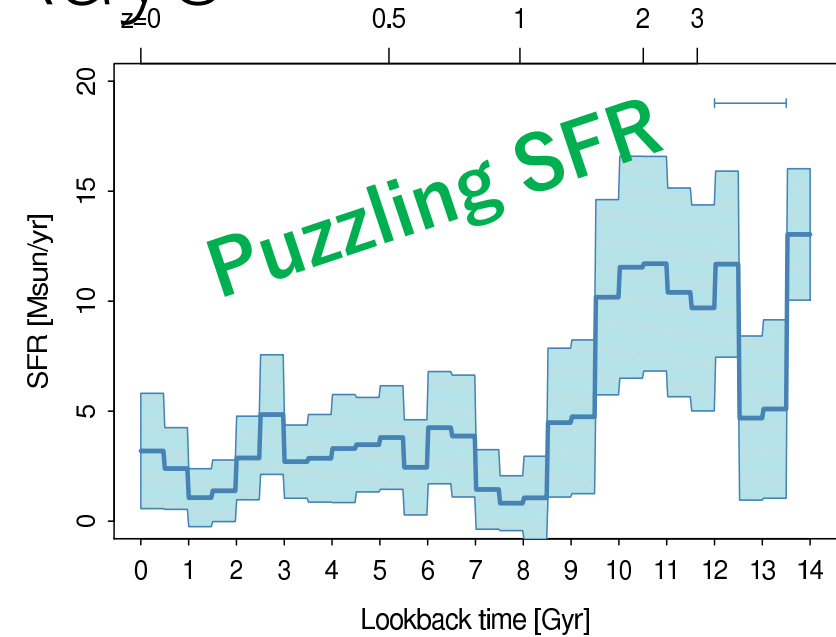
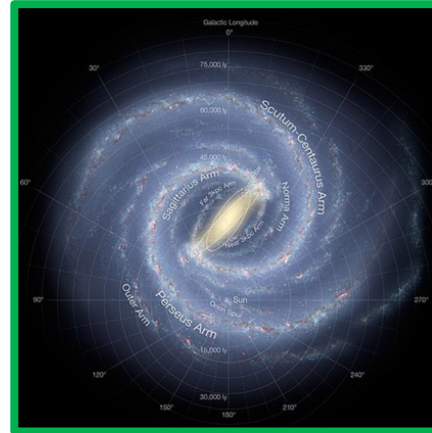
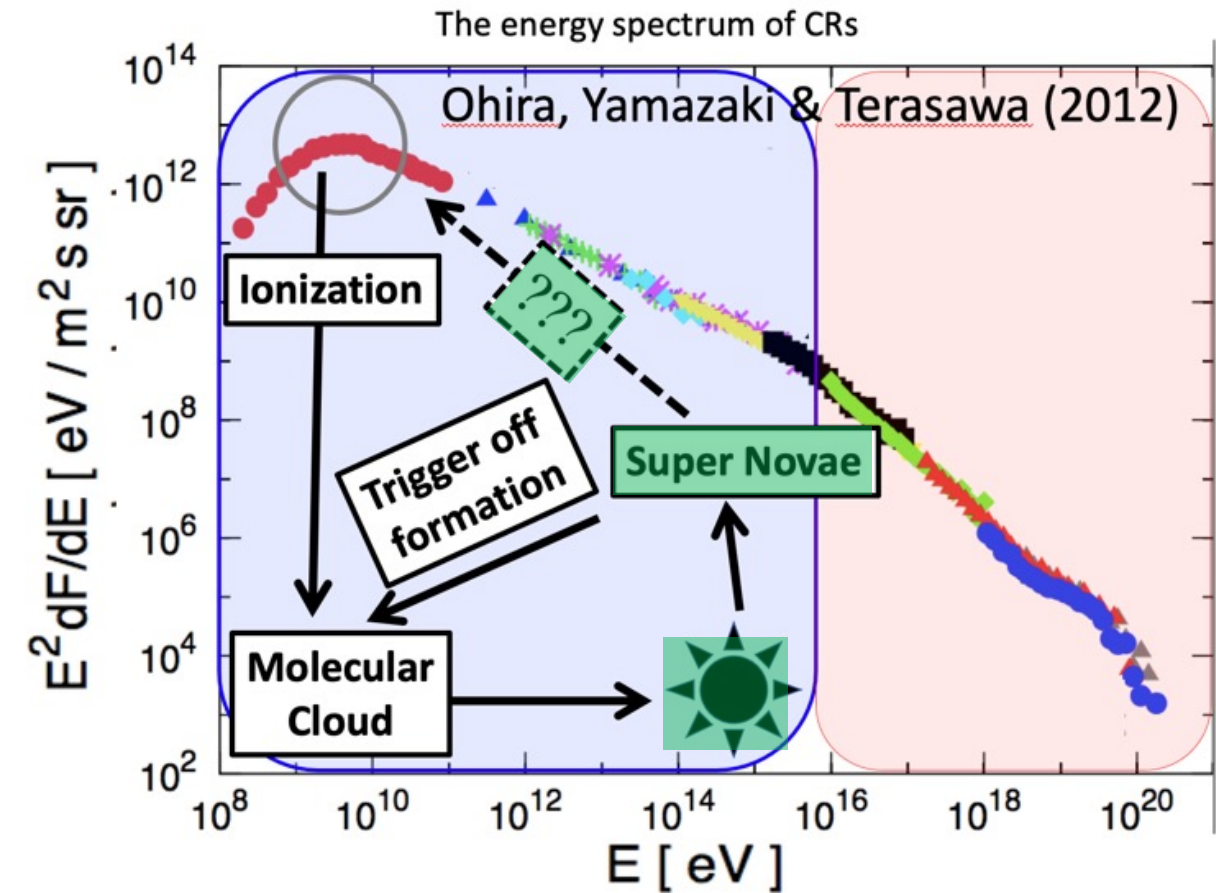


~10 kpc

銀河系からの逃走



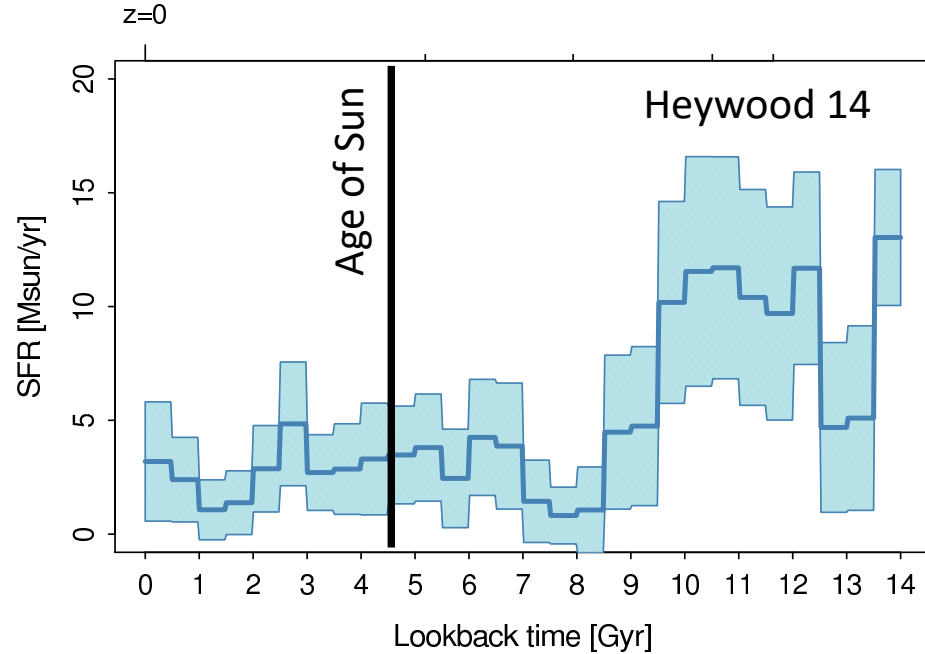
Roles of Galactic Cosmic Rays



The long-term SFR is regulated by the galactic wind driven by CRs.

→ *Galaxy formation*

"Puzzling" Star Formation History (in the context of the current Galactic disk condition)



Total mass of DM: $\sim 10^{12} M_{\text{sun}}$
Total mass of stars: $\sim 4\text{-}6 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$

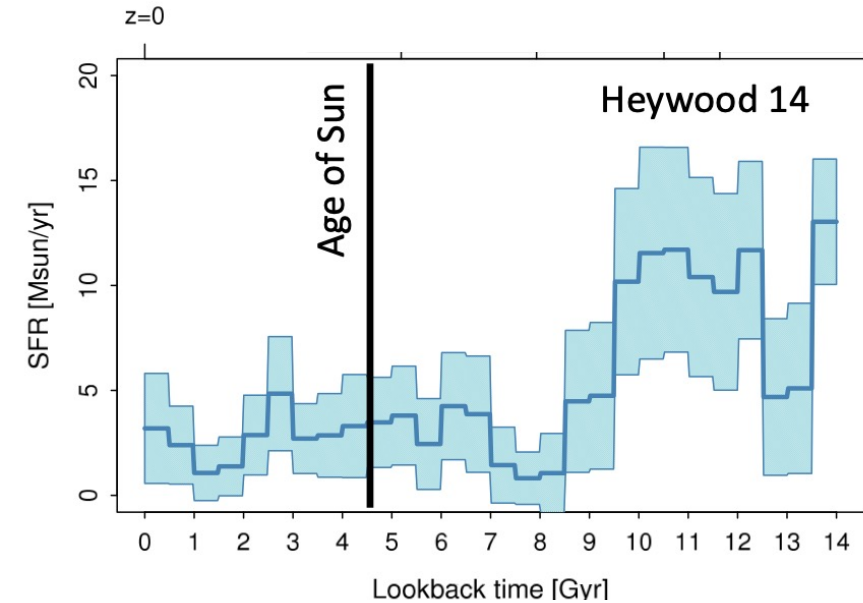
Current SFR: $\sim 1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$
Total gas mass: $\sim 10^9 M_{\text{sun}}$

Cf. Bland-Hawthorn & Gerhard 16, the Planck Collaboration 18

➤ From the current MW ...

1. The gas should be depleted within ~ 1 Gyr !
2. Replenishment of gas is required.
3. Galactic halo (CGM) may be a dominant gas reservoir.

"Puzzling" Star Formation History (the metal amount)



@ disk

SFR $\sim 3 M_{\odot}/\text{yr}$

Gas mass $\sim 10^9 M_{\odot}$ (Metallicity $Z_0 \sim 0.01 \rightarrow$ Metal mass $\sim 10^7 M_{\odot}$)

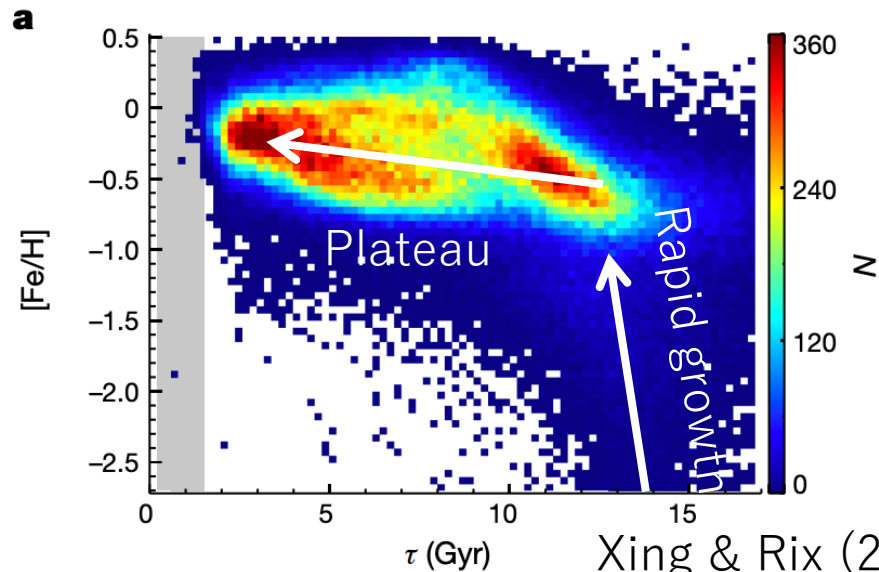
Salpeter IMF $\rightarrow$ Massive Star FR $\sim 0.1 M_{\odot}/\text{yr}$

Total Metal Mass Ejected by SNe

$\rightarrow \sim (\text{SFR}) \times (\text{Massive Star fraction}) \times (\text{CO core mass fraction}) \times (14 \text{ Gyr})$

$\sim (3 M_{\odot}/\text{yr}) \times (0.1) \times (3 M_{\odot}/8 M_{\odot}) \times (14 \text{ Gyr})$

$\sim 1.6 \times 10^9 M_{\odot}$



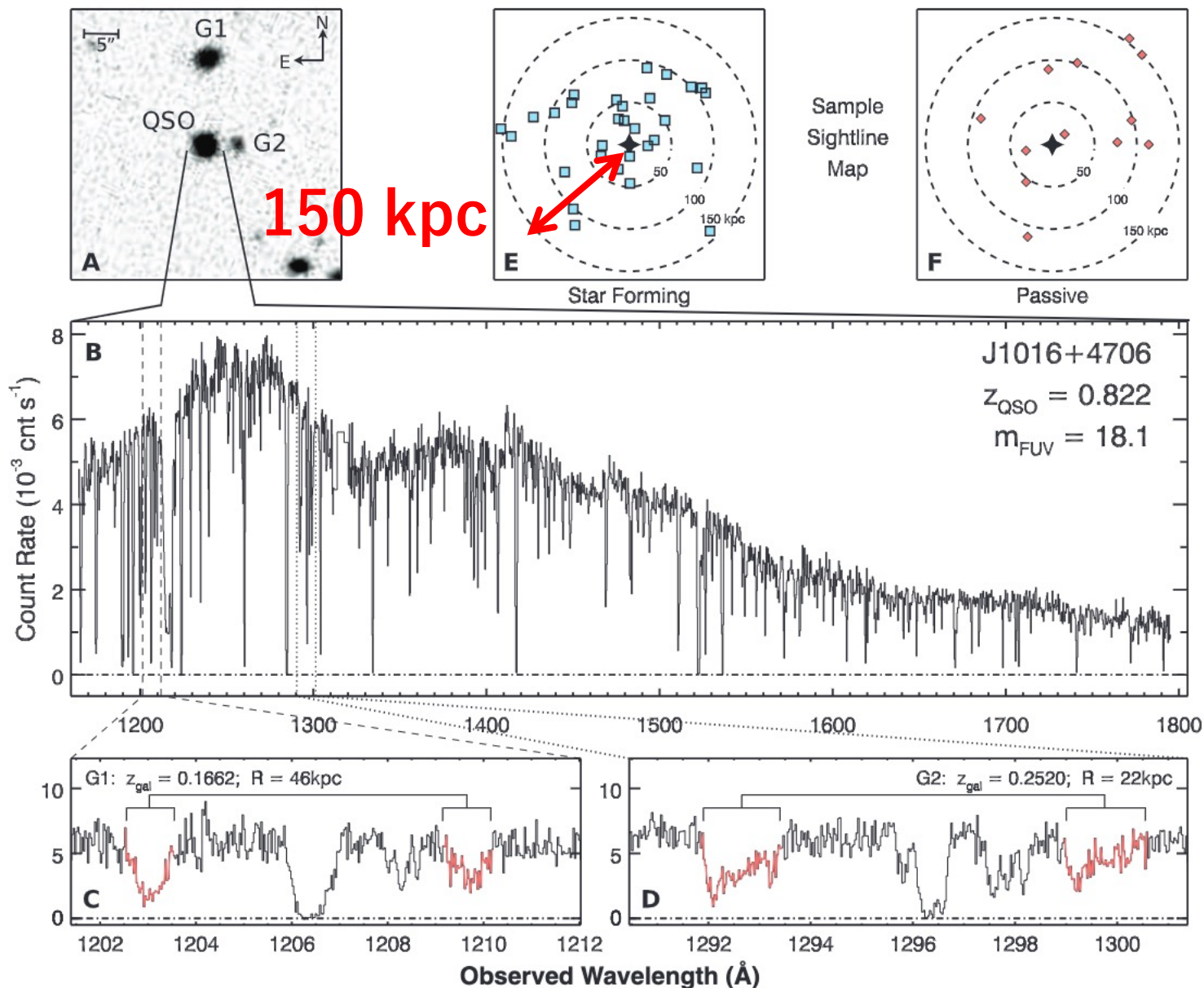
$\sim 99\%$ of metals should be removed from the disk!

$\rightarrow$ Persistent Outflow is required!

(SJ & Inutsuka 22, SJ, Inutsuka, & Nagashima 24, SJ & Asano 24)

Xing & Rix (2022, by Gaia)

Circum-Galactic Medium (CGM)



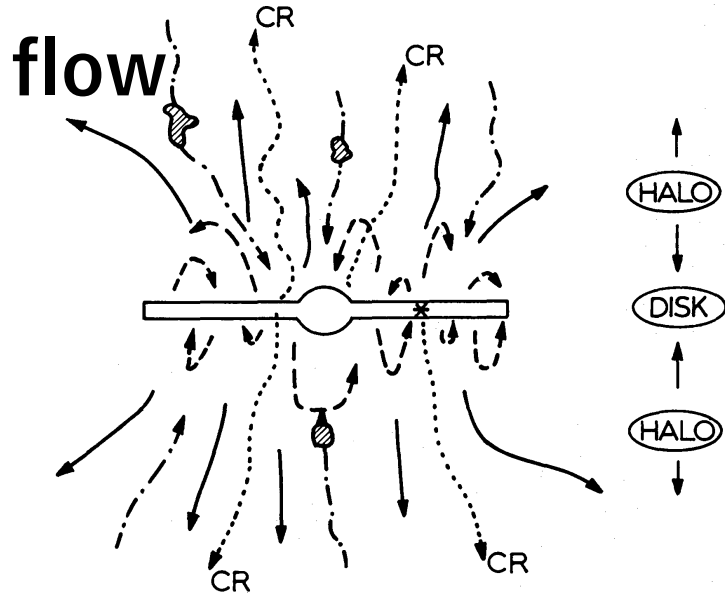
“Discovery” of hot, highly ionized medium around galaxies (Tumlinson+11, 17).

- O_{VI} absorption line
 - $T_{\text{ionized}} \sim 3 \times 10^5 \text{ K}$, $N_{\text{OVI}} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
 - Estimated total gas mass
 $\sim 10^{10} - 10^{12} M_{\text{sun}}$

Missing Metals may be in the Galactic halo.

→ The Outflow is required.

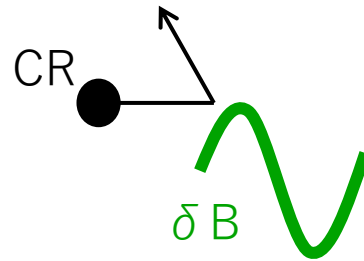
Outflow Model (SJ & Inutsuka 2022) w/ Radiative cooling & CR diffusion



Essence

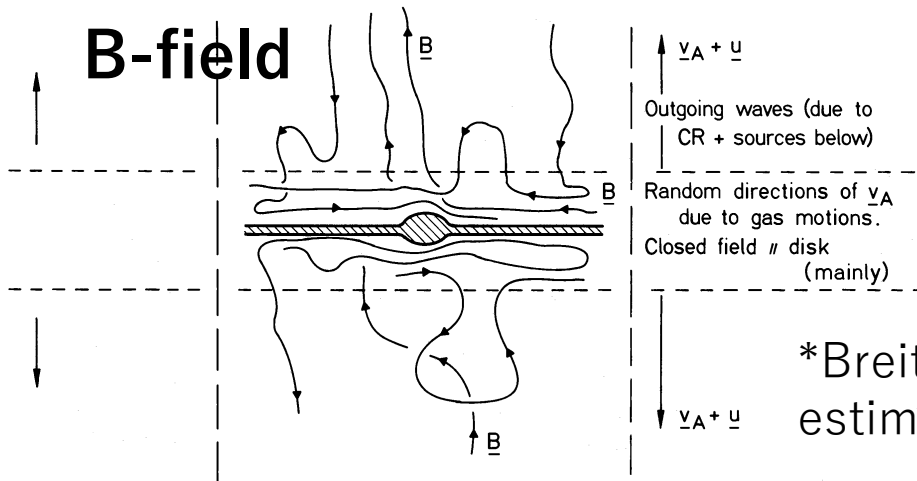
(Shapiro & Field 76)

Radiative cooling $\rightarrow T < T_{\text{vir}} \rightarrow$ wind never launching
Heating by CRs $\rightarrow$ Comparable with Radiative cooling!



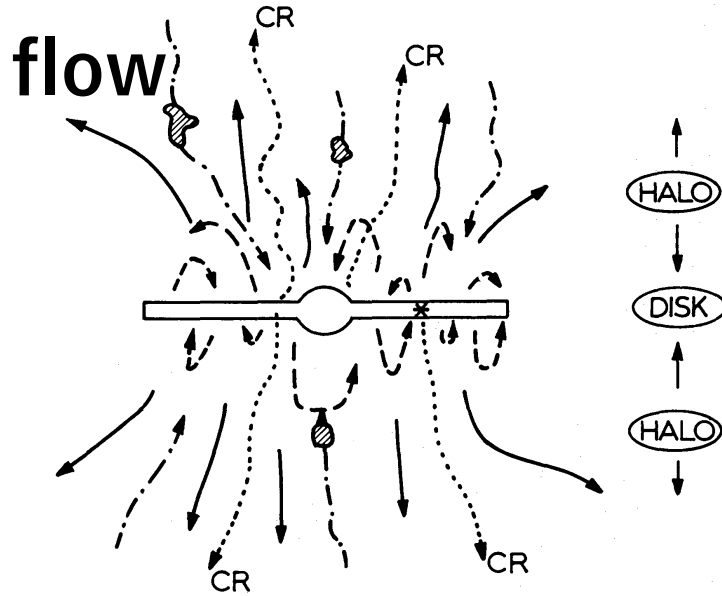
CRs scattered by δB
 $\rightarrow$ Momentum transferred to δB
 $\rightarrow \delta B$ grows
 $\rightarrow$ dissipation of δB
 $\rightarrow$ **Thermal gas heated**

$$\Gamma = |V_A \nabla P_{\text{cr}}| \text{ (erg/cc/s) } \text{ (e.g., Kulsrud 2005)}$$



*Breitschwerdt+91 extended the pioneering work by Ipavich 75, and estimated that the mass loss rate due to the wind is $\sim 1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$.

Outflow Model (SJ & Inutsuka 2022) w/ Radiative cooling & CR diffusion



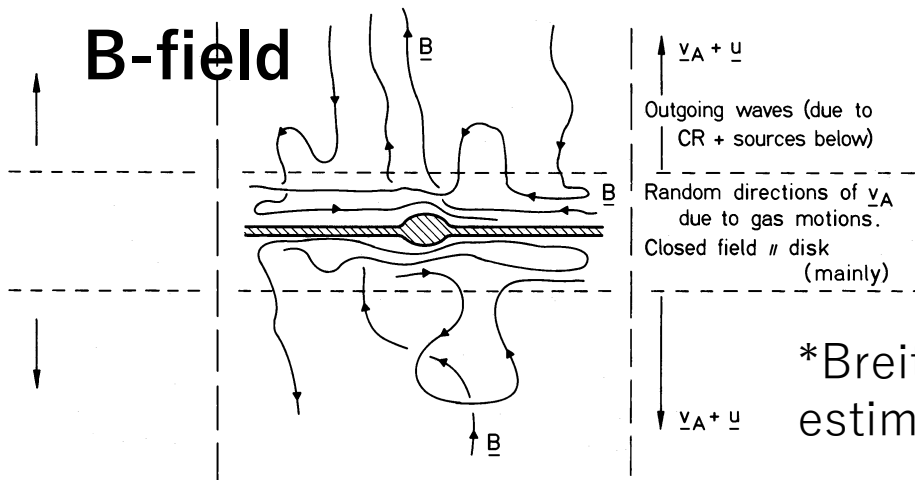
Essence

(Shapiro & Field 76)

Radiative cooling $\rightarrow T < T_{\text{vir}} \rightarrow$ wind never launching
Heating by CRs $\rightarrow$ Comparable with Radiative cooling!

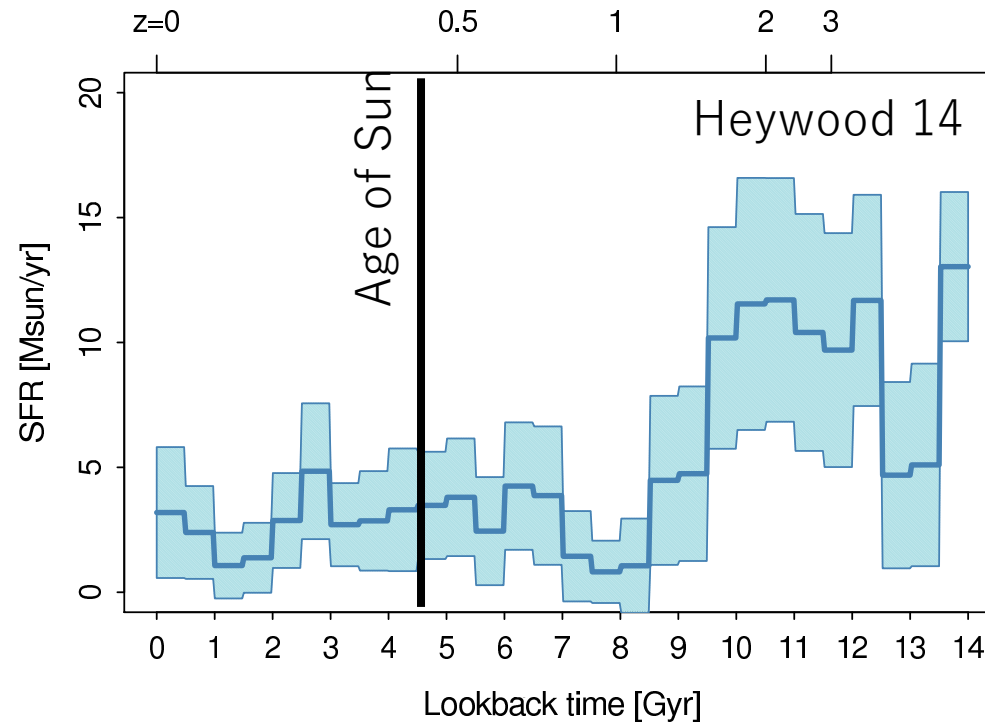
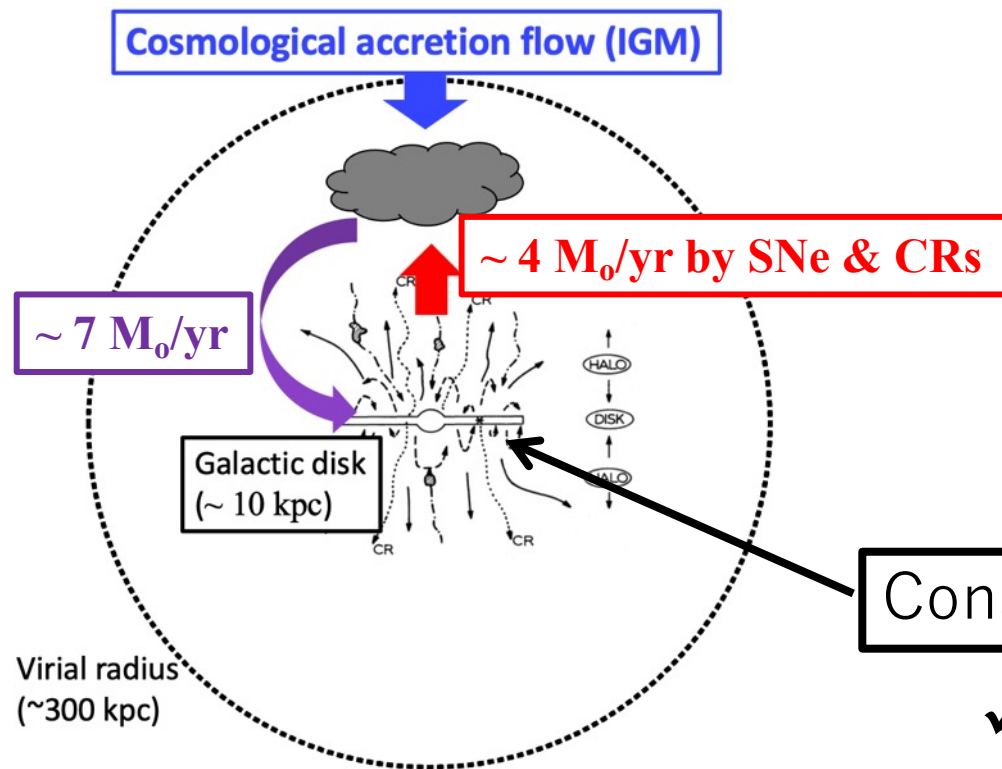
$$\frac{n^2 \Lambda}{Q_w} \simeq 0.91 \left(\frac{n}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right)^{5/2} \left(\frac{B}{1 \text{ } \mu\text{G}} \right)^{-1} \left(\frac{P_{\text{cr}}}{0.3 \text{ eV cm}^{-3}} \right)^{-1} \\ \times \left(\frac{H_{\text{cr}}}{10 \text{ kpc}} \right) \left(\frac{\Lambda}{10^{-22} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}} \right). \quad (20)$$

The reasonable physical parameters result in the comparable heating rate!



*Breitschwerdt+91 extended the pioneering work by Ipavich 75, and estimated that the mass loss rate due to the wind is $\sim 1 M_{\text{sun}}/\text{yr}$.

What is essence?



Consequent star formation at the disk

- ✓ Almost constant SFR
- quasi steady-state
- $\text{SFR} \sim 7 M_{\odot}/\text{yr} - 4 M_{\odot}/\text{yr} \sim 3 M_{\odot}/\text{yr}$

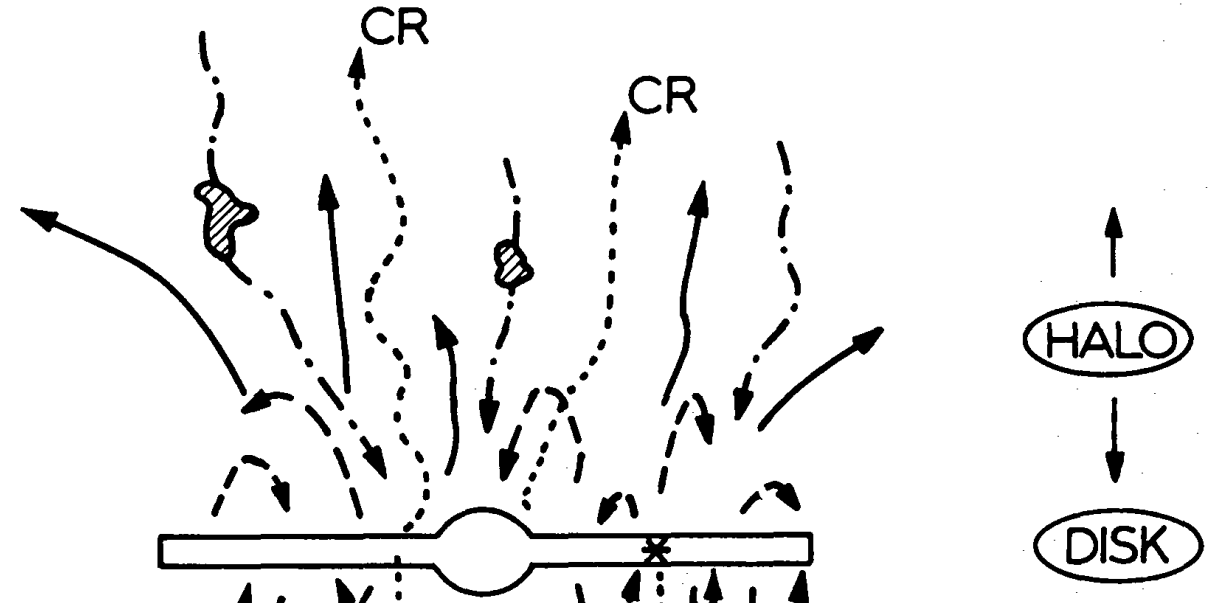
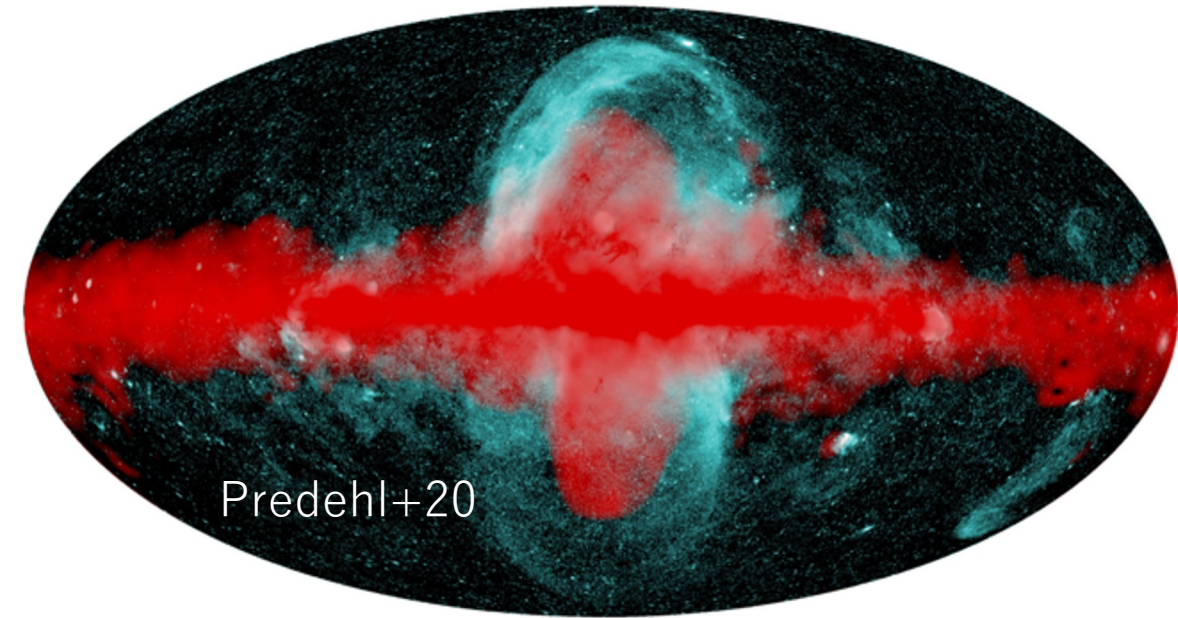
CRは. . .

- 1) 星形成率が『大きくなり過ぎない』ように調整する.
- 2) 円盤部の金属が『溜まらない』ように調整する.

CRが無いと. . .

- 1) haloのガスが全部落ちてきて星形成しまくり, 地球の放射線量が ~ 100 倍に増える. 生命滅亡?
- 2) 惑星・生命の素となる金属量が増える. 銀河に生命が溢れる?

Fermi Bubble & eROSITA Bubble

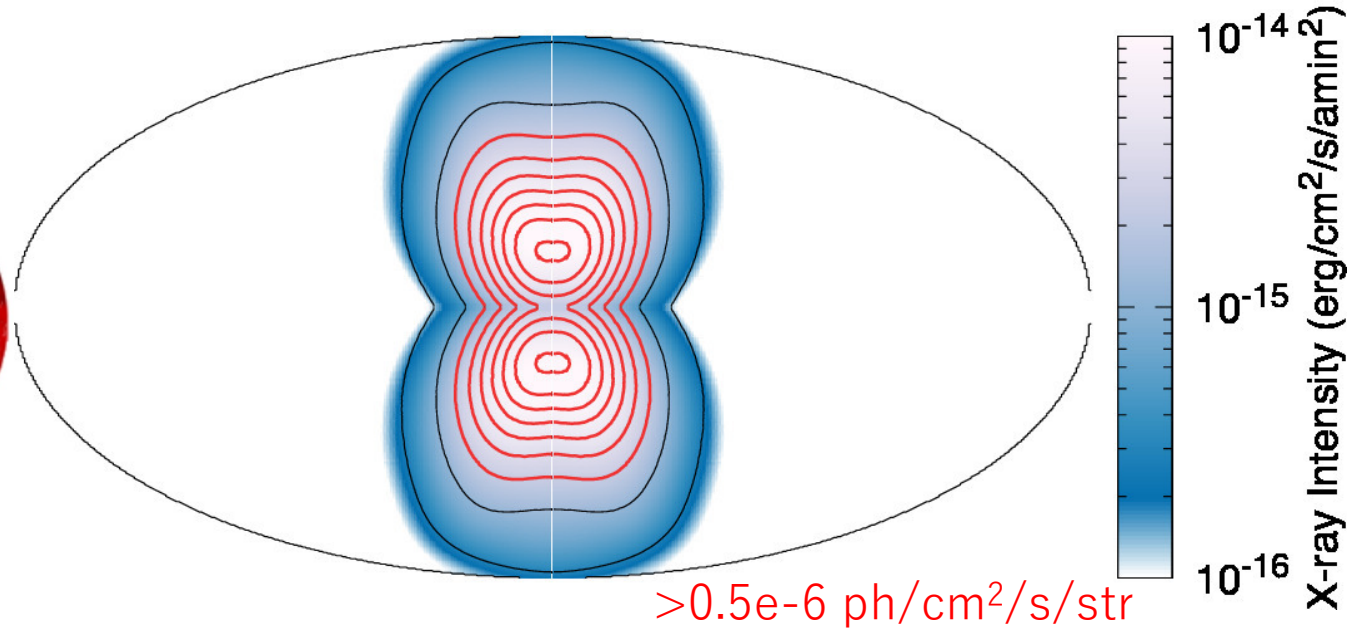
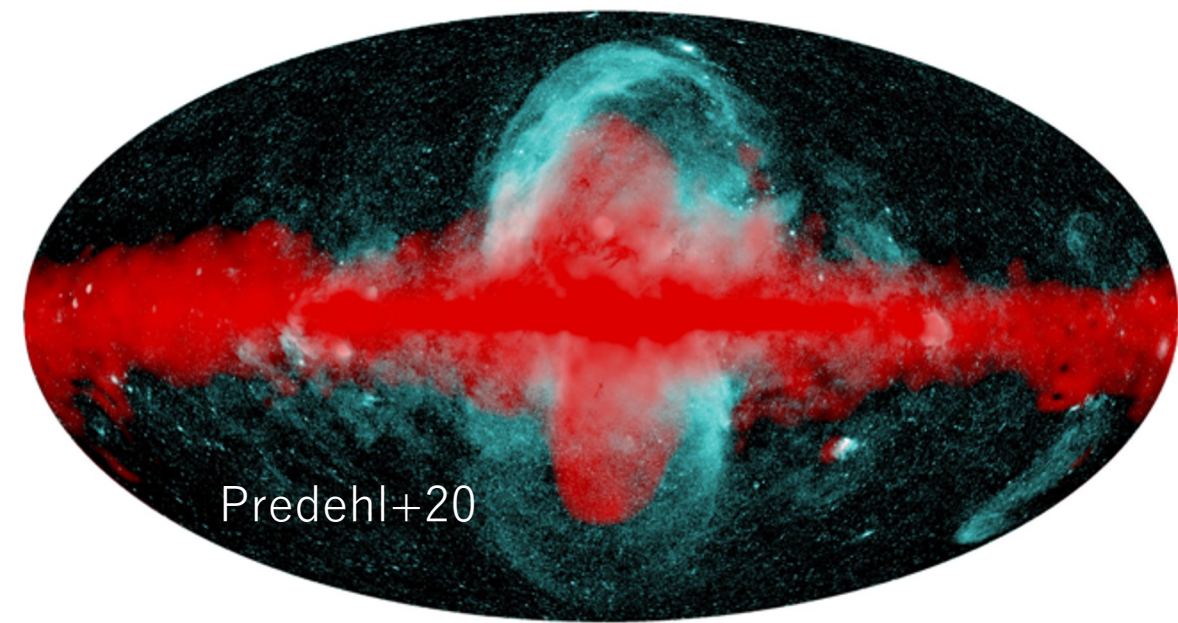


Outflow:

$T \sim 0.1 \text{ keV}$ ($\sim$ virial temp. of the MW)

→ **eROSITA bubble** is consistent with this expectation.

Galactic Wind Scenario (SJ&Asano 24)



銀河進化を説明するだけの銀河風がCRで駆動したと考えるだけでも、Fermi bubbleやeROSITA bubbleを再現しうる。

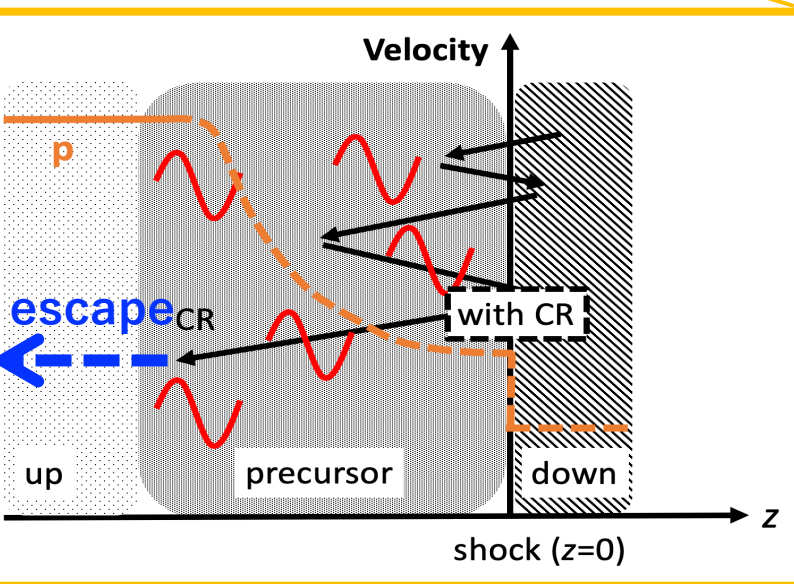
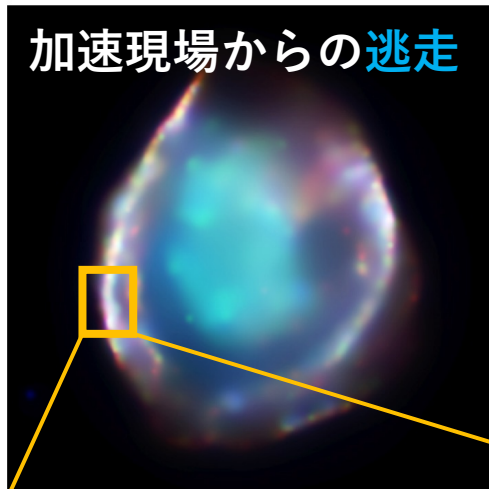
→ガンマ線やX線観測は、高エネルギー宇宙物理学だけでなく、『宇宙の星形成史』も研究対象にできる。

*Hadronic γ -ray scenario $p_{cr} + p_{gas} \rightarrow 2\gamma, \nu$

逃走宇宙線との闘争

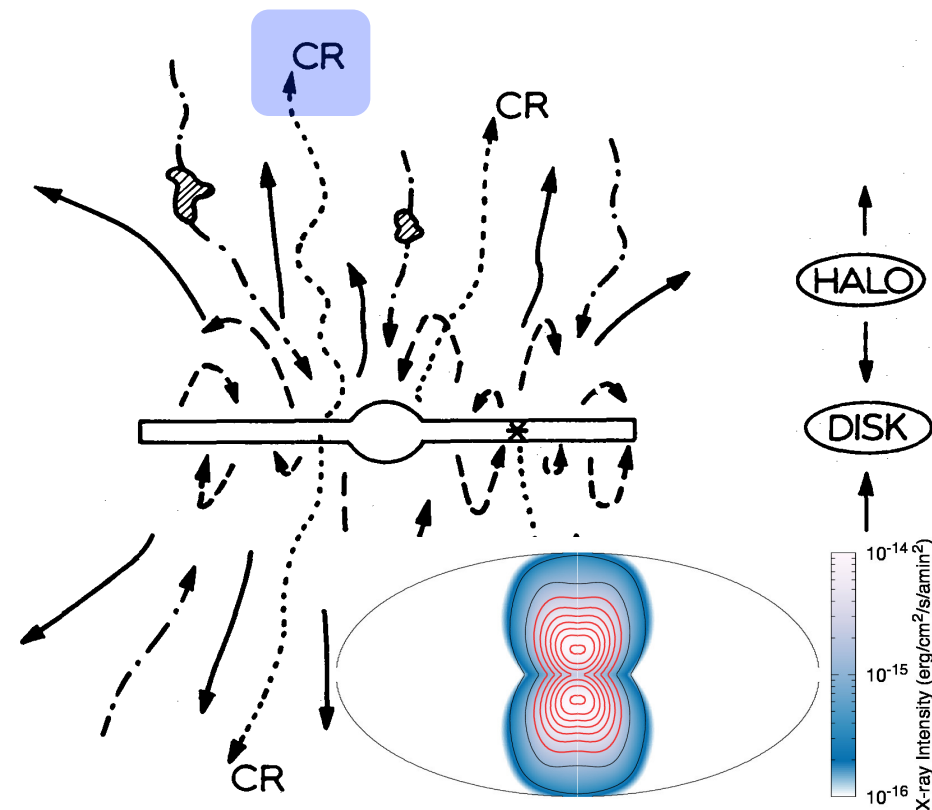
~1 pc

加速現場からの逃走

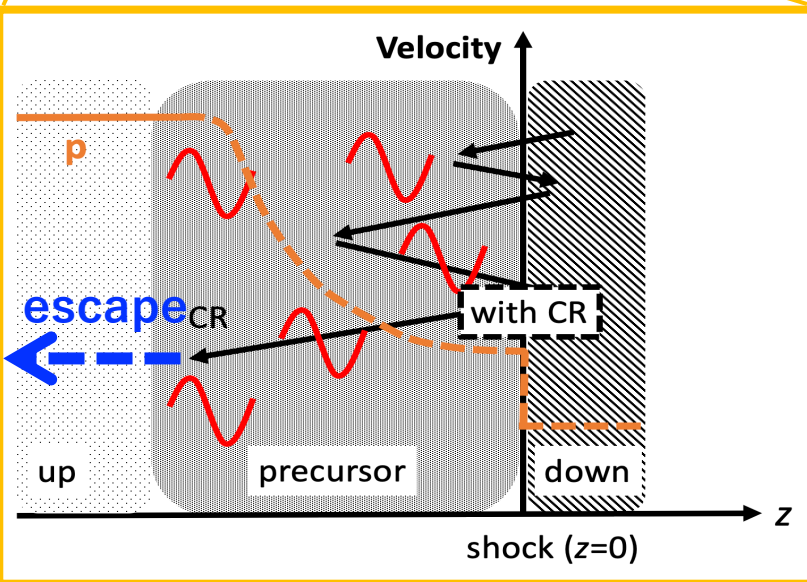


~10 kpc

銀河系からの逃走



加速現場からの**逃走**

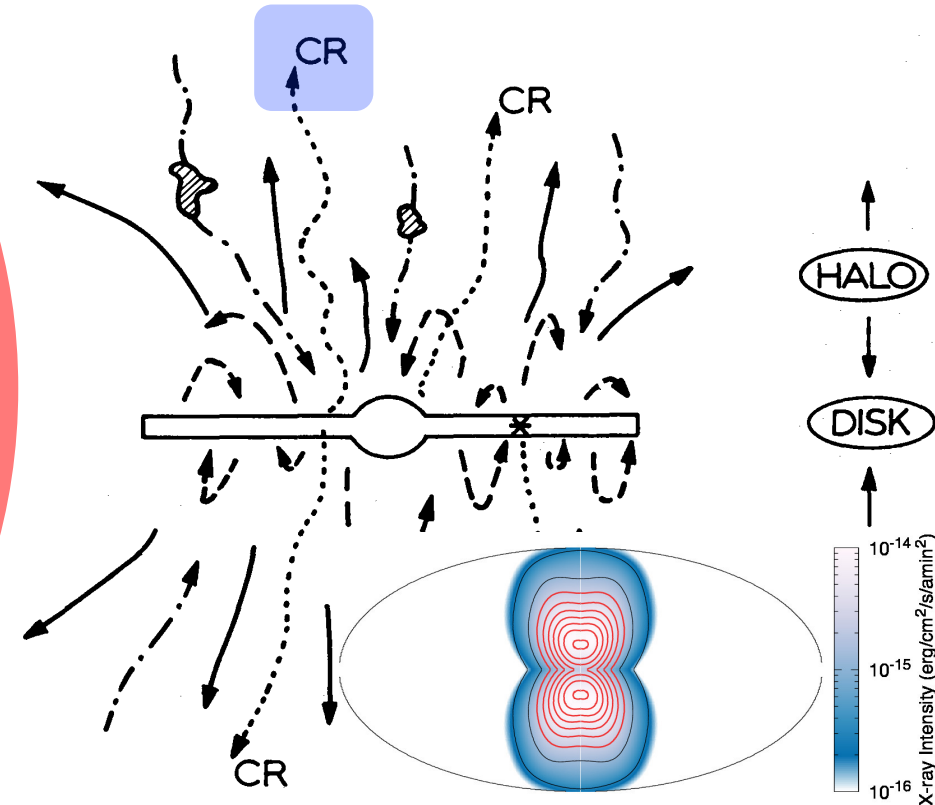


逃走宇宙線との闘争

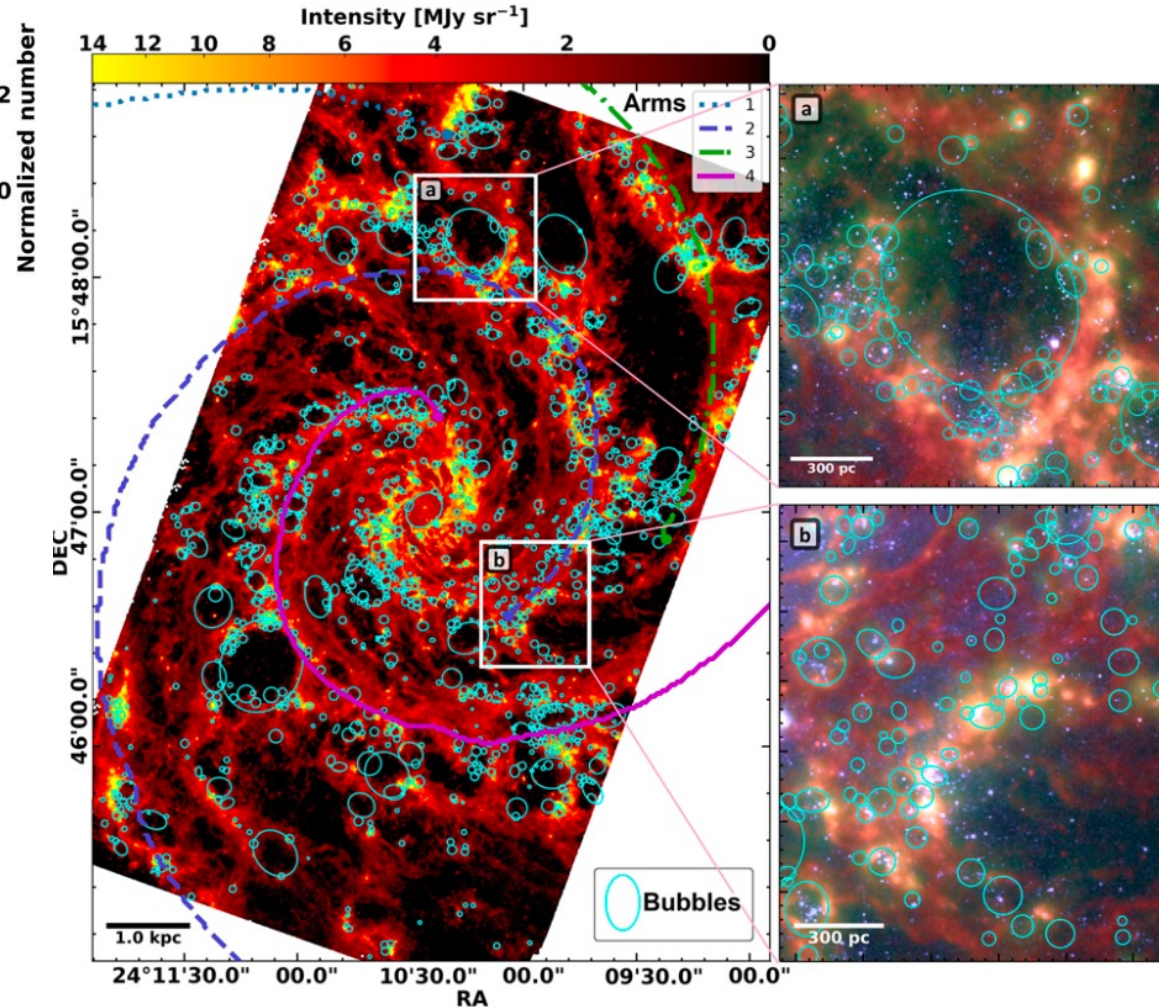
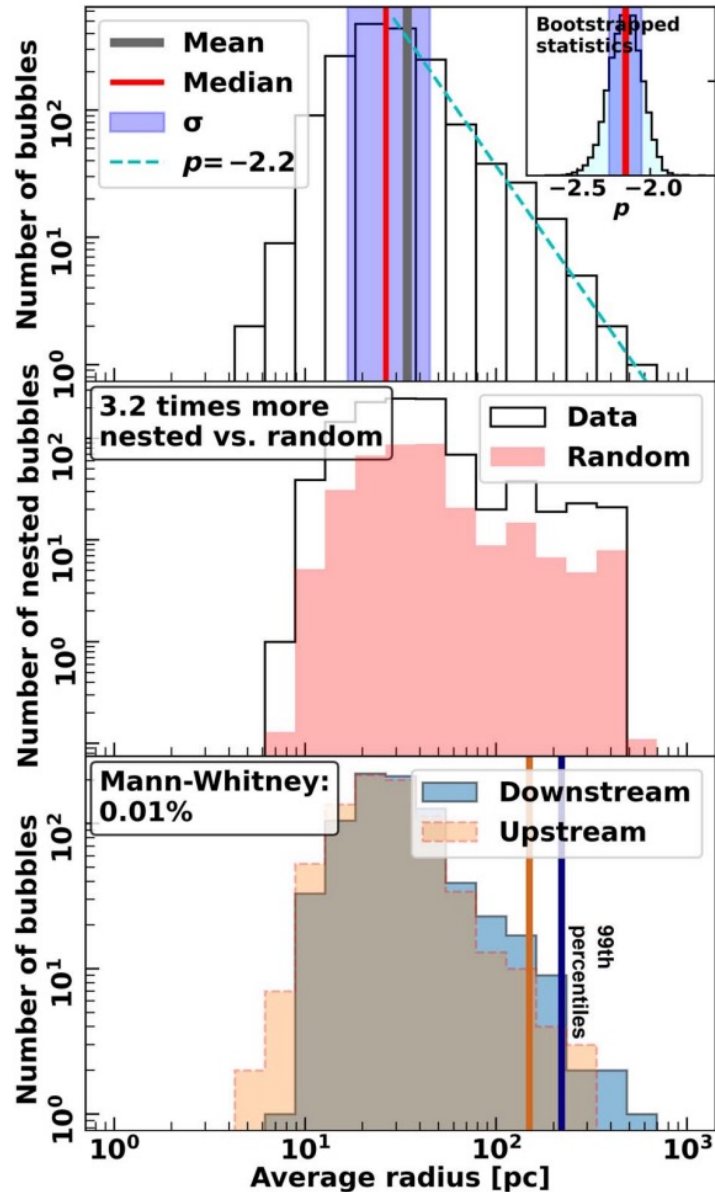


銀河系からの逃走

偉い先行研究
「拡散するん
ちゃう？知ら
んけど。」



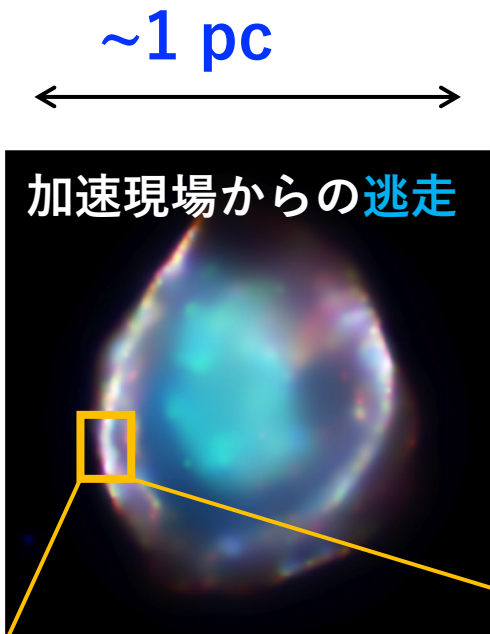
JWST bubbles: **Hints** for 10 pc–1 kpc physics/phenomena?



バブルを縁取るように**星形成領域**が分布している。
Inutsuka+15の星形成・物質循環描像と整合的。

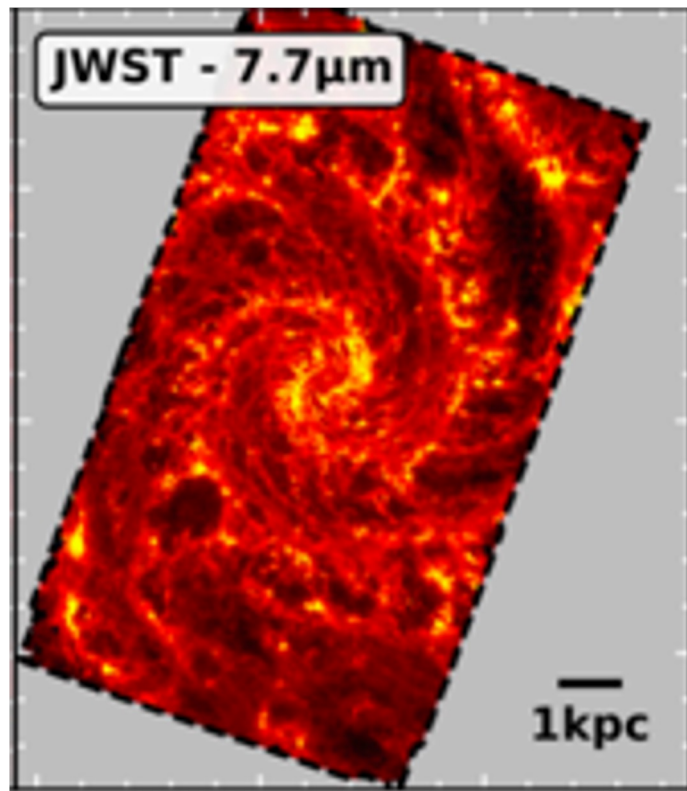
NGC 628: SFR~1.7 Mo/yr (MWとコンパラ)
> 3000個のバブルが見つかってはいる。この
サイズ分布は説明されていない

逃走宇宙線との闘争



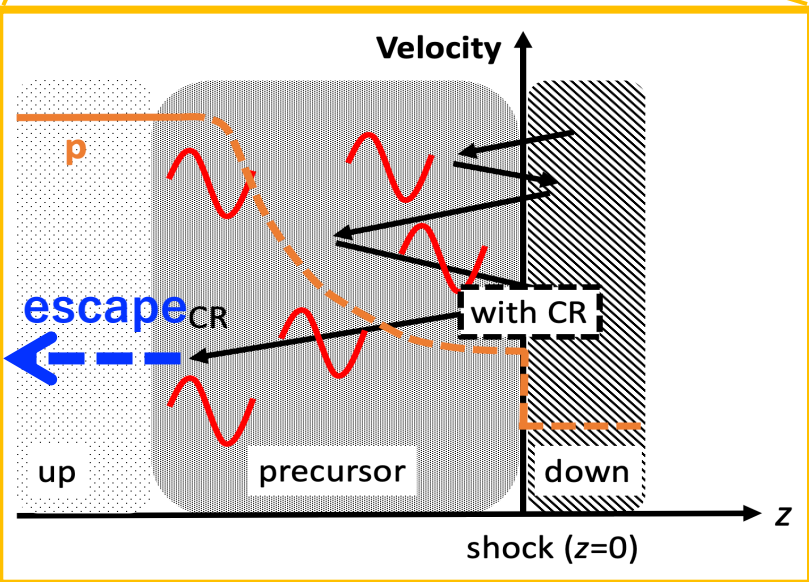
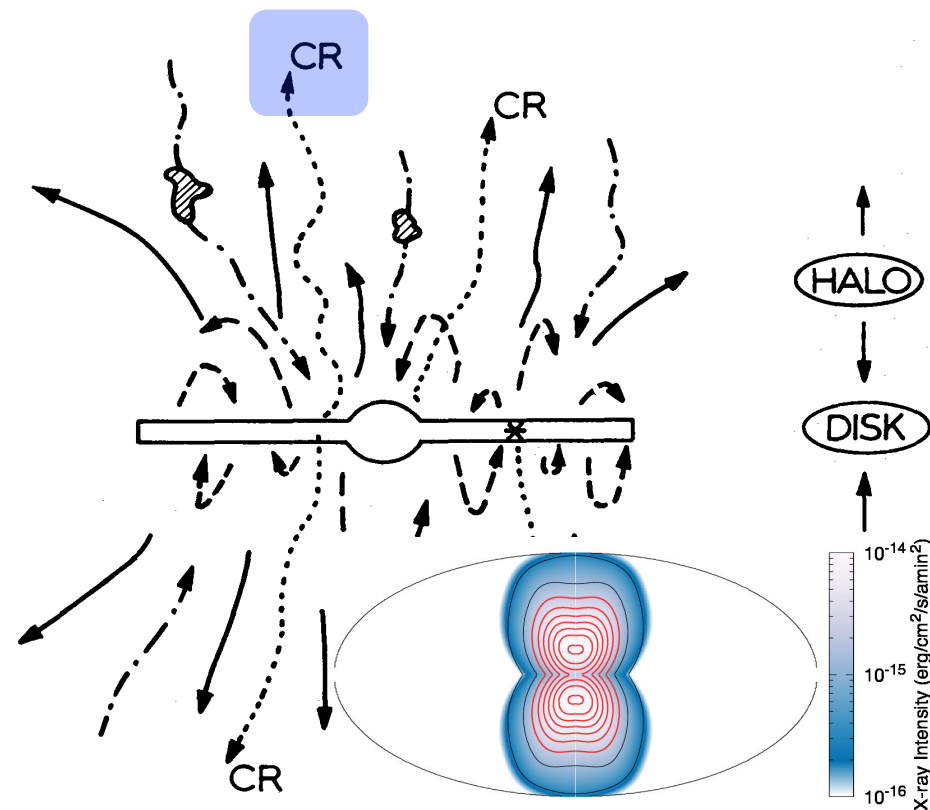
ISM中の輸送・伝搬

泡だらけ $\sim 10 \text{ pc} - 1 \text{ kpc}$



$\sim 10 \text{ kpc}$

銀河系からの逃走



Zucker et al. 2022

Solar system

Local bubble around the solar system

我々はLocal Bubbleという*泡*の中で暮らしている。
→一般的には、複数回のSNeで形成されたと考えられている。

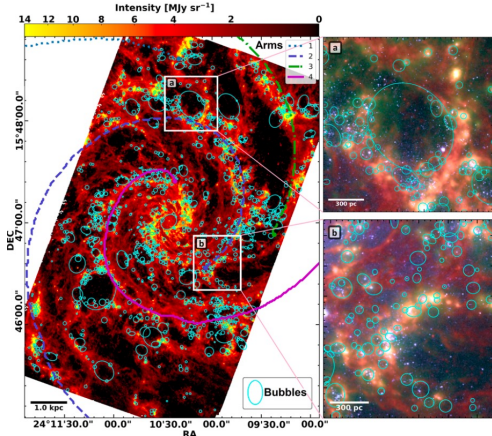
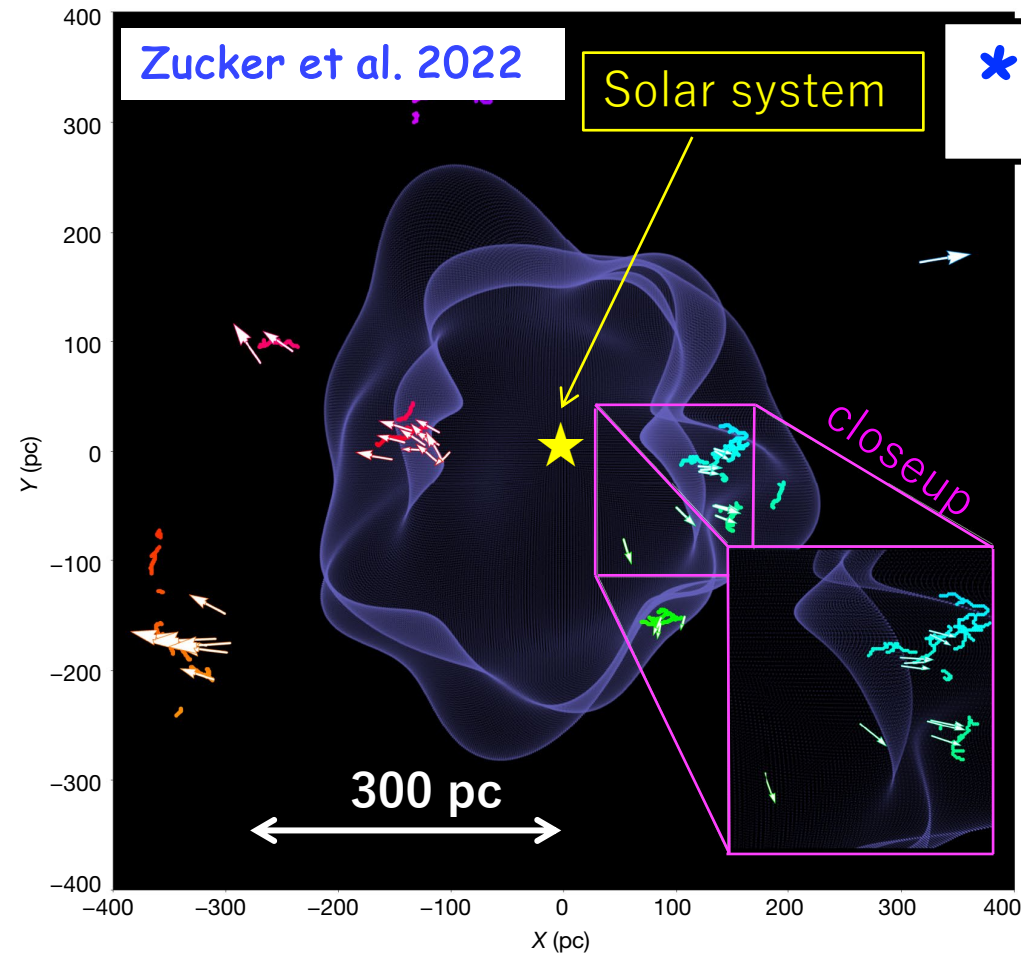
・宇宙線・ガンマ線？

星形成は~1-10 Myrで進行する。

宇宙線の銀河円盤部平均滞在時間は~1-10 Myr.

宇宙線の組成等への影響は？

実際の（近傍）星形成史は？

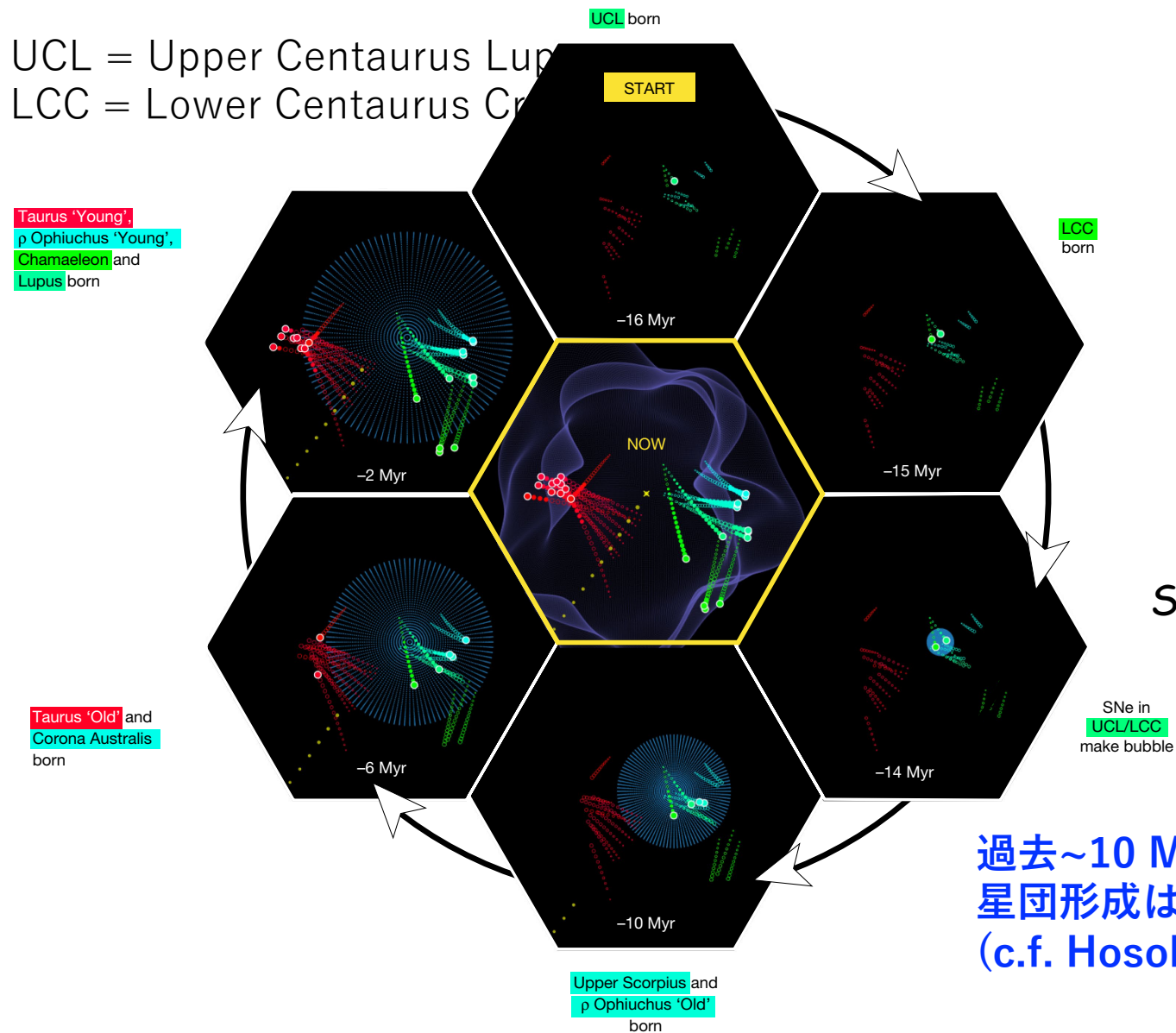


* 300 pcというのは、銀河円盤の厚みと同程度。

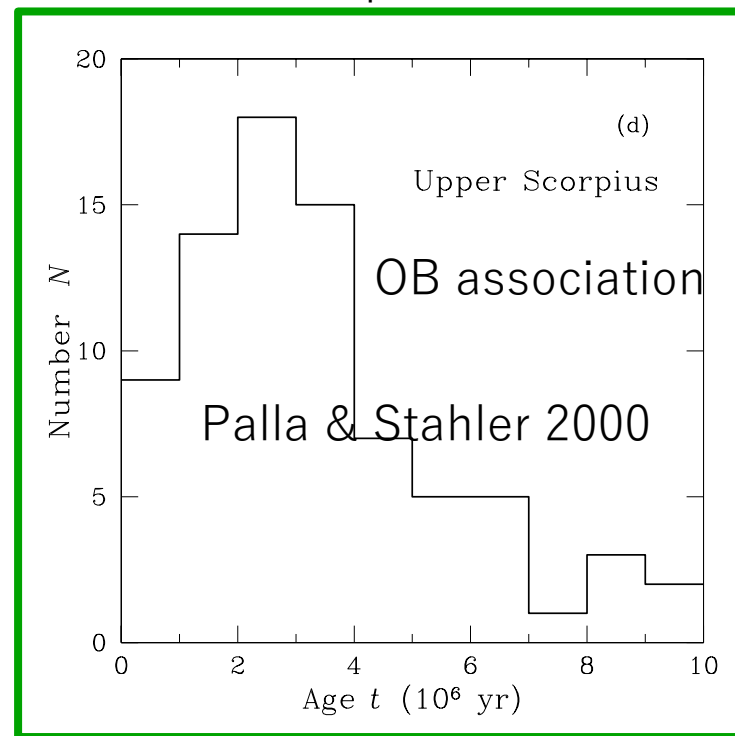
~1-10 Myrかけないと円盤上空方向に逃走できないなら、『逃げ遅れている』奴らがその辺にそれなりに居らっしゃる？

Star formation near the Sun is driven by expansion of the Local Bubble

UCL = Upper Centaurus Lupus
LCC = Lower Centaurus Crux



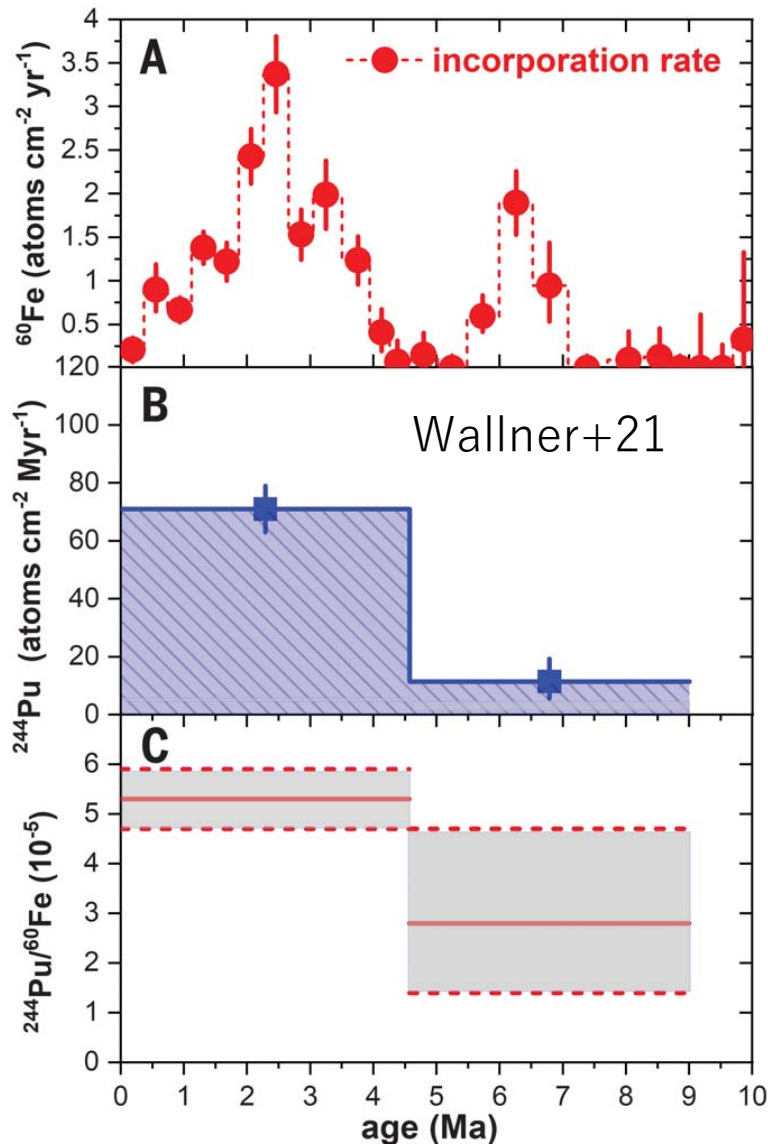
example



Salpeter IMFだと、~50-100個に1つくらい大質量星

過去~10 Myr以内に、星団形成が複数回起こった事を示唆する。
星団形成は大質量星の形成により終了する？
(c.f. Hosokawa & Inutsuka 07, Inutsuka+12)

Hint 1: 短寿命核子 ^{60}Fe (half-life, 2.6 Myr) @ Pacific Ocean crust



~10 Myr前に ^{60}Fe が太平洋沖に飛来した?

(*Zucker氏の講演では"consistent"と喜んでいた)

→それなりの注入があったと見なすのは良さそう.

→CR輸送が気になる

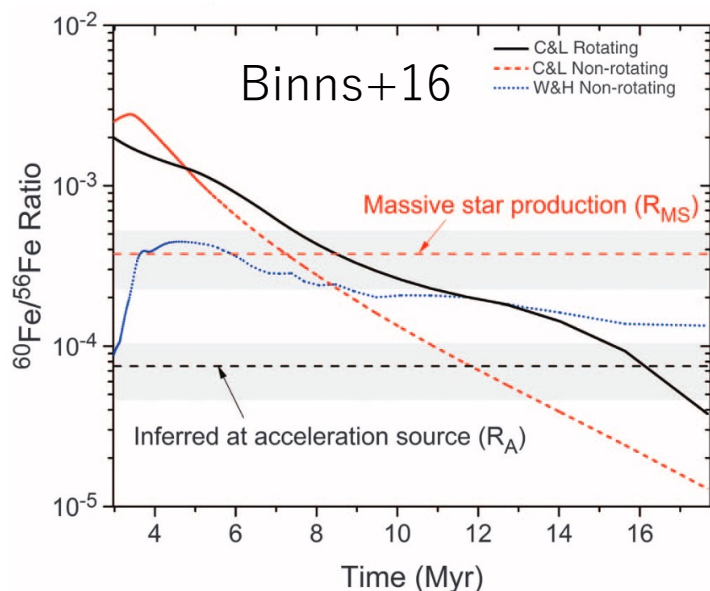
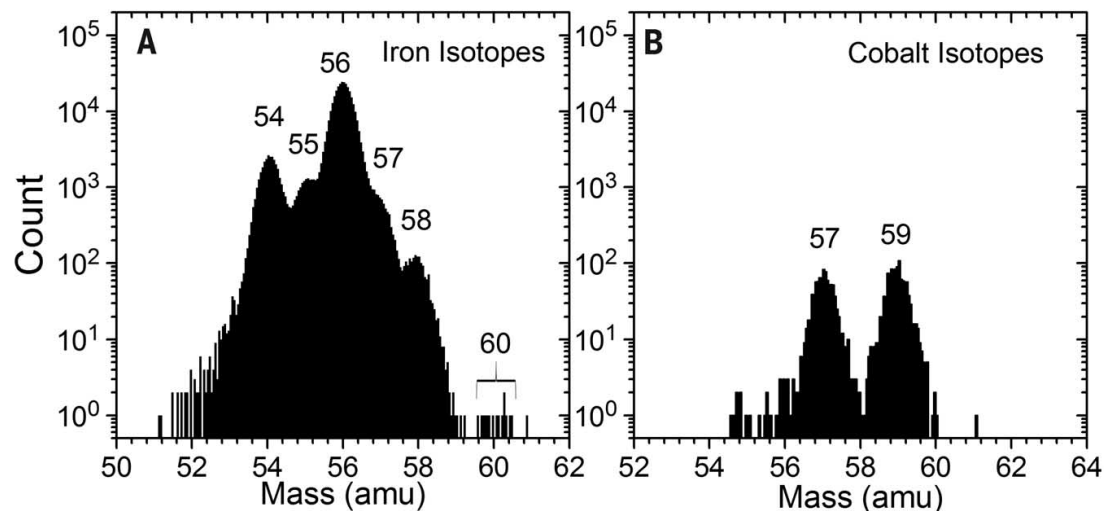
CRは~ 1-10 Myrくらいdiskに留まると推定されている.

我々が現在観測しているCRのうち,

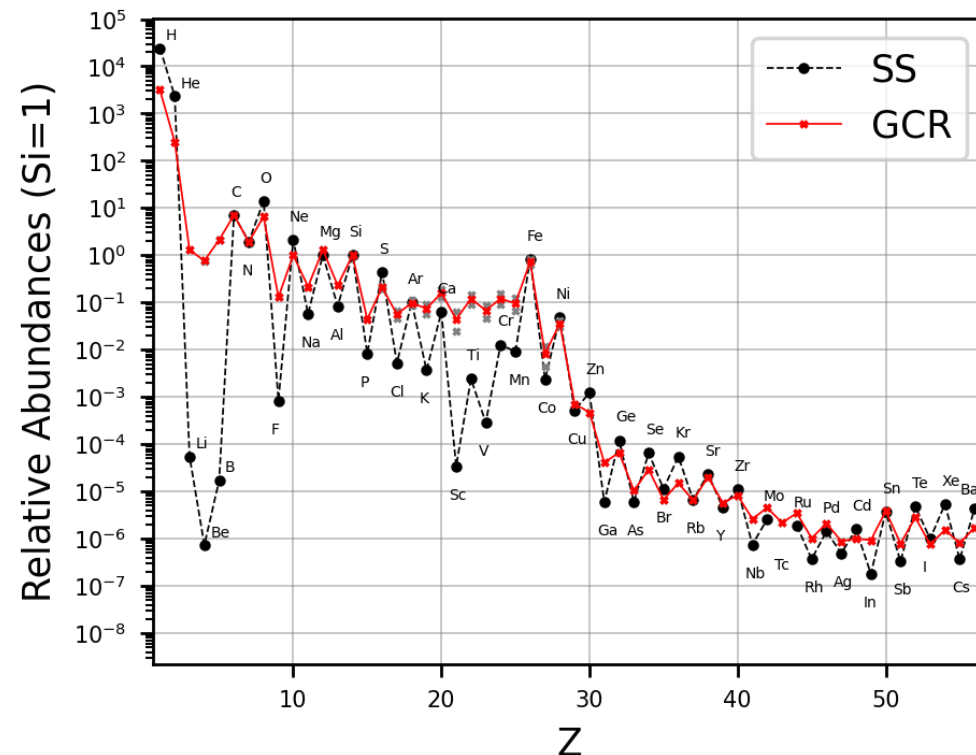
1. 近所の星形成由来のものは結構ある?
2. それとも, さっさと逃げてマイナー?

Cosmic Rays

Hint 2: 宇宙線短寿命核子 ^{60}Fe (half-life, 2.6 Myr)



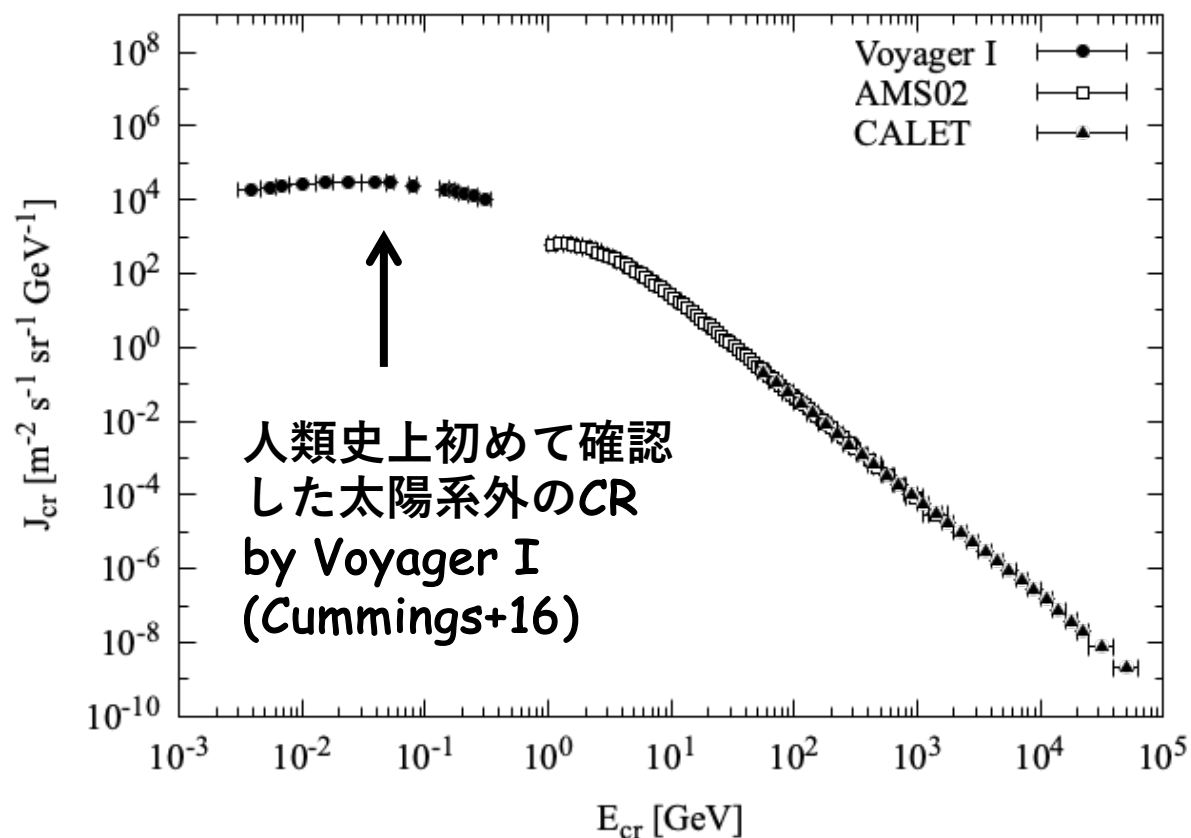
CALET collabo.



現在も ^{60}Fe が**宇宙線**として観測されている。
 ^{59}Ni の観測とOB associationのモデリングから、**元素合成と加速の時間差が**
 $100 \text{ kyr} < T < \text{several Myr}$
 であって欲しいらしい。
 早すぎてもダメ？ ^{59}Ni half-life, 76 kyr

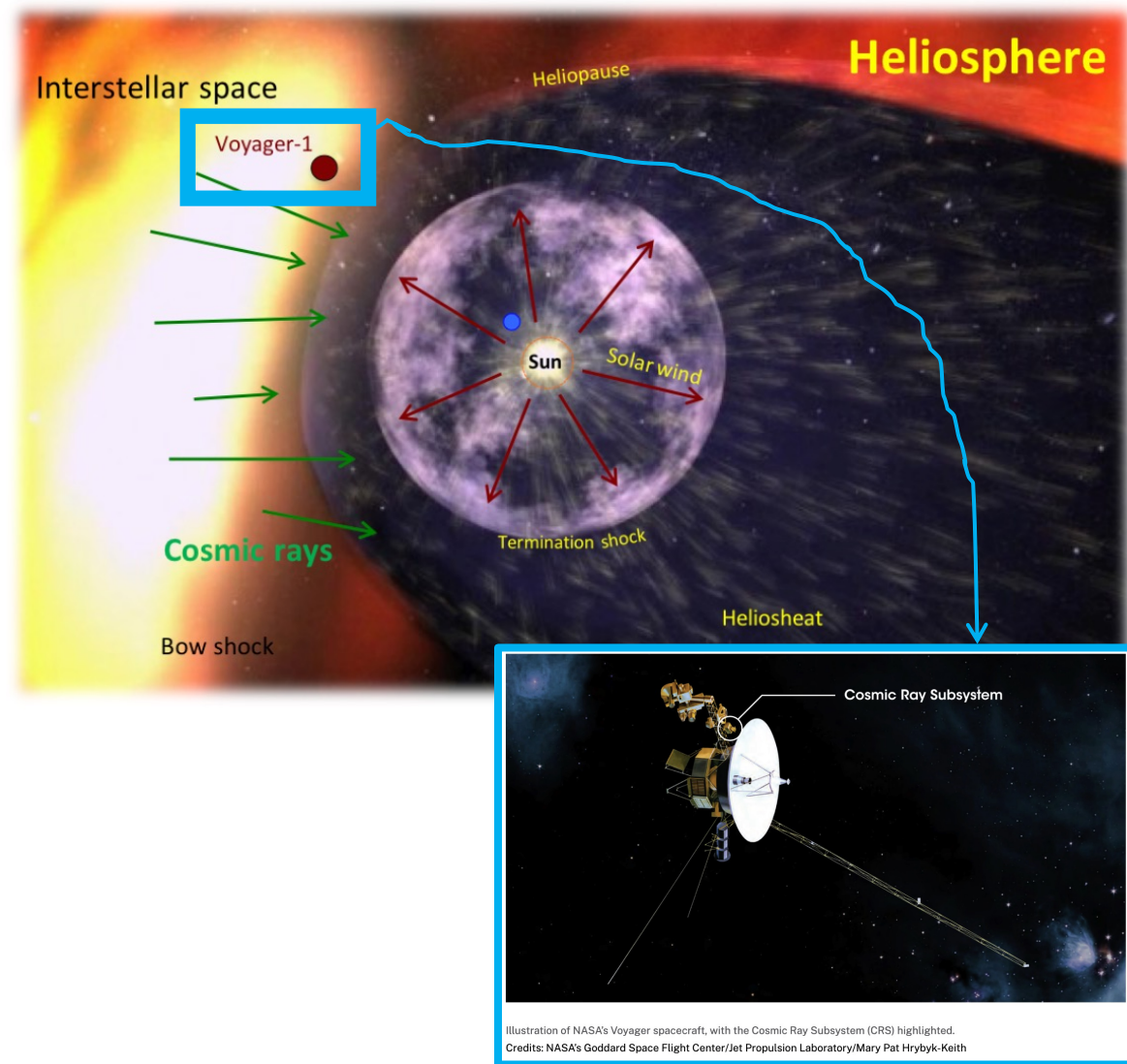
Cosmic Rays

Hint 3: Low-Energy CR (↓ protons)



Voyager Iが検出した <1 GeVのCR fluxは、多い？ 少ない？
少なくとも地球で測ったCRのエネルギー密度 ~ 1 eV/ccは、ISMの平均値と同程度。
→ CRと背景流体を同時に考える*CR-hydro*で計算する (New!)

<https://matisse.web.cern.ch/science.html>



Cosmic Ray Hydrodynamics

Hydrodynamics (thermal plasma)

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r^2} (r^2 \rho_g v_g) = 0, \quad (1)$$

$$\rho_g \left[\frac{\partial v_g}{\partial t} + v_g \frac{\partial v_g}{\partial r} \right] = - \frac{\partial}{\partial r} (P_g + P_{\text{cr}}), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho_g v_g^2 + \varepsilon_g \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r^2} \left[\left(\frac{1}{2} \rho_g v_g^2 + P_g + \varepsilon_g \right) v_g \right] \\ &= n_g (\Gamma_g - n_g \Lambda) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \mathcal{K} \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) \end{aligned}$$

$$-v_g \frac{\partial P_{\text{cr}}}{\partial r} + \int p v f \left(\frac{dp}{dt} \right)_C dp + |\mathcal{V}_A \frac{\partial \varepsilon_{\text{cr}}}{\partial r}|, \quad (3)$$

$$P_g = (\gamma_g - 1) \varepsilon_g = n_g k T_g = \frac{\rho_g}{\bar{m}} k T_g, \quad \gamma_g = \frac{5}{3}, \quad (4)$$

Cosmic Ray Transport

$$\begin{aligned} & \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(v_g f - \mathcal{D} \frac{\partial f}{\partial r} \right) \\ &= \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r^2 v_g}{3} \right) \frac{\partial f}{\partial p} - \frac{\partial}{\partial p} \left[f \left(\frac{dp}{dt} \right)_C \right] - |\mathcal{V}_A \frac{\partial f}{\partial r}|, \end{aligned} \quad (5)$$

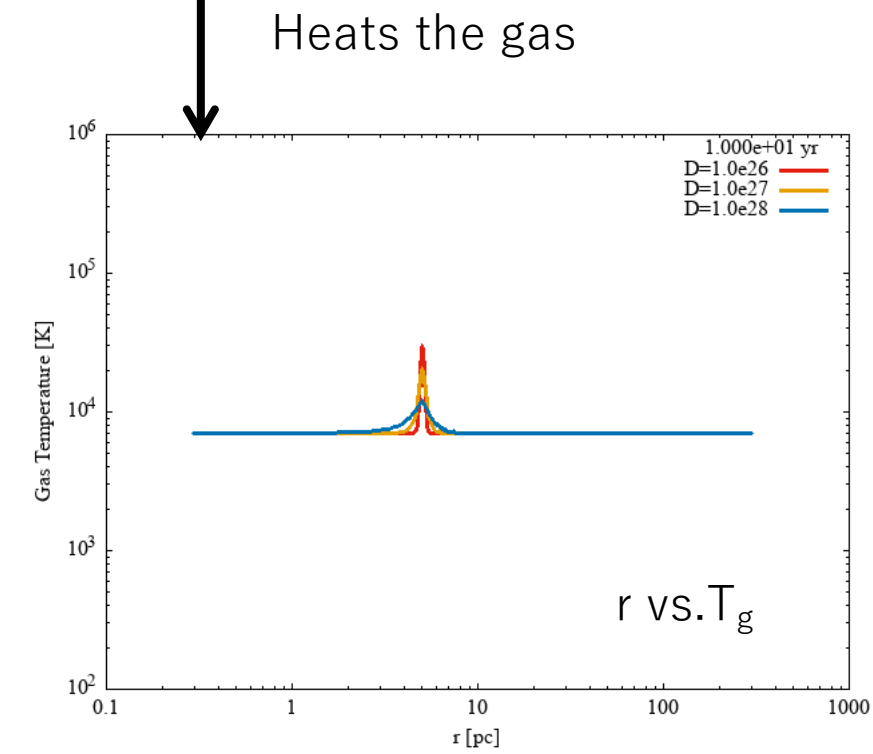
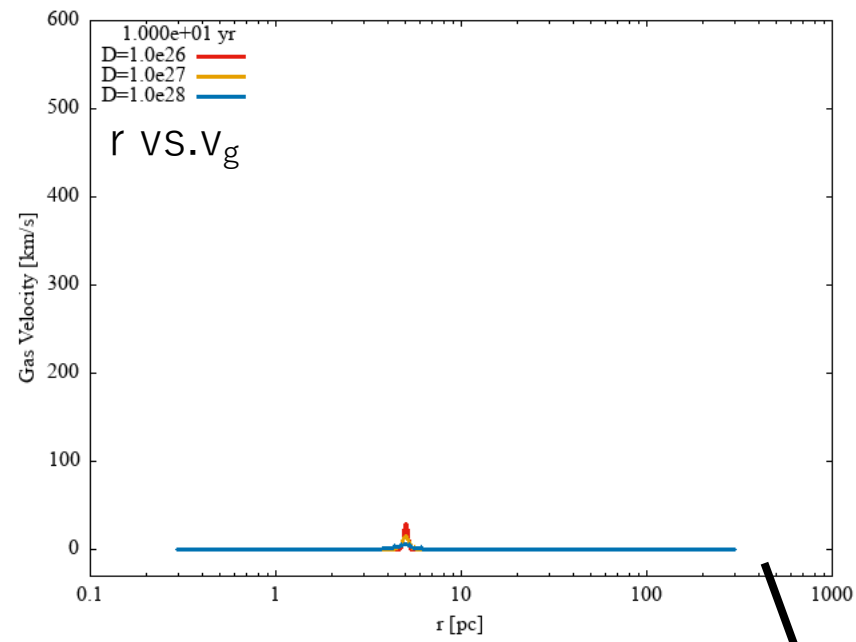
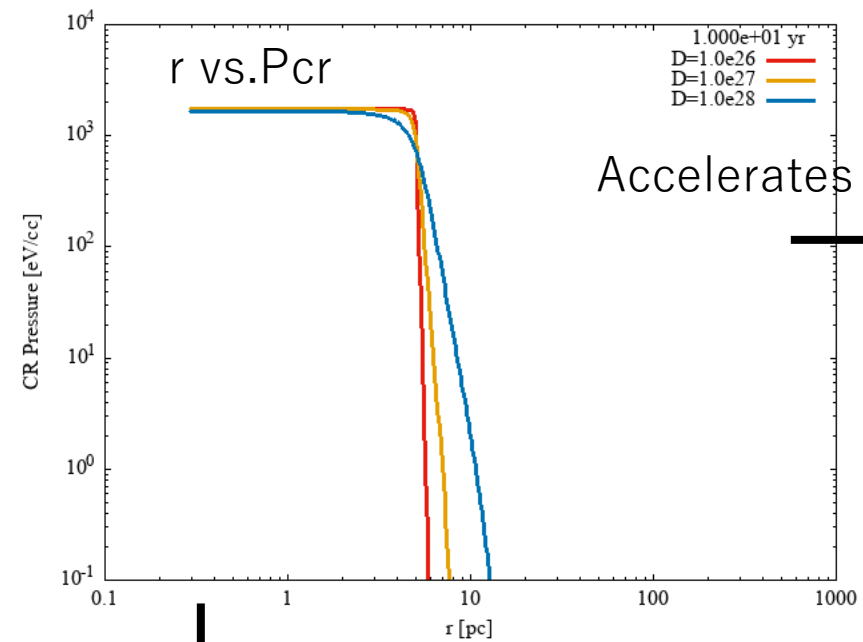
$$\varepsilon_{\text{cr}} = \int \epsilon f dp, \quad \epsilon(p) = \sqrt{(m_p c^2)^2 + (pc)^2} - m_p c^2, \quad (6)$$

$$P_{\text{cr}} = \int \frac{p v}{3} f dp, \quad v(p) = \frac{pc^2}{\epsilon(p) + m_p c^2}. \quad (7)$$

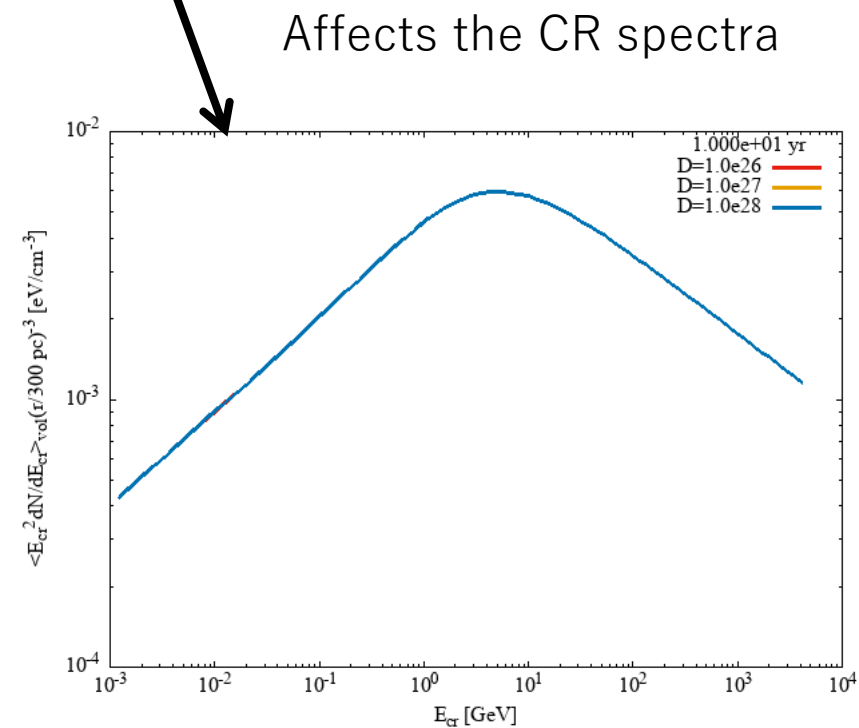
流体とCRを同時に解いて、非線形効果やガスの冷却・熱伝導など諸々全部取り扱い、
銀河系滞在時間~10 Myrの進化を追跡する。

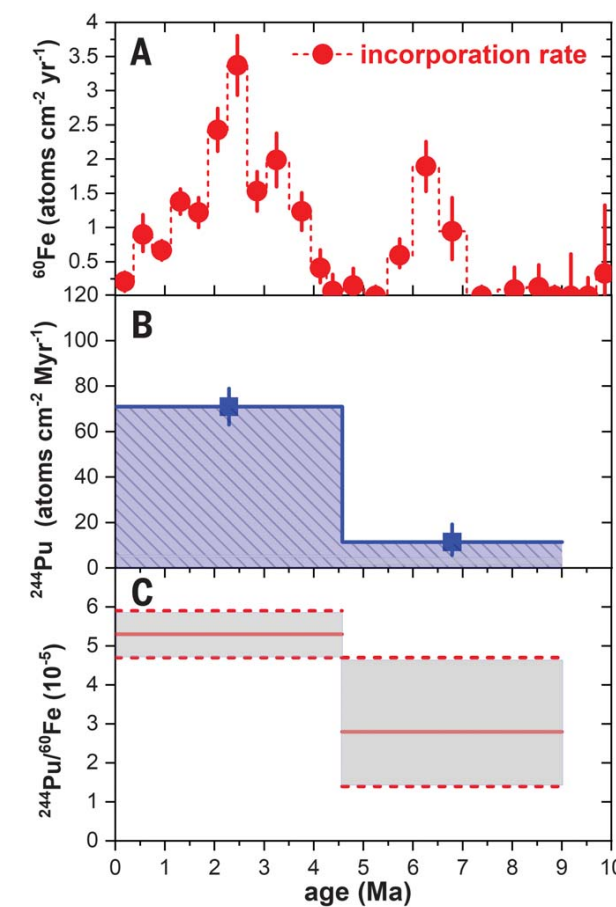
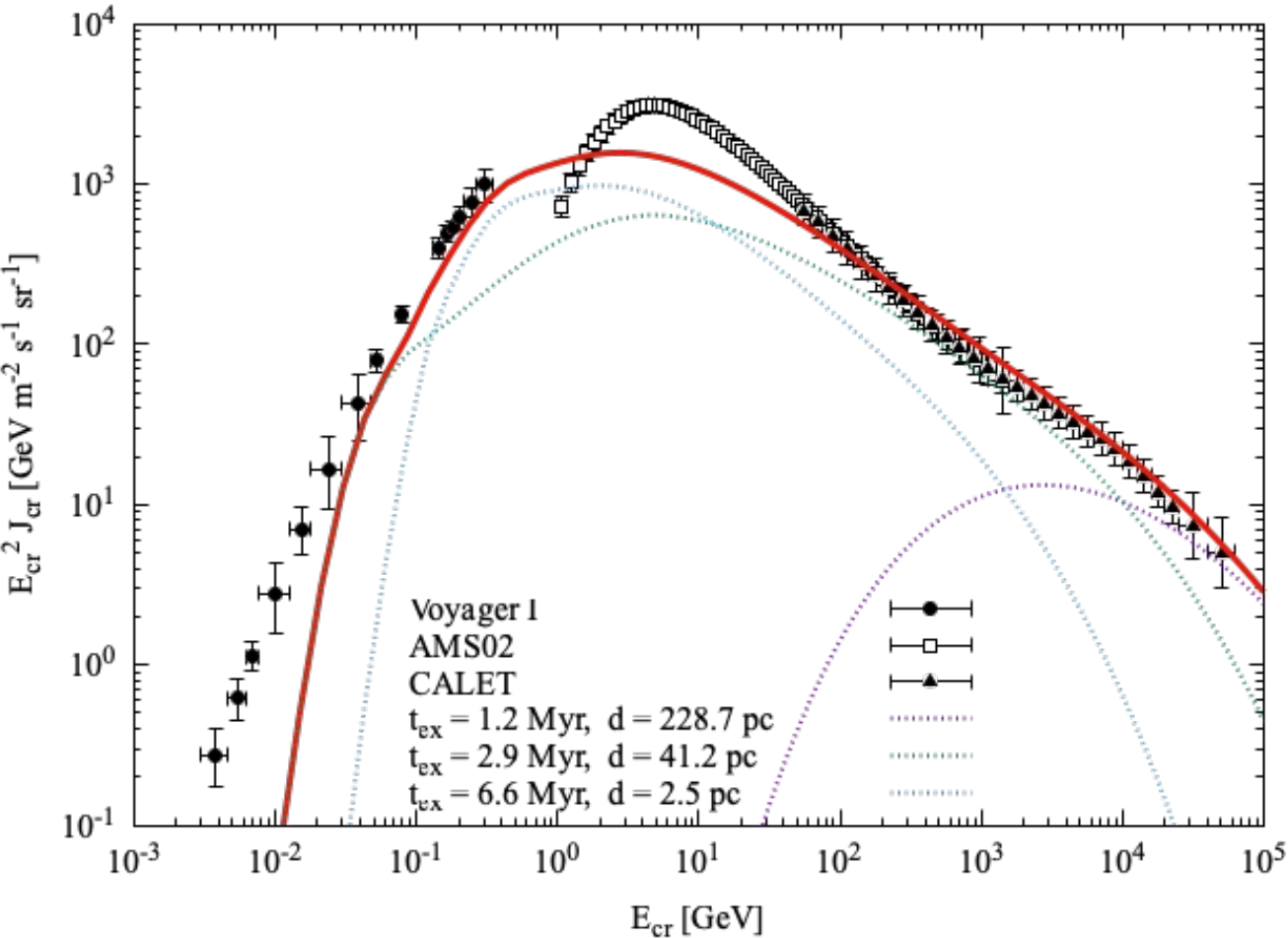
* CR分布関数を解くのが特に新しい。

* 空間1次元にして必要な解像度を確保した。



Consistent with
the local bubble
temperature (10^6 K)

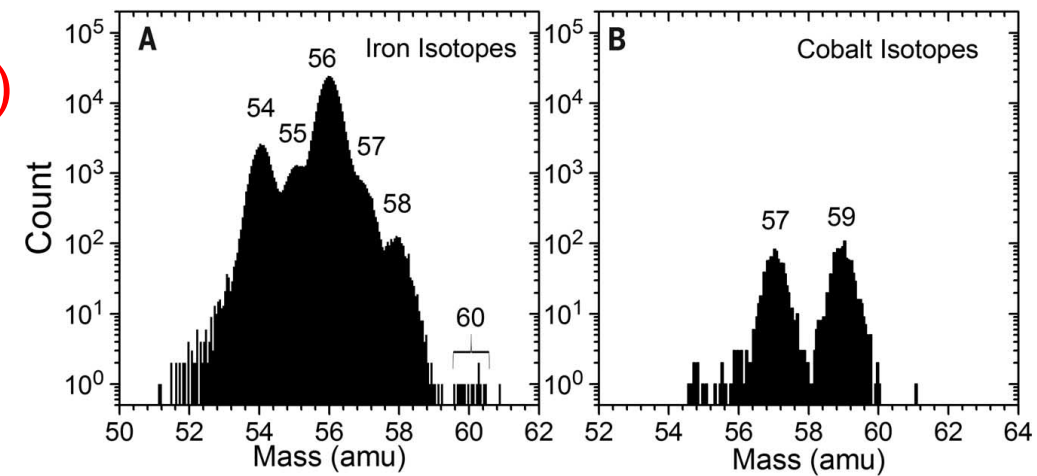




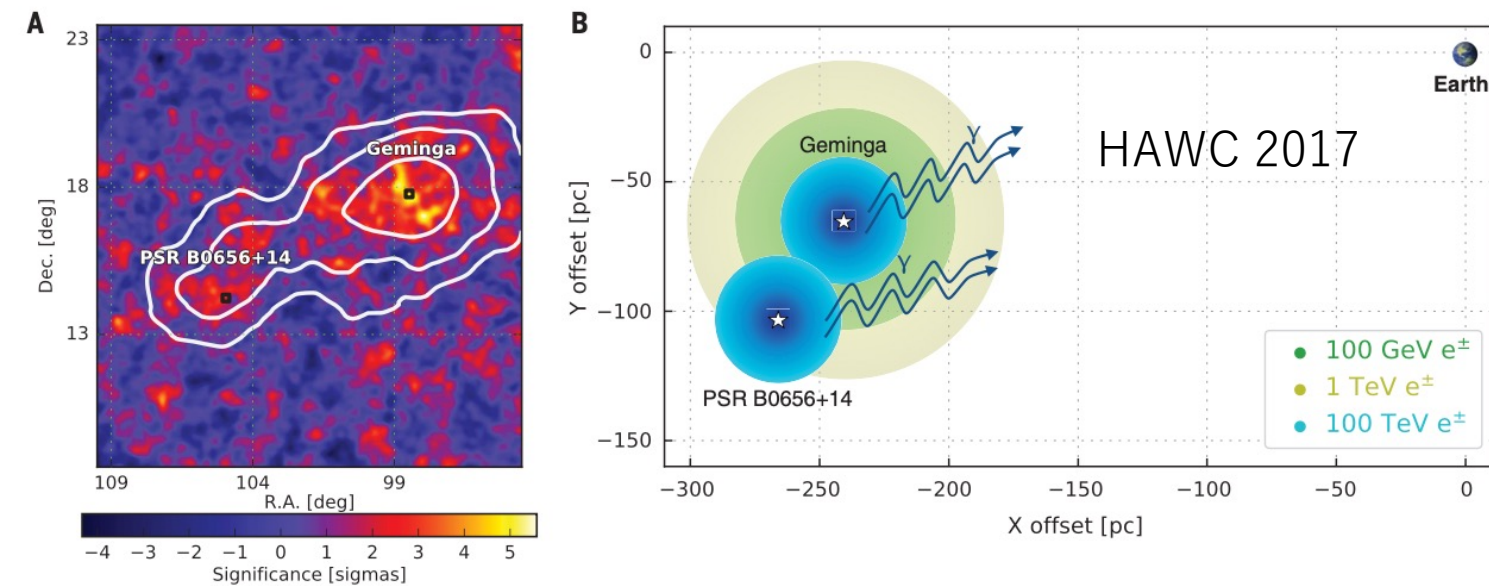
~2-4 Myrと~6-7 Myr
前に近傍でSNが起きた
と思われる。

Hint 2: 宇宙線短寿命核子 ^{60}Fe (half-life, 2.6 Myr)

CR flux@ ($t=2\text{Myr}$, $r=100\text{ pc}$)
 $\rightarrow D \sim 10^{26}\text{ cm}^2/\text{s}$ はちょっと小さい?
 (*TeV halo*では, こんなもん)



TeV halo: PWNe周辺の拡散係数小さい？問題



Giacinti+20: 他のPWNeでも小さい
CR energy density $\sim$ sub eV/ccでも小さい

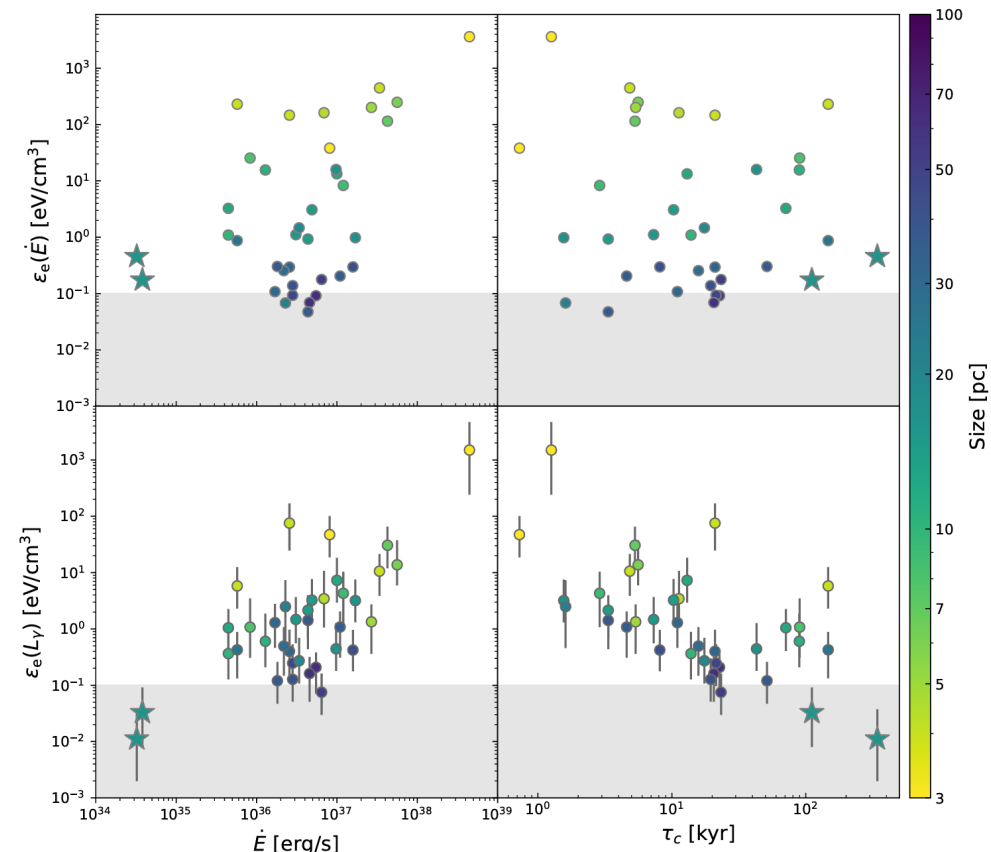
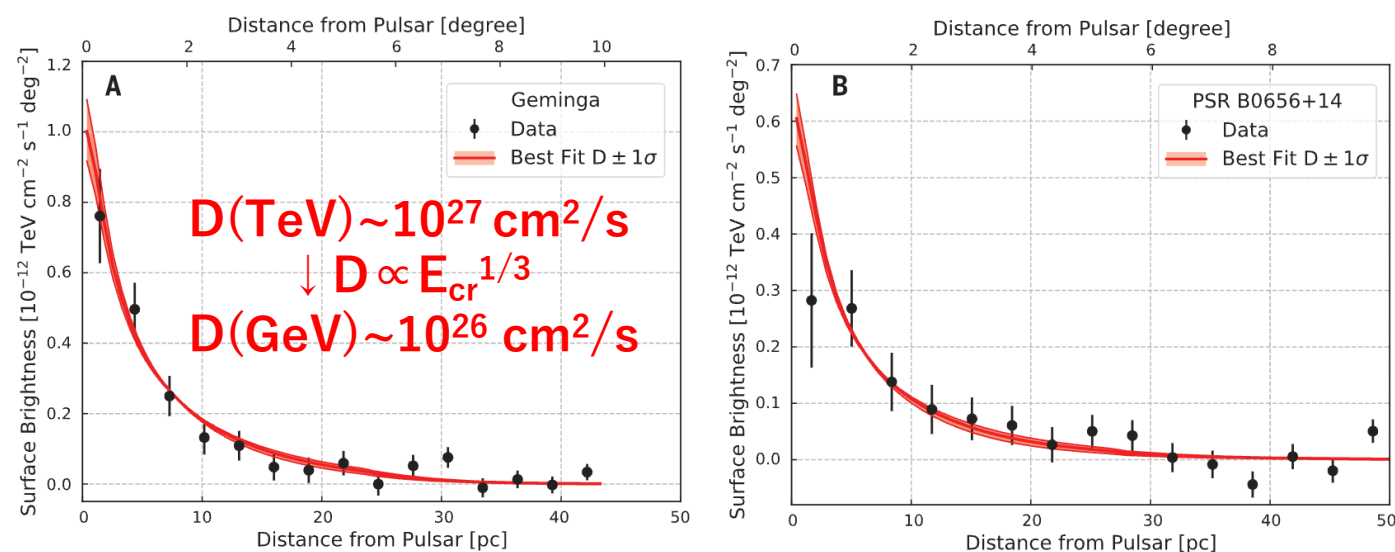
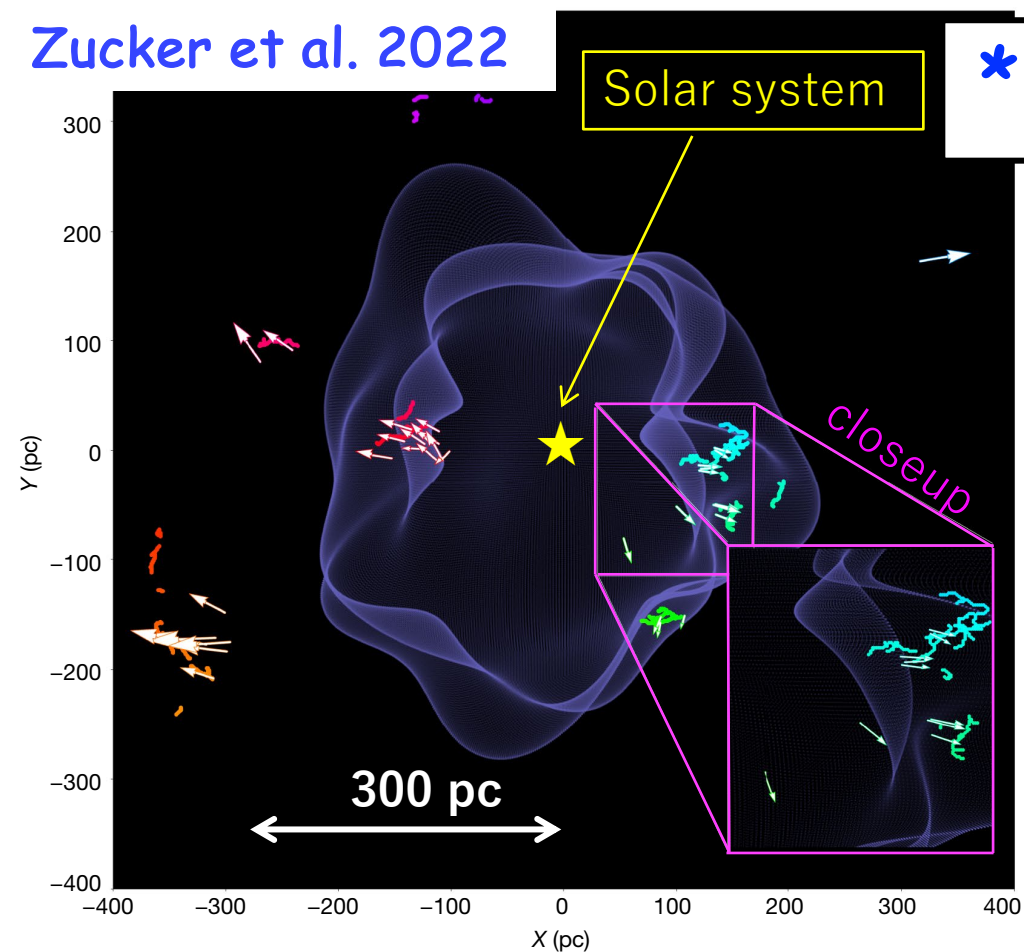


Fig. 2. Energy density within TeV sources associated with pulsars as a function of pulsar $\dot{E}$ and τ_c under different assumptions. *Top panels:* energy density calculated as $\epsilon_e = \dot{E}\tau_c/V$, described in Sect. 3.1. *Bottom panels:* energy density calculated using the electron spectrum derived from TeV γ -ray measurements, described in Sect. 3.2. The shaded regions correspond to an energy density lower than that of the ISM under any reasonable assumption. Systems for which measured properties are taken from the HGPS are indicated by circles, whereas stars indicate the systems where HAWC data is used (see also Table 2).



***Local bubble* around the solar system**

我々はLocal Bubbleという*泡*の中で暮らしている。
→一般的には、複数回のSNeで形成されたと考えられている。

・宇宙線・ガンマ線？

星形成は~1-10 Myrで進行する。

宇宙線の銀河円盤部平均滞在時間は~1-10 Myr.

宇宙線の組成等への影響は？

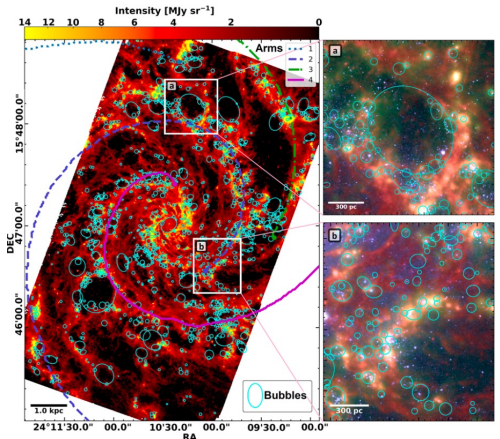
実際の（近傍）星形成史は？

Local bubbleが寄与する可能性はある。

BeやB/C，宇宙線組成で検証できるか？

ガンマ線TeV-haloの理解も重要。

星形成史だけでなく，~10 Myrの『地球環境』への影響も気になります。

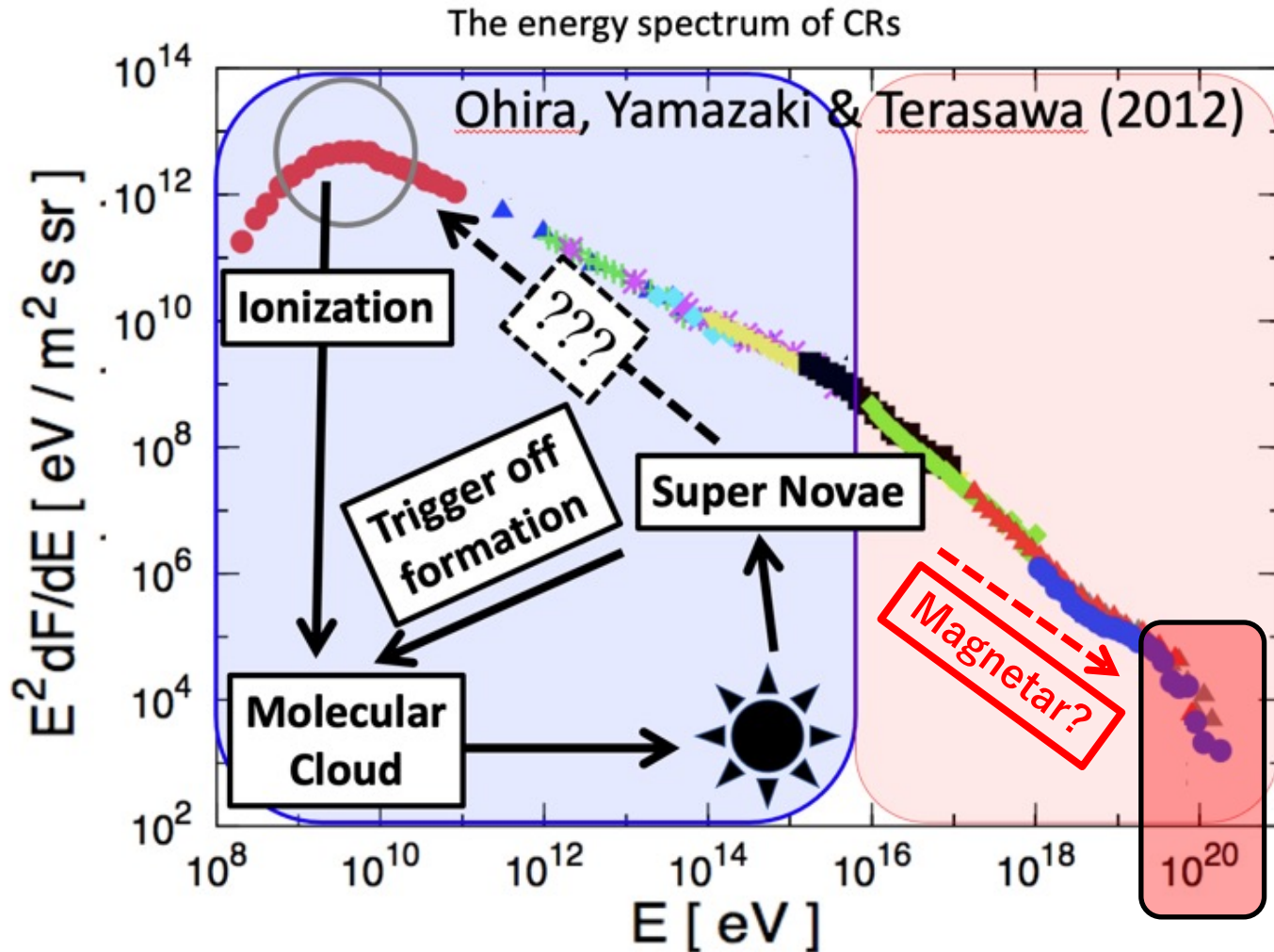


* 300 pcというのは、銀河円盤の厚みと同程度。
~1-10 Myrかけないと円盤上空方向に逃走できないなら、『逃げ遅れている』奴らが
その辺にそれなりに居らっしゃる？

よろしくお願いします

名前：霜田治朗

所属：宇宙線研究所高エネルギー天体グループ特任助教



- 1) 銀河宇宙線の起源解明のための研究
- 2) 宇宙線と星形成史の関係について
- 3) **>100 EeV宇宙線の加速機構について**

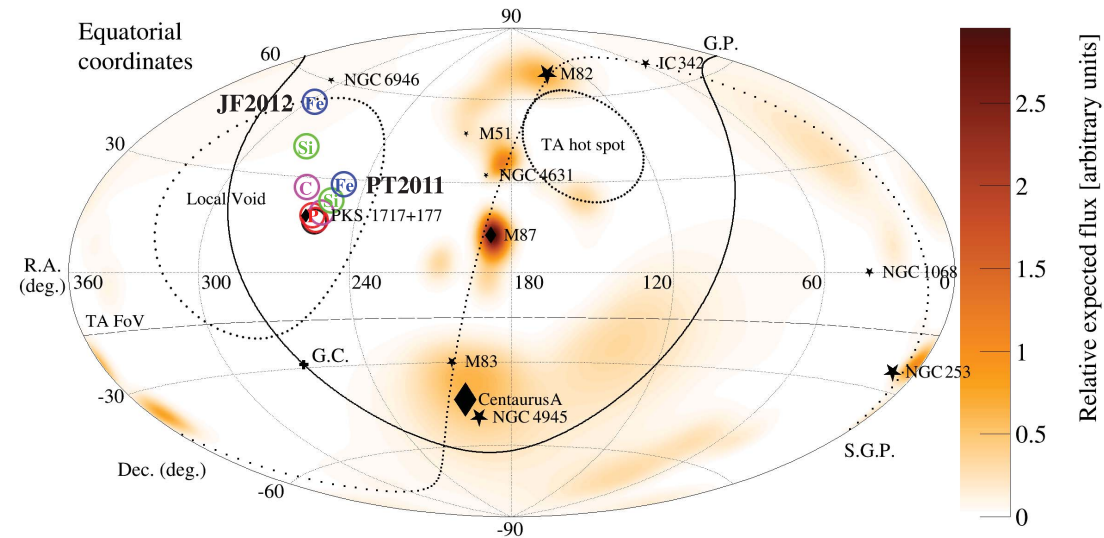
宇宙線の起源と、宇宙における役割
をキーワードにして研究しています。

Highest Energy Cosmic Rays (>100 EeV)

TA collaboration (2023)

2021 May 27th 10:35:56 (UTC)

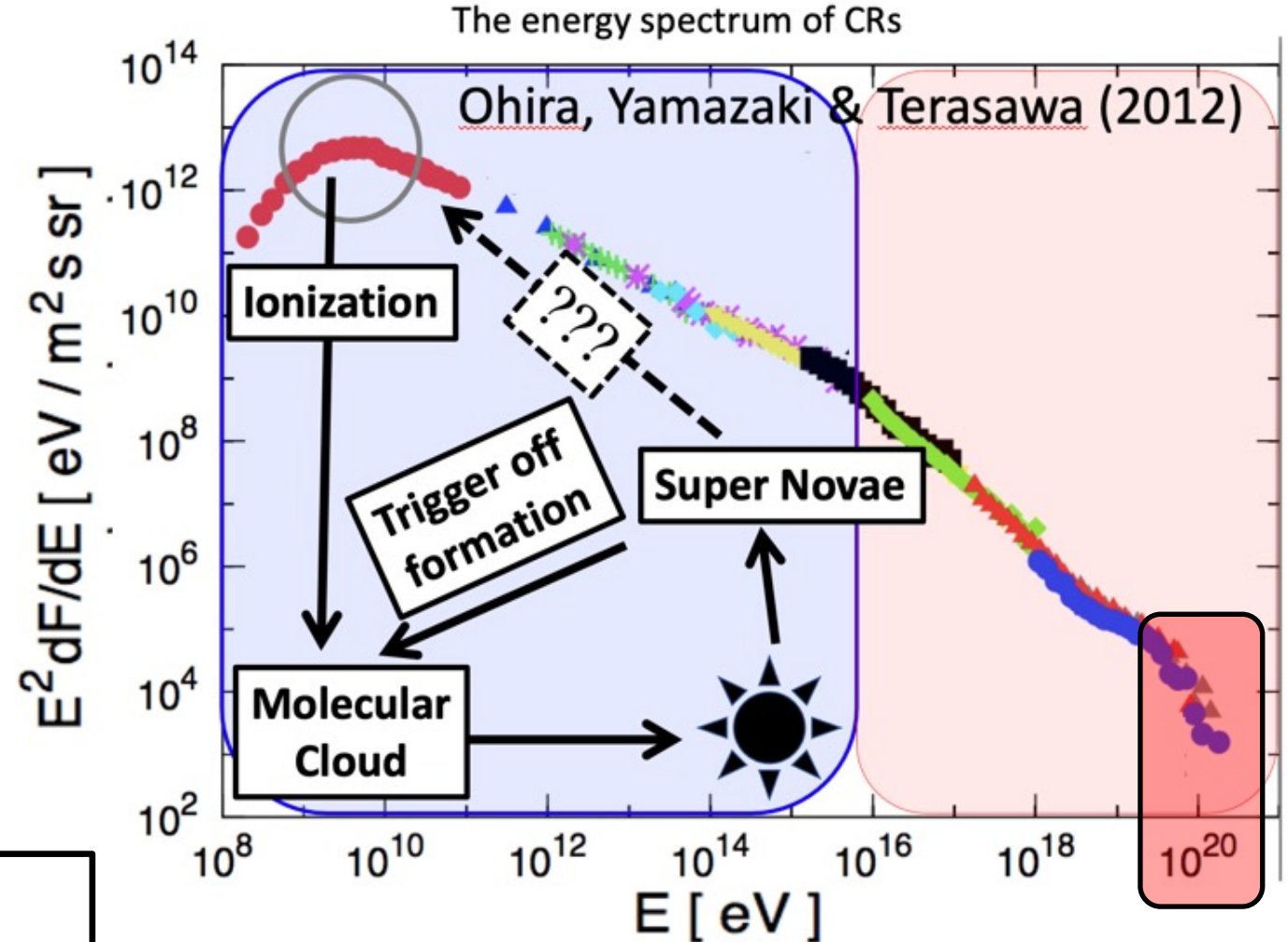
Amaterasu (the highest-energy CRs)



Energy~200 EeV (2×10^{20} eV)!

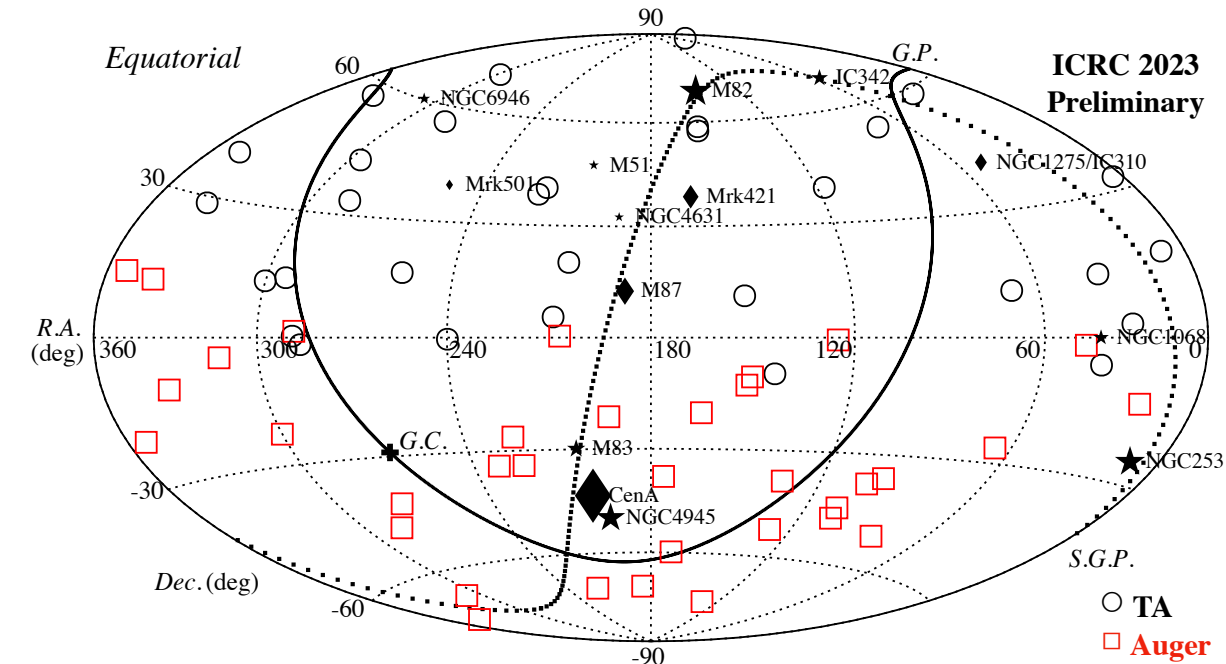
m.f.p. ~ 1-10 Mpc (by photon)

**The Origin & Acceleration Mechanism
Remain a BIG MYSTERY.**

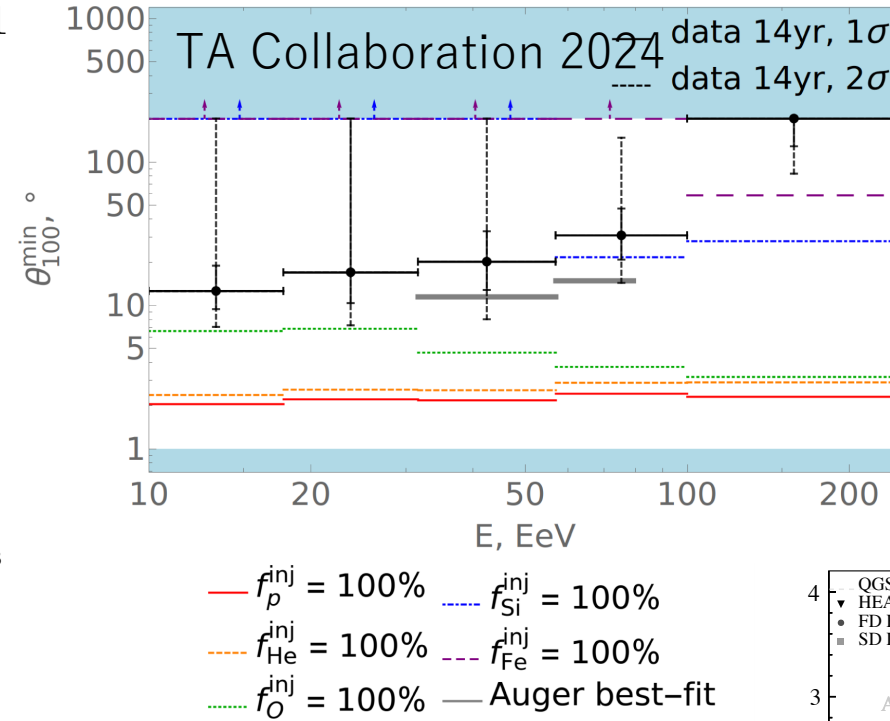


Observations of ~ 100 EeV Cosmic Rays

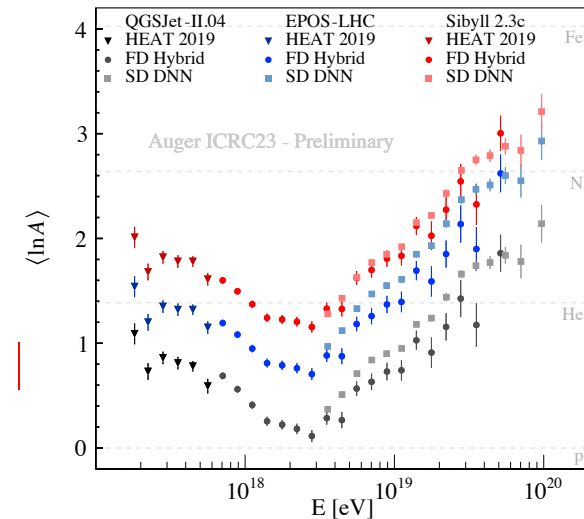
$$r_g \sim 100 \text{ kpc } Z^{-1} (\epsilon_i / 100 \text{ EeV}) (B_{\text{ISM}} / 1 \mu\text{G})^{-1}$$



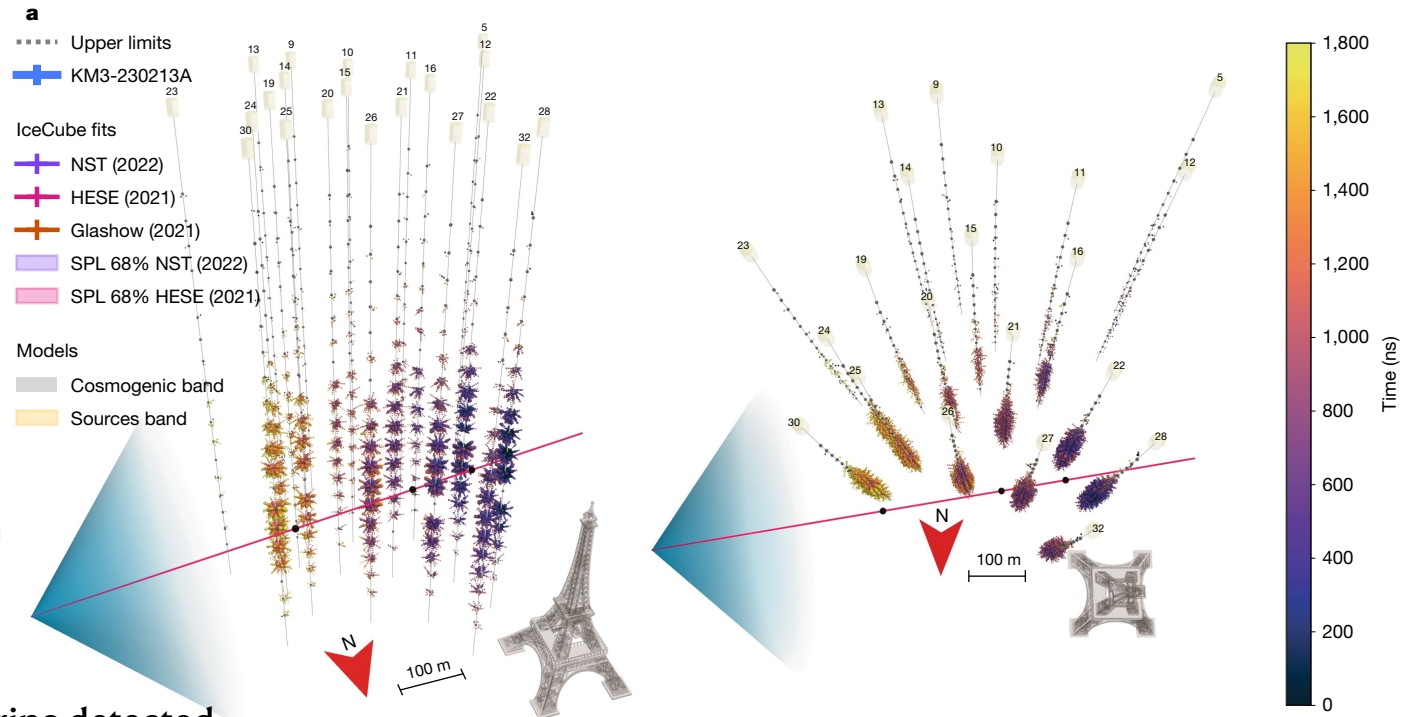
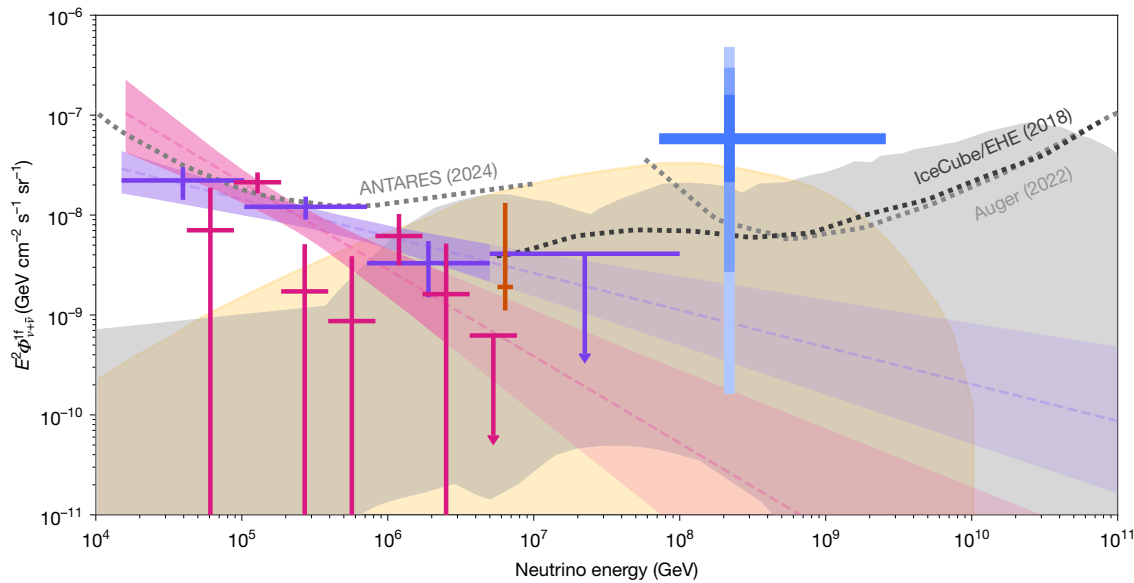
Arrival direction
 → Looks no hot spot (No hints)



Composition
 → Heavy elements are

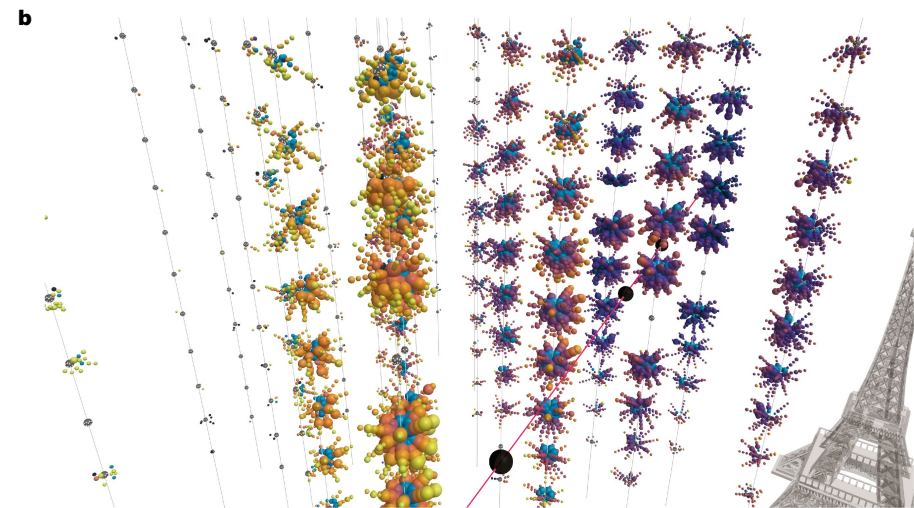


Recent News: KM3Net ~100 PeV Neutrino



However, the energy of this event is much larger than that of any neutrino detected so far. This suggests that the neutrino may have originated in a different cosmic accelerator than the lower-energy neutrinos, or this may be the first detection of a cosmogenic neutrino⁸, resulting from the interactions of ultra-high-energy cosmic rays with background photons in the Universe.

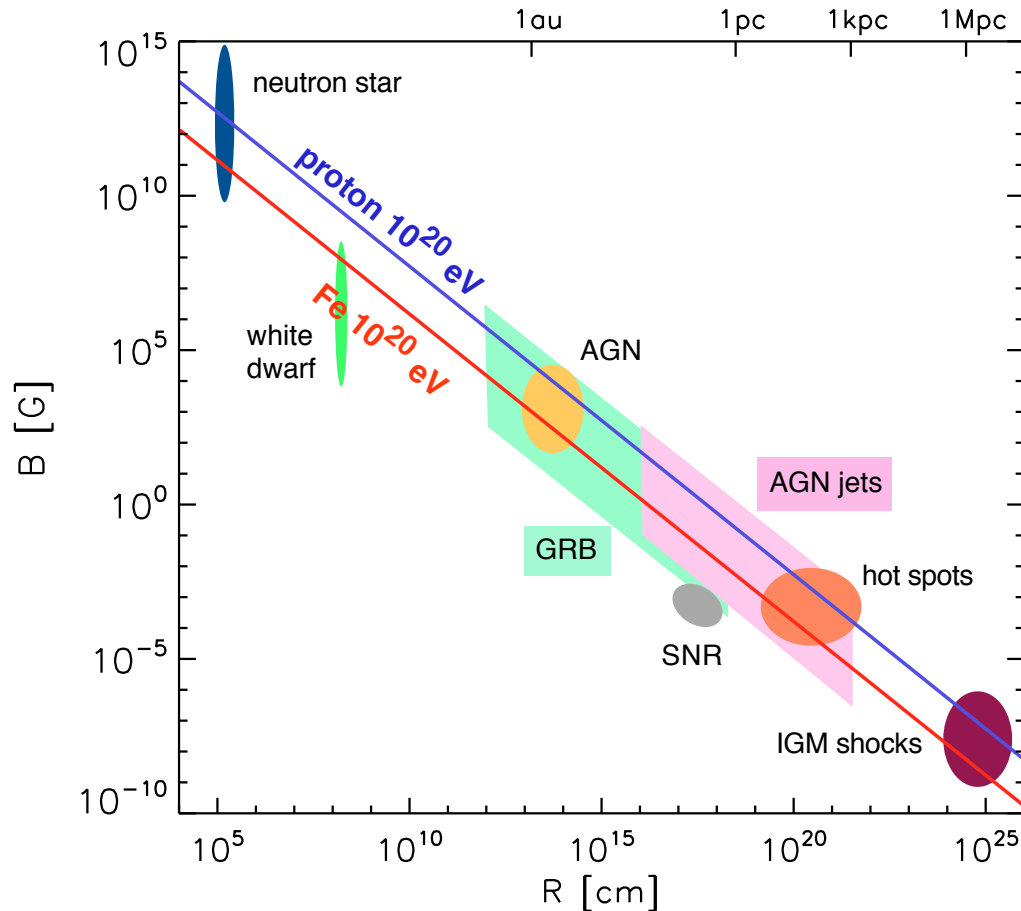
***Strange*
source(s) ?**



Neutron Stars (Magnetars) as a candidate of source

"Hillas diagram"

$E_{cr}/qB \sim \text{Object Size} \rightarrow \text{Confine the CRs}$



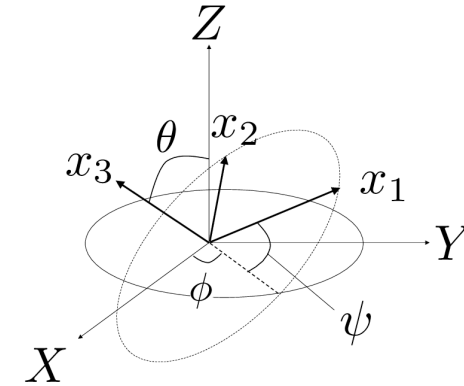
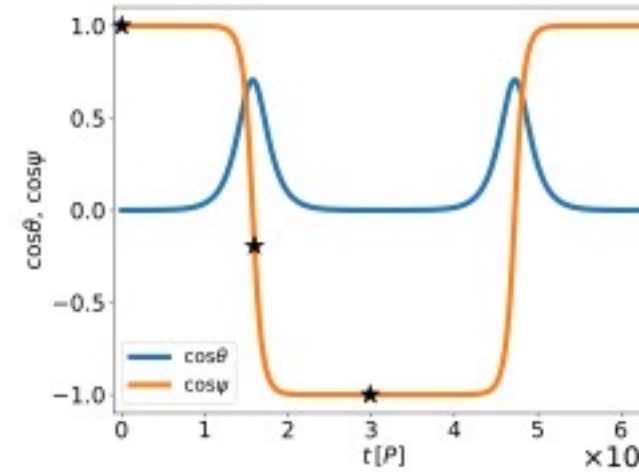
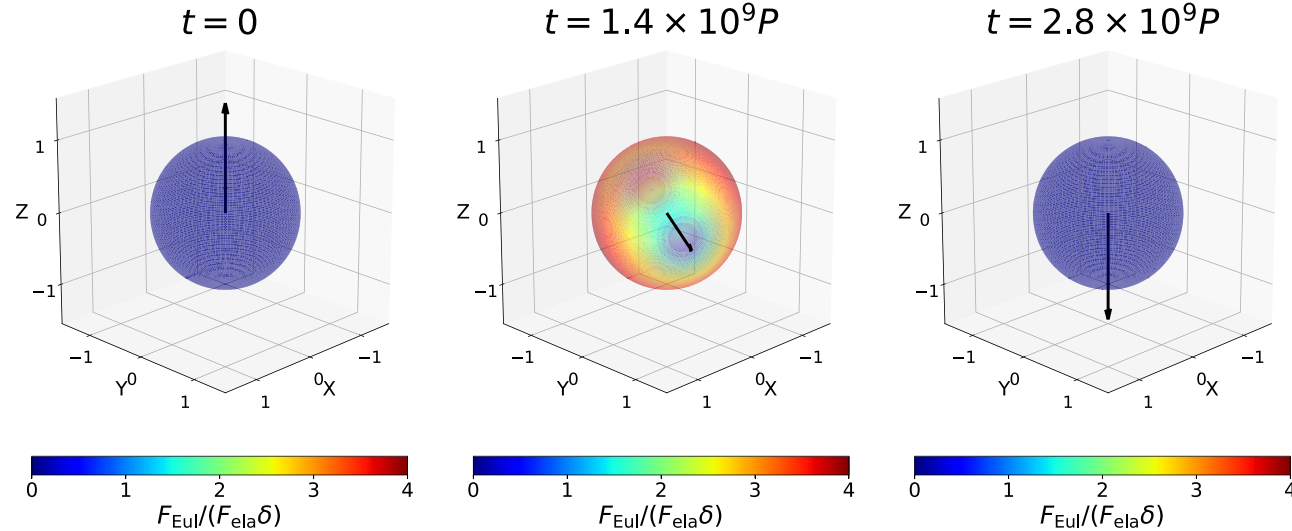
Neutron Stars w/ $B \sim 10^{15}$ G are one of the candidates.

How accelerates **nuclei in a Neutron Star Transient Event is the main problem.**

(see, also Arons 04, Kotera 11, Asano+06)

***中性子星の周りには「電子・陽電子」はたくさん居ます。*核子*は謎です。**

New Scenario for *Trigger* Mechanism of NS-transients



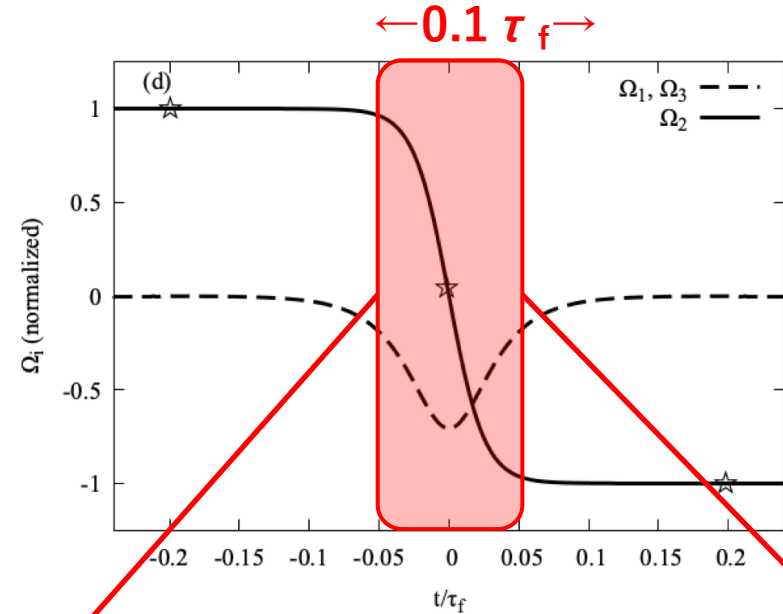
↓ from Twitter

Known as the Dzhanibekov effect
as a solution of the Euler equation.

『宙返り』した中性子星の表層 (Fe+e) が慣性に耐えきれず割れる。めちゃ強い電場でFeを一気に加速する。



What happens in the NS under the Dzhanibekov effect?



The waiting time for “flip”

$$\tau_f \sim 200 \text{ yr } K_{,1} \delta_{,-9}^{-1} P_{,0},$$

$$I_3 > I_2 > I_1, \text{ where } I_2 = (2/5)M_* R_*^2, I_1 = (1 - \delta)I_2, \text{ and } I_3 = (1 + \delta)I_2.$$

Euler force appears

Work by Euler force

$$V \equiv \pi l^2 \mathcal{H}, \Delta \mathcal{P} = M F_{\text{Eul}} \Delta \tau_f$$

$$\Delta \tau_f = 1.5 \times 10^{-3} \tau_f$$

$$F_{\text{Eul}} = |\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{\Omega}}| \sim R_* \Omega^2 \delta$$

$$W_{\text{Eul}} \sim \frac{\Delta \mathcal{P}^2}{2M} \sim \frac{M R_*^2 \Omega^4 \delta^2 \Delta \tau_f^2}{2}$$

Elastic Potential Energy (*stiffness* of the crust material)

$$U_{\text{ela,c}} = \mu \sigma_c^2 V \quad \mu/\rho = 10^{14} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2} (A/56)^{-4/3} (Z/26)^2 \rho_{,4}^{1/3}$$

$$\sigma_c = 0.01$$

$$\rho = \rho_s \left(\frac{\mathcal{H}}{\mathcal{H}_s} \right)^{5/2} \quad H = -\rho(dr/d\rho)$$

What happens in the NS under the Dzhanibekov effect?

Euler vs. Stiffness

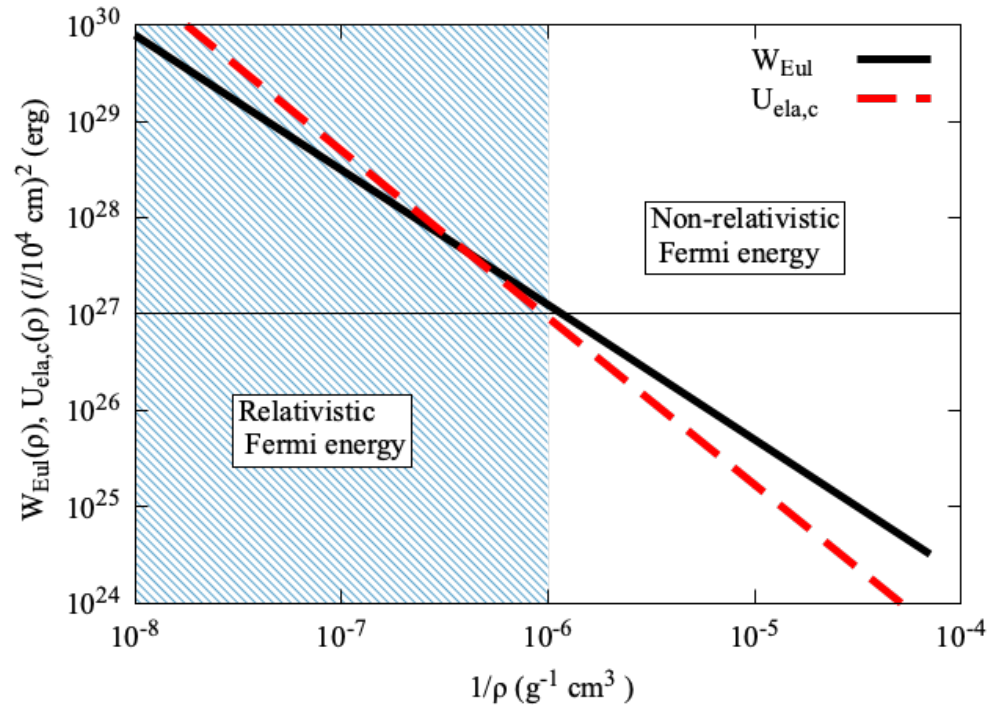
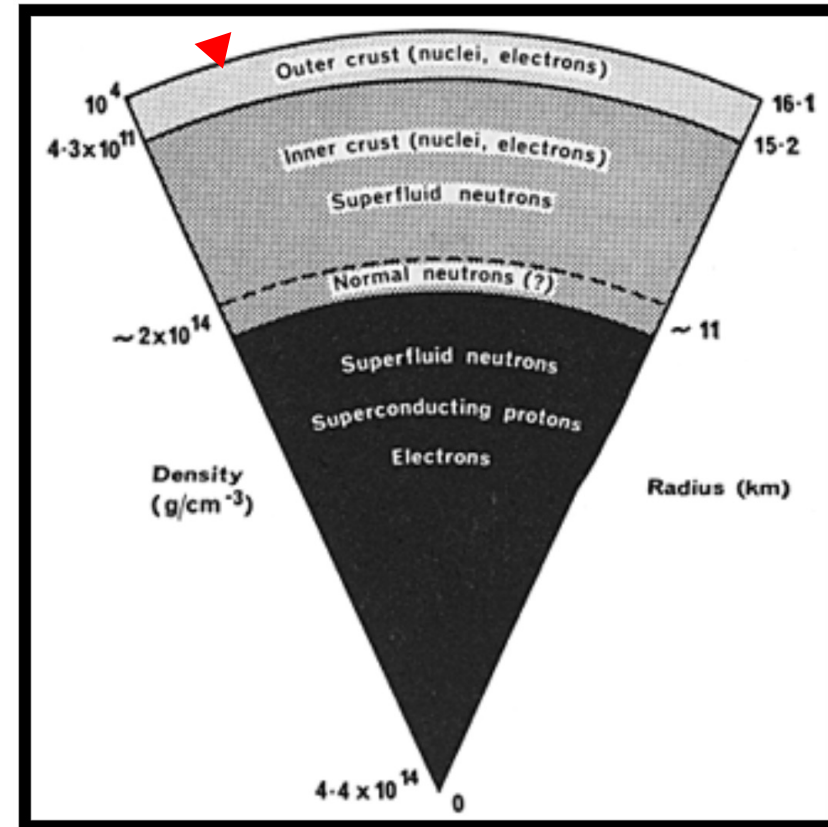


Fig. 2 Comparison of the total work of the Euler force (solid line) and the critical elastic energy (broken line). The hatched region indicates the region where the Fermi energy of electrons is relativistic ($\rho > 10^6 \text{ g cm}^{-3}$). We adopt $R_* = 10^6 \text{ cm}$, $\Delta\tau_f = 1.5 \times 10^{-3}\tau_f$, $\sigma_c = 0.01$, $l = 10^4 \text{ cm}$, and $M = \rho V$.

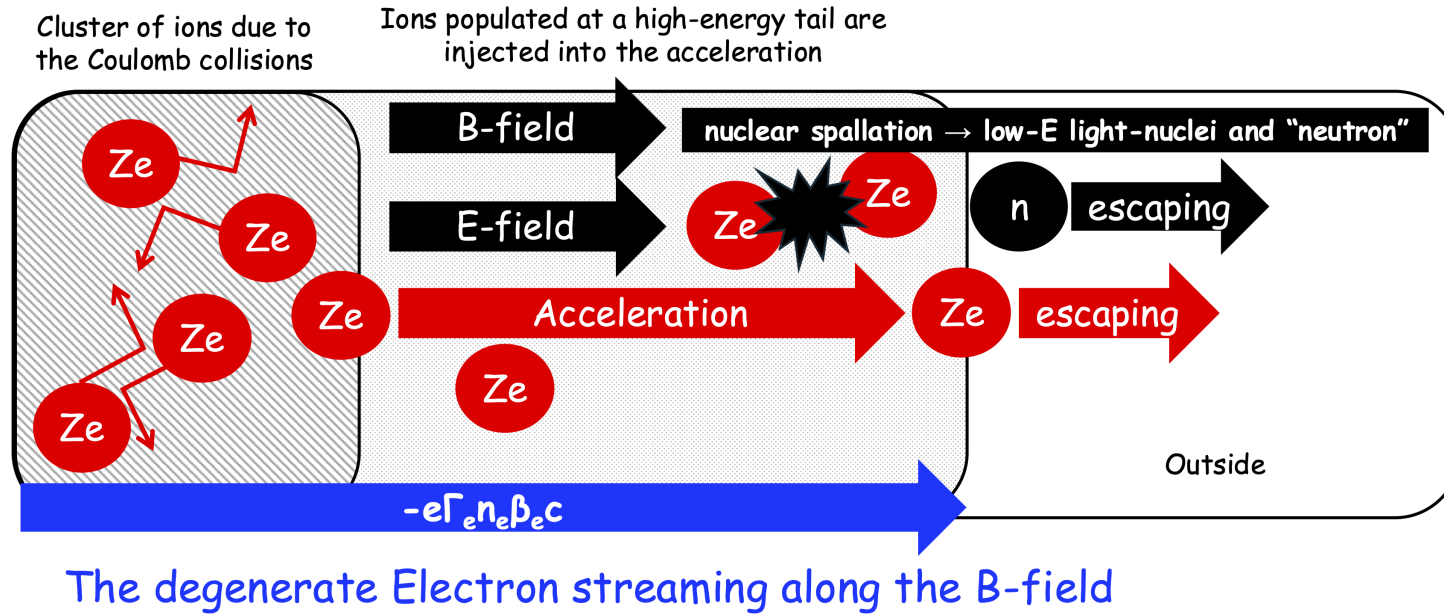
Euler force can deform the NS surface at
 $\rho < 1.0 \text{e}6 \text{ g/cc}$ ($r < 60 \text{ cm}$)
 (Outer crust)

The crust will be
 significantly affected within
 $\Delta\tau_f \sim 10^{-3} \tau_f \sim 3 \text{ months } \delta_{-9}^{-1}$

Cracks reaches at $H \sim 63 \text{ cm}$



At a Moment of Phenomenon (Shimoda&Wada 2025)



Injection of Cold ions

→ kinetic energy of $T_{inj} \sim \eta T_i$
($\eta \sim 5$ is supposed)

→ $n_{inj} \sim n_i \exp(-\eta)$

Effective Energy Loss Process

→ Nuclear spallation reactions

→ $\sigma_A \sim \pi a_A^2$, $a_A \sim 4.59 \text{e-}13 \text{ cm } (A/56)^{1/3}$

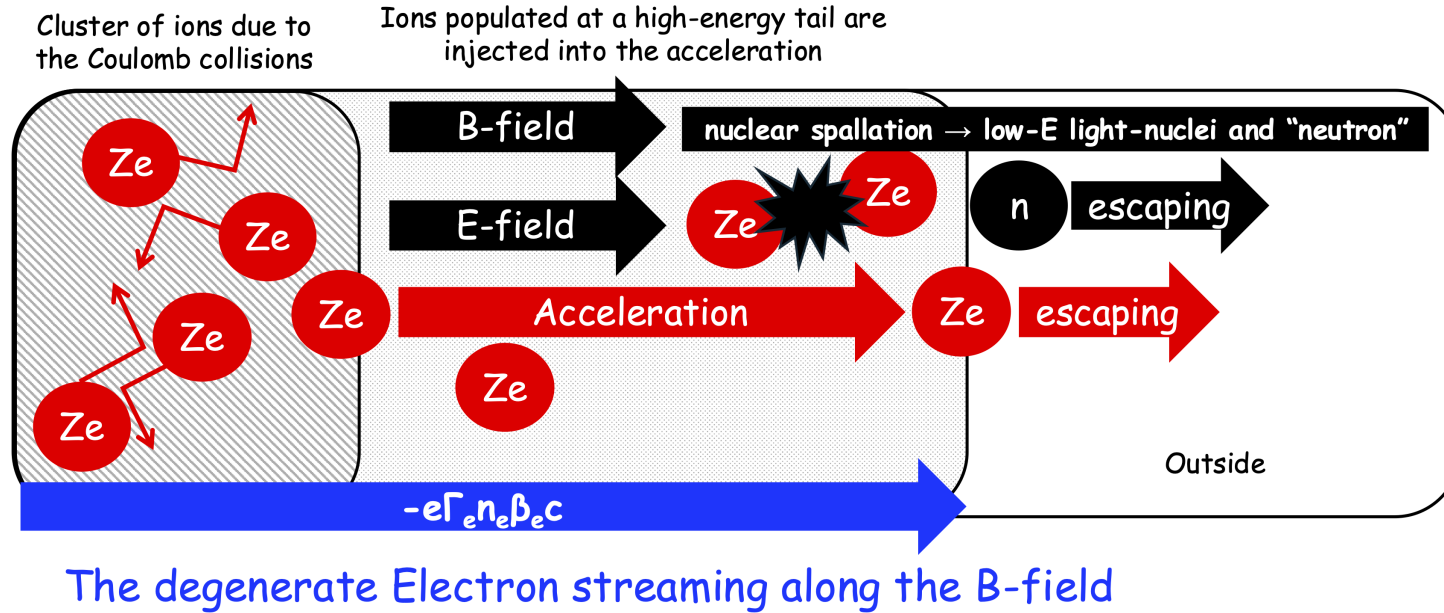
Estimated Maximum Energy of accelerated ions

$$\epsilon_{i,\max} \sim Ze E_{\text{res}} l_{\text{mfp}} \sim 1.2 \text{ ZeV } \rho_c^{1/3} \left(\frac{Z}{26} \right)^{13/3} \left(\frac{A}{56} \right)^{-1/2} \left(\frac{T_i}{0.3 \text{ keV}} \right)^{-3/2}$$

$$l_{\text{mfp}}/c \sim 7.0 \times 10^{-13} \text{ s} = 0.7 \text{ ps}$$

Ions can be accelerated up to $\sim \text{ZeV} = 10^{21} \text{ eV}$ scale within a time of $\sim 1 \text{ ps}$.

At a Moment of Phenomenon (Shimoda&Wada 2025)



Injection of Cold ions

→ kinetic energy of $T_{inj} \sim \eta T_i$
 ($\eta \sim 5$ is supposed)

→ $n_{inj} \sim n_i \exp(-\eta)$

Effective Energy Loss Process

→ Nuclear spallation reactions

→ $\sigma_A \sim \pi a_A^2$, $a_A \sim 4.59 \text{e-}13 \text{ cm } (A/56)^{1/3}$

Estimated Maximum Energy of accelerated ions

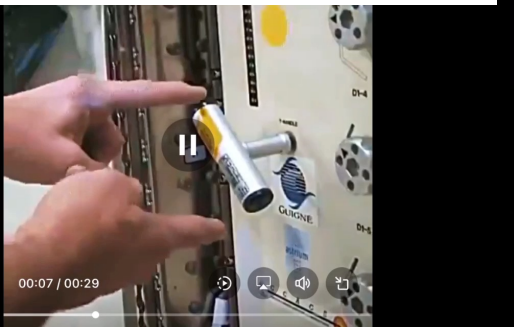
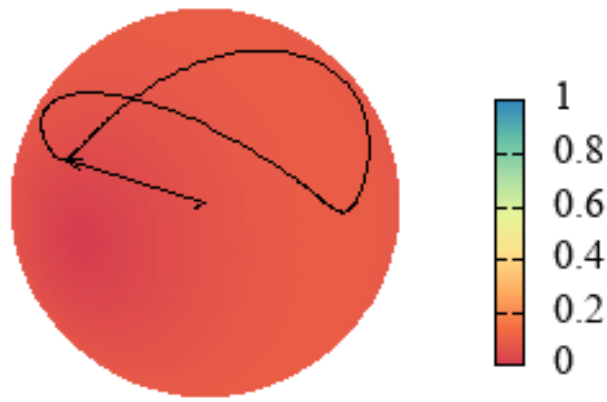
$$\epsilon_{i,\max} \sim Ze E_{\text{res}} l_{\text{mfp}} \sim 1.2 \text{ ZeV } \rho_c^{1/3} \left(\frac{Z}{26} \right)^{13/3} \left(\frac{A}{56} \right)^{-1/2} \left(\frac{T_i}{0.3 \text{ keV}} \right)^{-3/2}$$

$$l_{\text{mfp}}/c \sim 7.0 \times 10^{-13} \text{ s} = 0.7 \text{ ps}$$

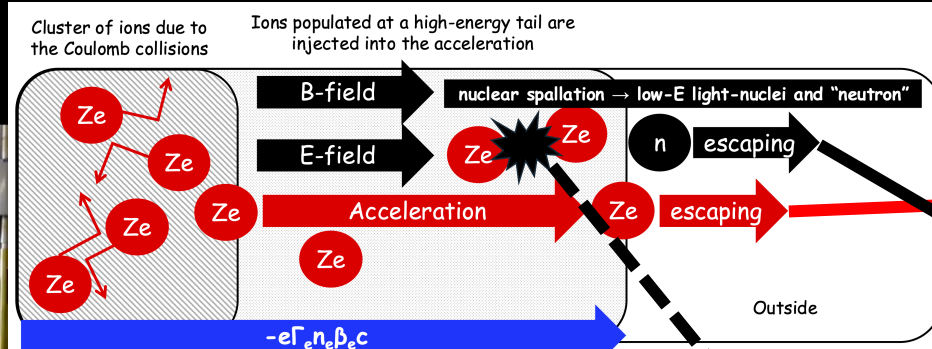
Instant **ZeV**-ion-acceleration in **Upset Magnetar Origin Bursts**

→ **IZUMO** Bursts

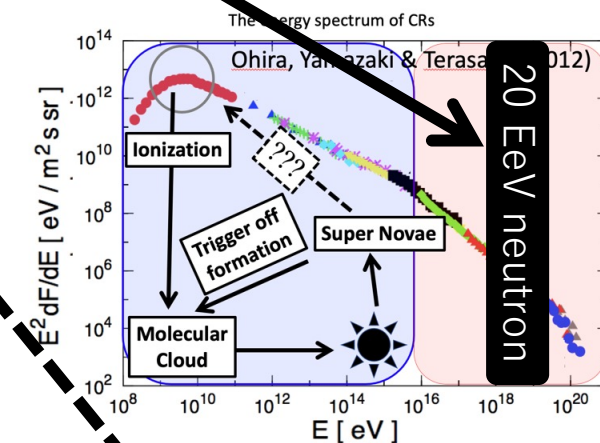
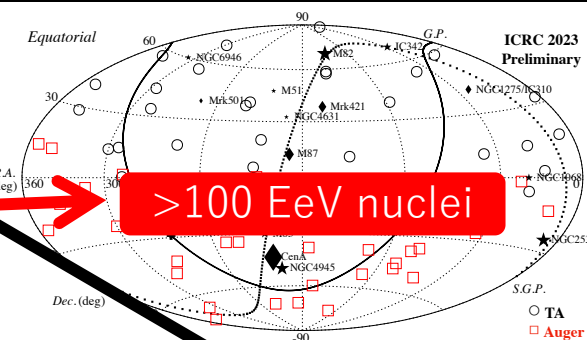
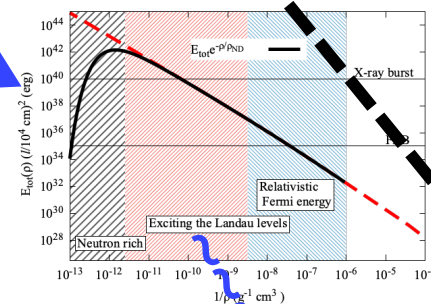
$$t/\tau_f = -0.249$$



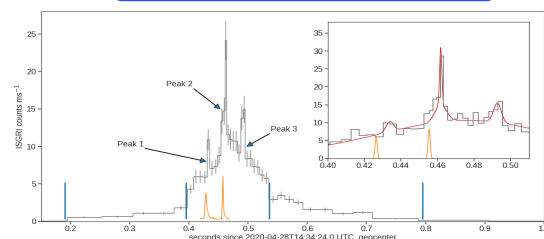
Summary



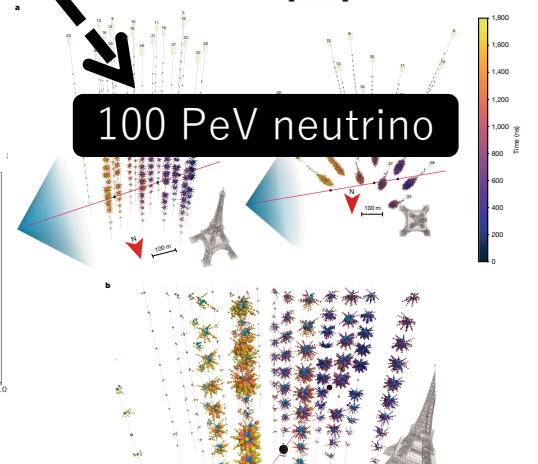
The degenerate Electron streaming along the B-field



100 keV photon



100 PeV neutrino



Instant **Z**eV-ion-acceleration in **U**pset **M**agnetar **O**rigin Bursts

→ **IZUMO** Bursts

The **cracked** Area is $\sim \pi l^2 \sim 3.0e8 \text{ cm}^2$.

$\Delta\Omega_{\text{ang}} \sim \pi l^2 / (4\pi R_*^2) \sim 1.0e-6$, $H \sim 100 \text{ m} / R_* \sim 1.0e-2 (R_*/10 \text{ km})^{-1}$

For the Earth...

$\Delta A_{\text{Earth}} \sim 4\pi R_{\text{Earth}}^2 \Delta\Omega_{\text{ang}} \sim 510 \text{ km}^2$ (出雲市 $\sim 624 \text{ km}^2$)

$H_{\text{Earth}} \sim R_{\text{Earth}} (H/R_*) \sim 63.71 \text{ km}$

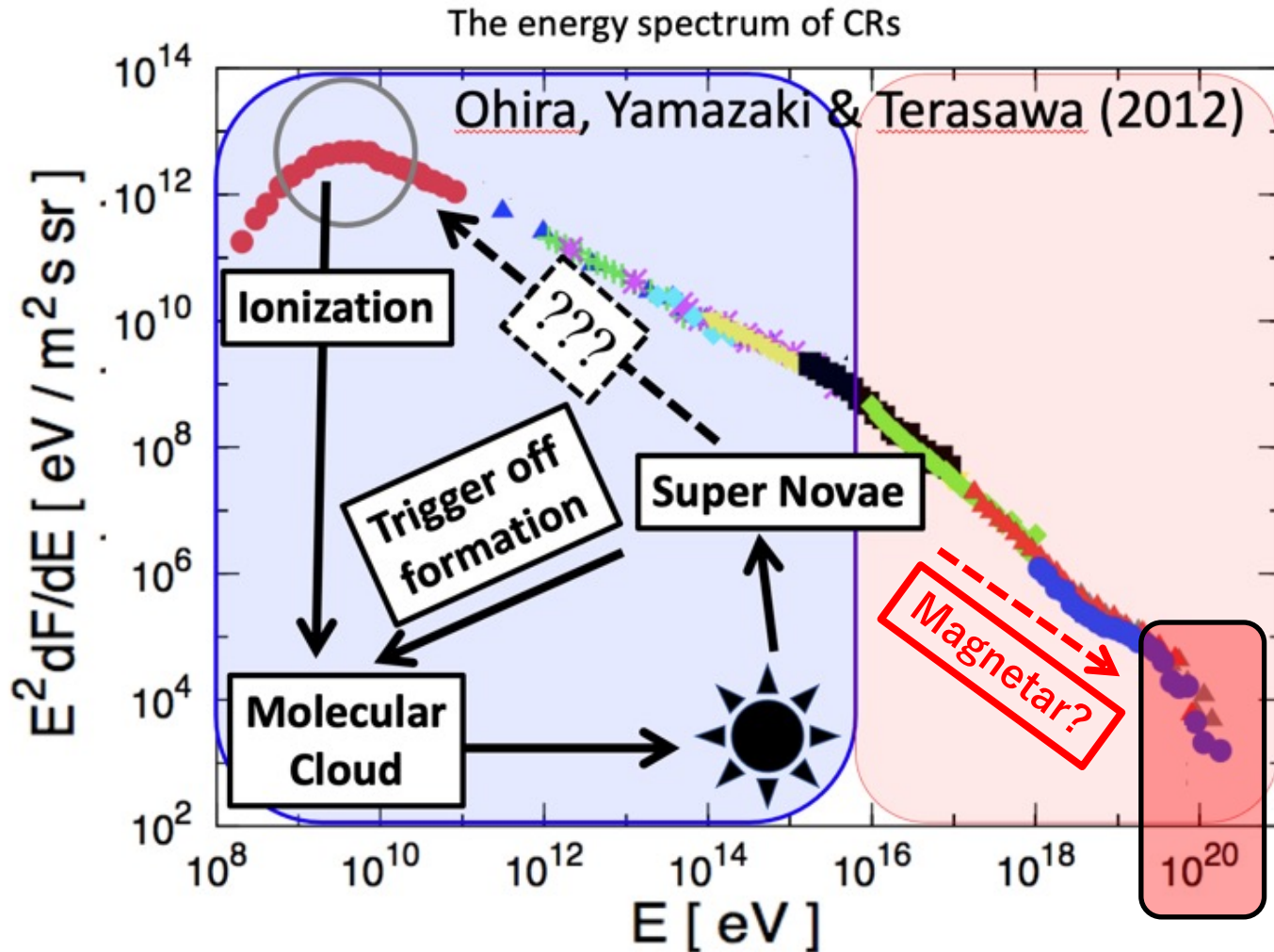
出雲市 ($\sim 624 \text{ km}^2$) が吹き飛んで深さ $\sim 60 \text{ km}$ の穴を作るくらい。

(Not So Drastic)

よろしくお願いします

名前：霜田治朗

所属：宇宙線研究所高エネルギー天体グループ特任助教



- 1) 銀河宇宙線の起源解明のための研究
偏光H α など + SED
- 2) 宇宙線と星形成史の関係について
銀河宇宙線 + 星形成史 + 地球環境
- 3) >100 EeV宇宙線の加速機構について
突発天体 + 『中性』宇宙線天文学

宇宙線の起源と，宇宙における役割
をキーワードにして研究しています。