

Basic reviews on Galactic cosmic-ray origin

霜田治朗¹

cf.) Hayakawa et al. 1958 (伝統的・標準的な話題)
Gabici et al. 2019 (宇宙線業界の最近の話題)

1, 名古屋大学

夏の学校2020, 8月26日, 星間現象

宇宙線 (Cosmic Rays)

- 広義：宇宙からやってくる「放射線」 (光子, 核子, 電子, ニュートリノ, etc...)
 - 狭義：「**荷電粒子**」 (電子・陽電子, 陽子, ヘリウム核, etc...)
- 天体物理学では, 特に**光速に近い速度のもの**を指すことが多い.
- Victor Franz Hess博士(1883-1964)が1912年に発見し, 1936年にノーベル物理学賞を受賞した.

宇宙線 (Cosmic Rays)

- 広義：宇宙からやってくる「放射線」 (光子, 核子, 電子, ニュートリノ, etc...)
 - 狭義：「**荷電粒子**」 (電子・陽電子, 陽子, ヘリウム核, etc...)
- 天体物理学では, 特に**光速に近い速度のもの**を指すことが多い.

- 宇宙線の起源は発見から100年来, 謎のまま.
- 今日**は60年代頃までに提唱された「標準シナリオ」**を紹介する. (cf. Hayakawa, Ito, Terashima 1958; Ginzburg & Syrovatskii 1964)
- 最近の話題は Gabici et al. 2019 などを参照.

From Nishimura 2015



Figure 2: S. Hayakawa
He performed comprehensive works on Cosmic rays and high-energy Astrophysics, and predicted the importance of Gamma-ray astrophysics through π^0 decay in 1952.

Rays)

る「放射線」(光子, 核子,

早川幸男先生 (1923-1992) .

宇宙線の超新星起源説, およびガンマ線天文学の提唱者.

天文学会の早川幸男基金 (若手海外学術研究援助基金) を設立された.

(天文辞典より)

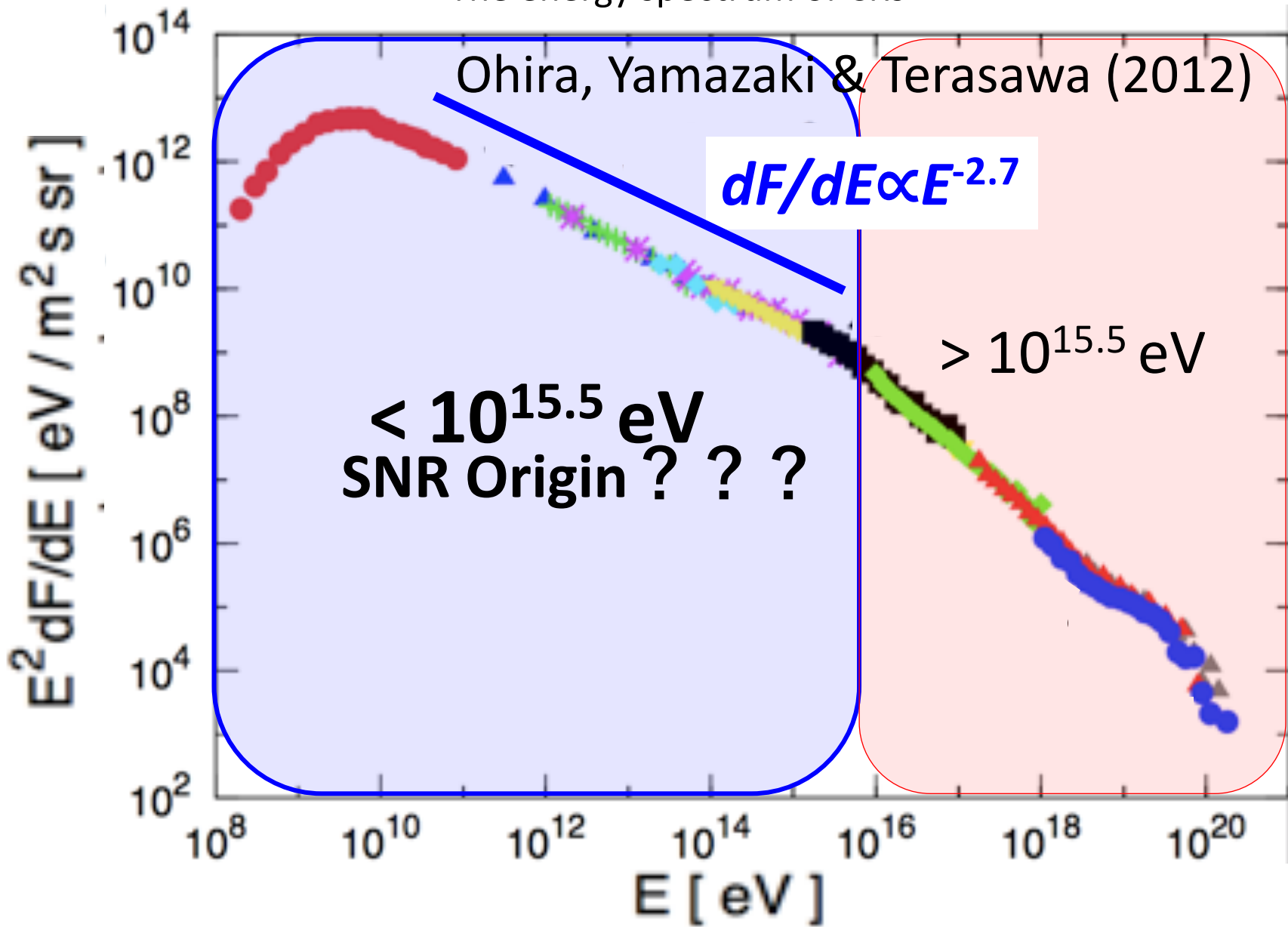
100年来, 謎のまま.

提唱された「標準シナリオ」を紹介する. (cf. Hayakawa, Ito, Terashima 1958; Ginzburg & Syrovatskii 1964)

➤ 最近の話題は Gabici et al. 2019 などを参照.

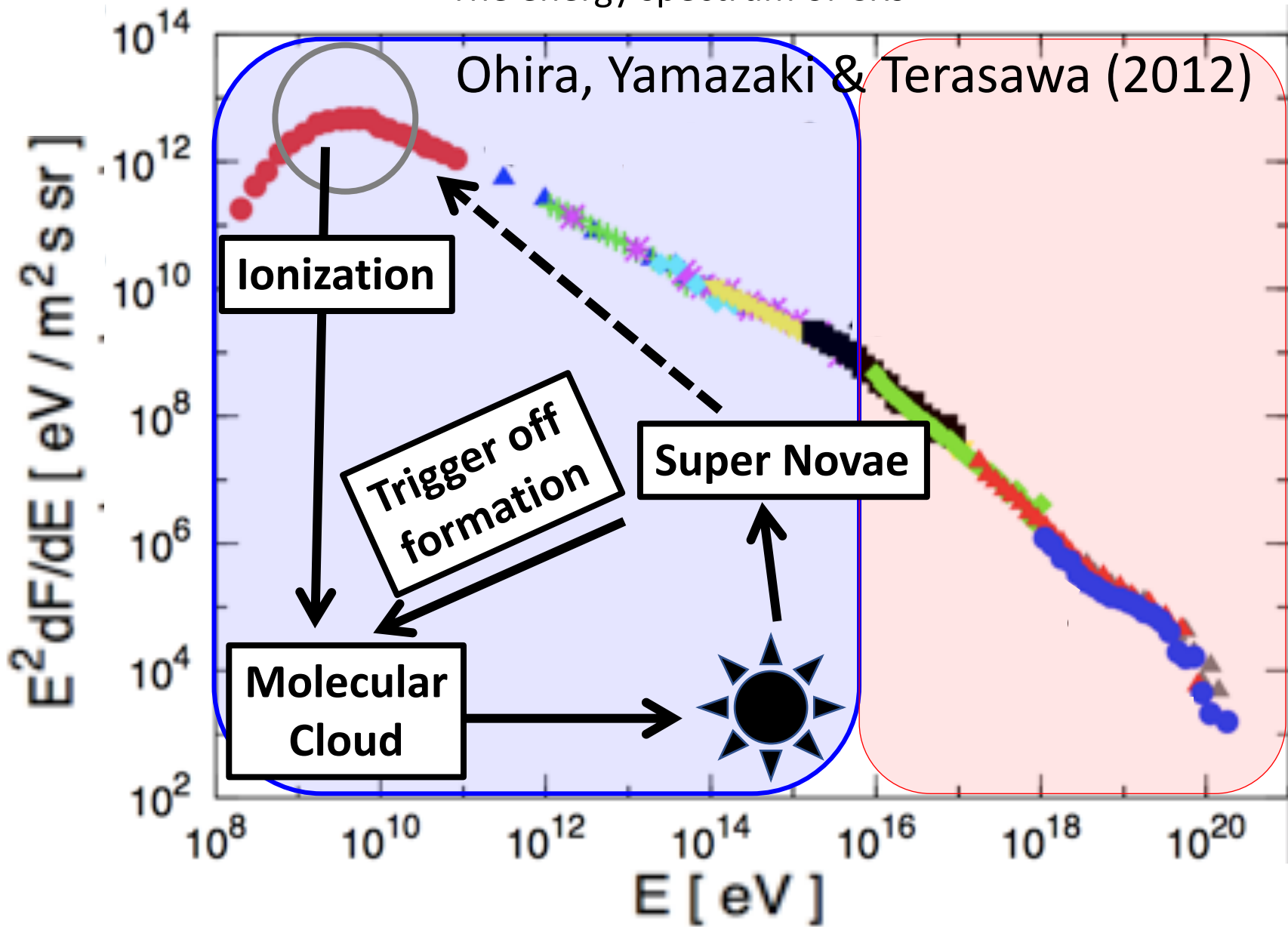
宇宙線 (Cosmic Rays)

The energy spectrum of CRs



宇宙線 (Cosmic Rays)

The energy spectrum of CRs



宇宙物理学での宇宙線の例

1. ISMのエネルギー平衡 (太陽近傍)

CR ~ turbulence ~ B -field ~ thermal ~ 1 eV/cc

→ ガスの運動に影響を与える:

e.g. 銀河風の駆動源 (Breitschwerdt+ 1991)

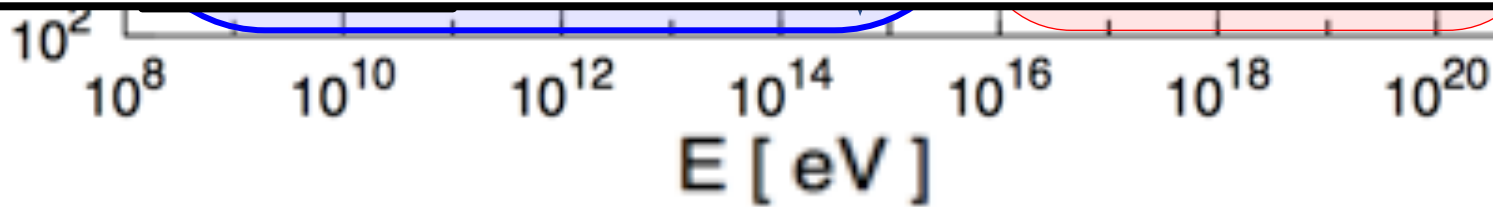
2. 分子雲の電離源

電離ガスは磁場と結合している.

磁場はプラズマ状態に依存して散逸する.

→ 星形成中の磁束と角運動量の再分配 (cf. Inutsuka 2012).

宇宙線の起源は？



宇宙線の起源について①

The energy spectrum of CRs

➤ $\varepsilon_{\text{CR}} \sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$ (mostly reserved in $\sim \text{GeV}$ CRs)

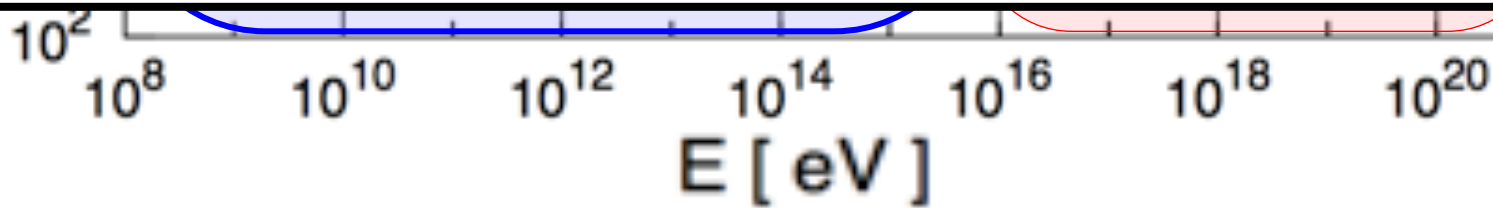
* 銀河内の前エネルギーの推定：

$$\sim \varepsilon_{\text{CR}} V \sim 10^{55} \text{ erg } (V/ 10^{67} \text{ cm}^3)$$

➤ 銀河が“**準定常状態 (quasi-equilibrium state)**”にあるとすると、これを維持するために必要な宇宙線の注入率が存在する。

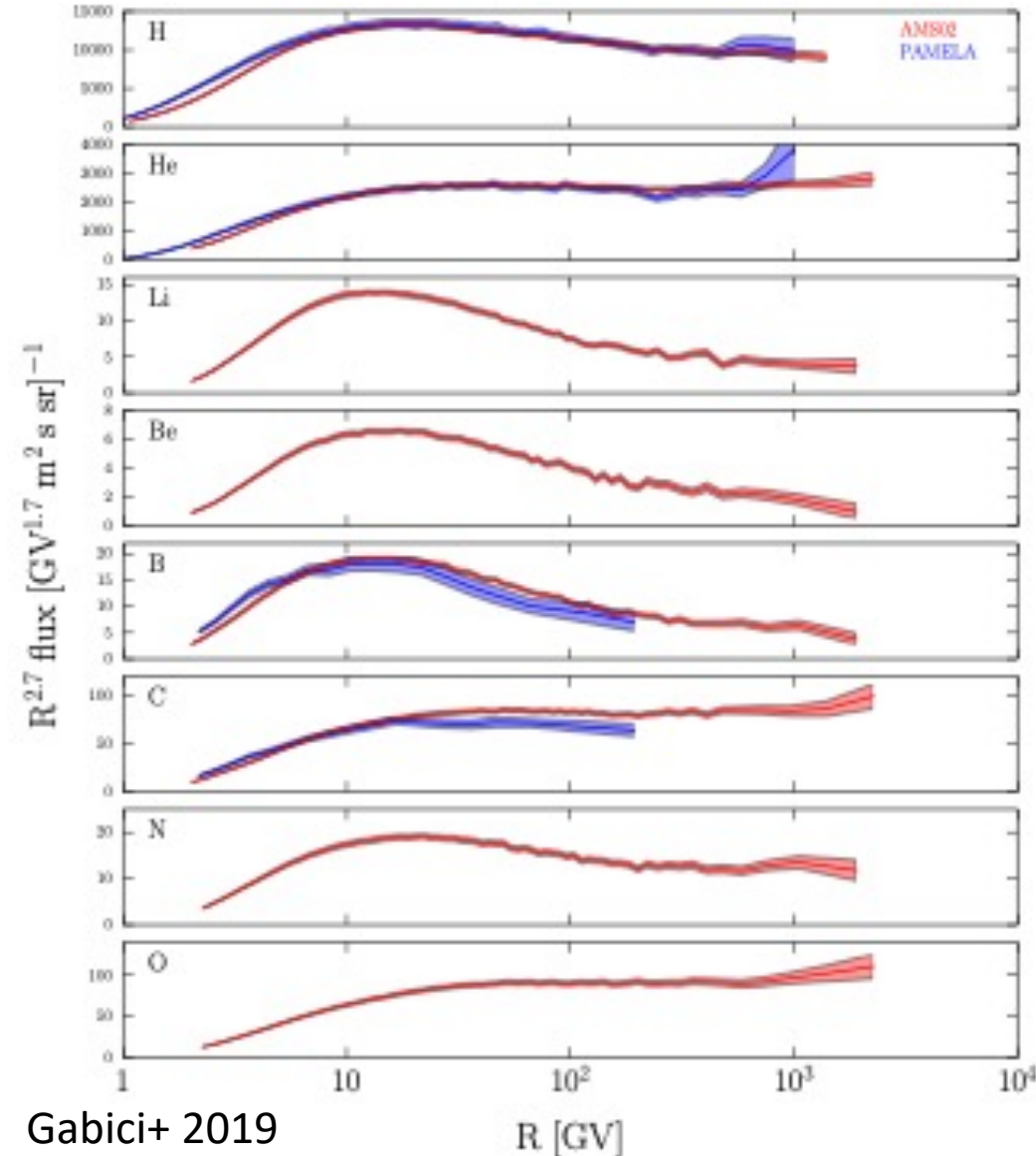
$$\rightarrow P_{\text{CR}} \sim \varepsilon_{\text{CR}} V / \tau \text{ [erg/s]}.$$

➤ 宇宙線の**滞在時間 τ** が必要である。



宇宙線の起源について①

➤ CRs: 様々な核種で構成される



□ ^{11}B は星の元素合成でほとんど生成されないことが知られている。

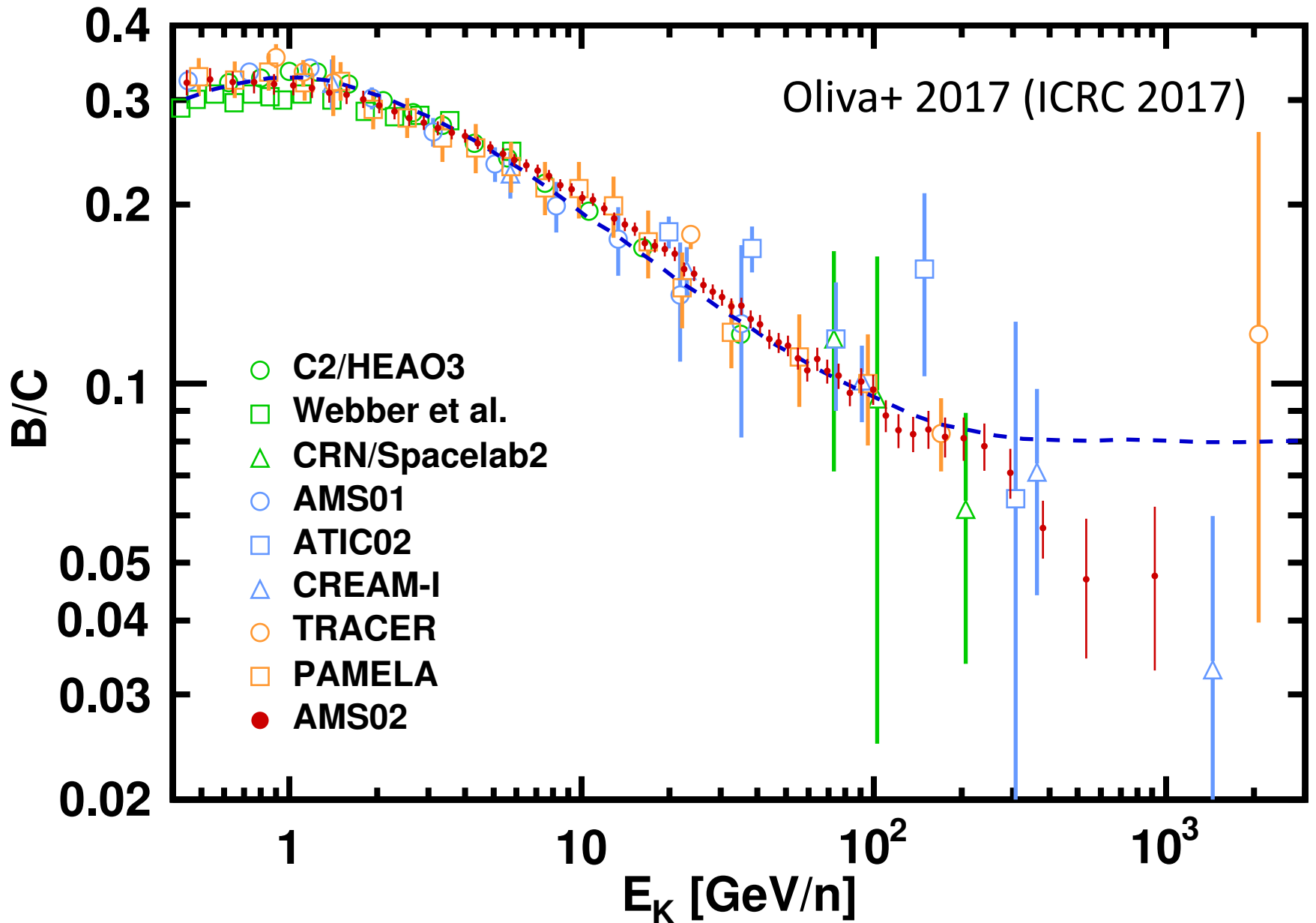
^{11}B production :



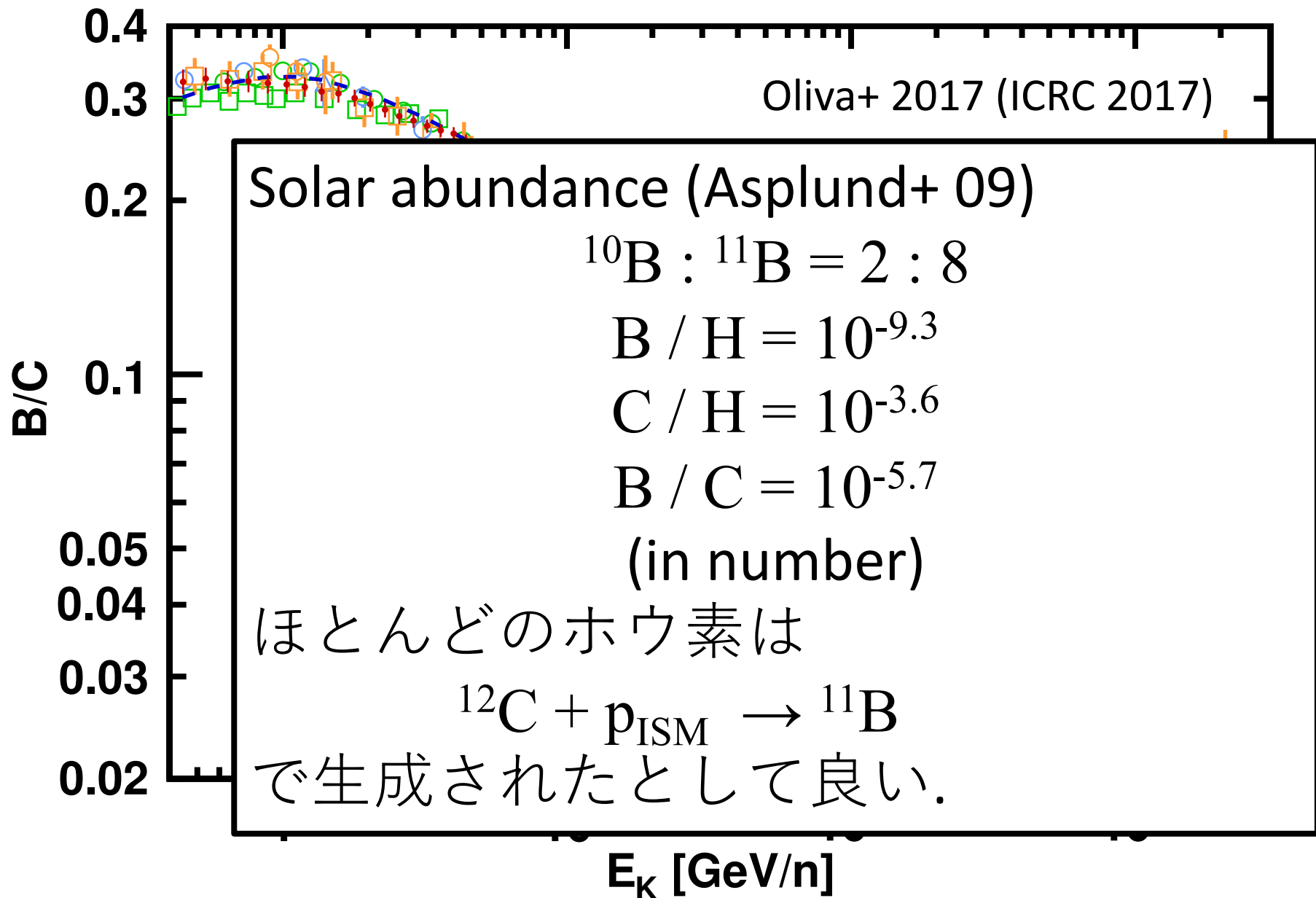
※ ^{10}B is also produced.

^{11}B と ^{12}C は銀河系内の宇宙線の振る舞いのトレーサーとなる。

Boron to Carbon ratio

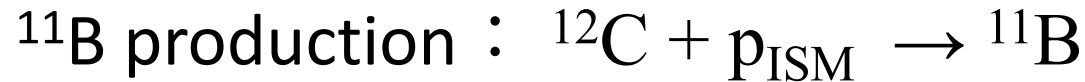


Boron to Carbon ratio



宇宙線の起源について①

➤ 滞在時間の推定



$$\text{生成率 (s}^{-1}\text{)} : q \sim n({}^{12}\text{C}) n_{\text{ISM}} \sigma c$$

$$\text{逃走率 (s}^{-1}\text{)} : \sim n({}^{11}\text{B}) / \tau$$

$$\text{平衡状態} : n({}^{11}\text{B}) / \tau = q$$

$$\tau \sim \{n({}^{11}\text{B}) / n({}^{12}\text{C})\} / (\sigma n_{\text{ISM}} c)$$

*** $\Lambda = \mu m_p n_{\text{ISM}} \tau c$ is usually used in CR community.**

$$\rightarrow n({}^{11}\text{B}) / n({}^{12}\text{C}) \sim \sigma \Lambda / \mu m_p$$

$$\tau \sim \Lambda / \mu m_p n_{\text{ISM}} c$$

$$\sim 10 \text{ Myr } (\Lambda / 10 \text{ g cm}^{-2}) (n_{\text{ISM}} / 1 \text{ cm}^{-3})^{-1}$$

宇宙線の起源について①

- CR は主に陽子で構成される

$$\begin{aligned}\tau &\sim \Lambda / \mu m_p n_{\text{ISM}} c \\ &\sim 10 \text{ Myr. } (\Lambda / 10 \text{ g cm}^{-2}) (n_{\text{ISM}} / 1 \text{ cm}^{-3})^{-1}\end{aligned}$$

* ^{11}B の滞在時間

- ISM は希薄なガス. → 宇宙線の集団的運動は電磁場によって決まる (粒子間衝突ではなく).
- ジャイロ半径が宇宙線の運動の最小スケール.
→ $r_g \sim R/B$, $R = pc/Ze$ “rigidity”.
→ **R が同じ粒子は同じ運動をする.**

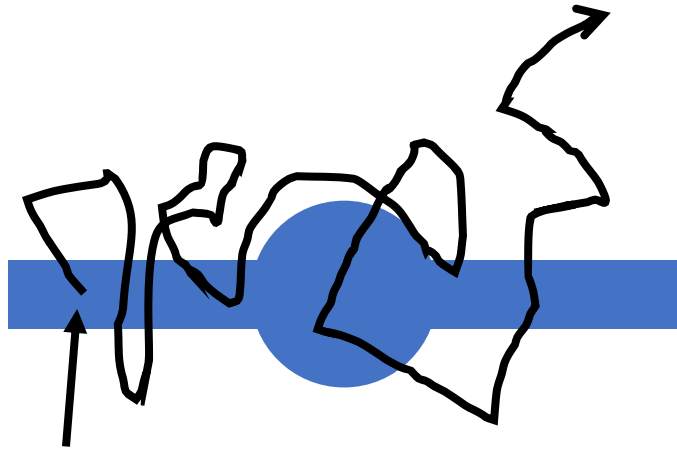
宇宙線の起源について①

➤ CR は主に陽子で構成される

$$\tau \sim \Lambda / \mu m_p n_{\text{ISM}} c$$
$$\sim 10 \text{ Myr. } (\Lambda / 10 \text{ g cm}^{-2}) (n_{\text{ISM}} / 1 \text{ cm}^{-3})^{-1}$$

宇宙線が銀河を横切る時間: $(10 \text{ kpc}) / c \sim 0.01 \text{ Myr} \ll \tau$

Finally escaping



- ✓ CRは（おそらく）散乱により銀河内に閉じ込められている。
 - ✓ 拡散的に振る舞うことで、（おそらく）銀河内に充満している。
- cf. Skilling 1971, 1975

source

ϵ_{CR} は“一様である”と仮定する。

宇宙線の起源について①

✓ エネルギー密度

$$\varepsilon_{\text{CR}} \sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$$

✓ 滞在時間

$$\begin{aligned} \tau &\sim \Lambda / \mu m_p n_{\text{ISM}} c \\ &\sim 10 \text{ Myr } (\Lambda / 10 \text{ g cm}^{-2}) (n_{\text{ISM}} / 1 \text{ cm}^{-3})^{-1} \end{aligned}$$

✓ 必要な注入率 (Required Power)

$$\begin{aligned} P_{\text{CR}} &\sim \varepsilon_{\text{CR}} V / \tau \sim \varepsilon_{\text{CR}} M c / \Lambda \\ &\sim 10^{41} \text{ erg/s } (\varepsilon_{\text{CR}} / 1 \text{ eV cm}^{-3}) \\ &\quad (M / 10^9 M_{\text{solar}}) \\ &\quad (\Lambda / 10 \text{ g cm}^{-2})^{-1} \end{aligned}$$

* $\rho = \mu m_p n_{\text{ISM}} \sim M / V$ is used.

宇宙線の起源について①

Required power: $P_{CR} \sim 10^{41}$ erg/s

➤ Supernova

✓ Energy per event : $E_{SN} = 10^{51}$ erg

✓ Event rate: $q_{SN} \sim (\text{Number of SNR}) / (\text{life time})$
 $\sim 300/10^4$ yr
 $\sim 1 / 30$ yr

→ **Available power: $\sim 10^{51}$ erg / 30 yr $\sim 10^{42}$ erg/s**

➤ 超新星爆発の運動エネルギーの $\sim 10\%$ ほどが宇宙線の生成に消費されていれば良い（が、何故そうなるかは未解明）。

Other advantages:

1. Chemical composition of CRs (enhanced population of heavy elements)
2. Plausible CR acceleration mechanism was proposed (DSA)

宇宙線の起源について②

“quasi-equilibrium” & “uniform ε_{CR} ” are OK?

$$\tau \sim 10 \text{ Myr. } (A / 10 \text{ g cm}^{-2}) (n_{\text{ISM}} / 1 \text{ cm}^{-3})^{-1}$$

$$P_{\text{CR}} \sim 10^{41} \text{ erg/s } (\varepsilon_{\text{CR}} / 1 \text{ eV cm}^{-3}) (M / 10^9 M_{\text{solar}}) (A / 10 \text{ g cm}^{-2})^{-1}$$

- ✓ 滞在時間のスケールは銀河の時間スケールに比べて非常に小さい.

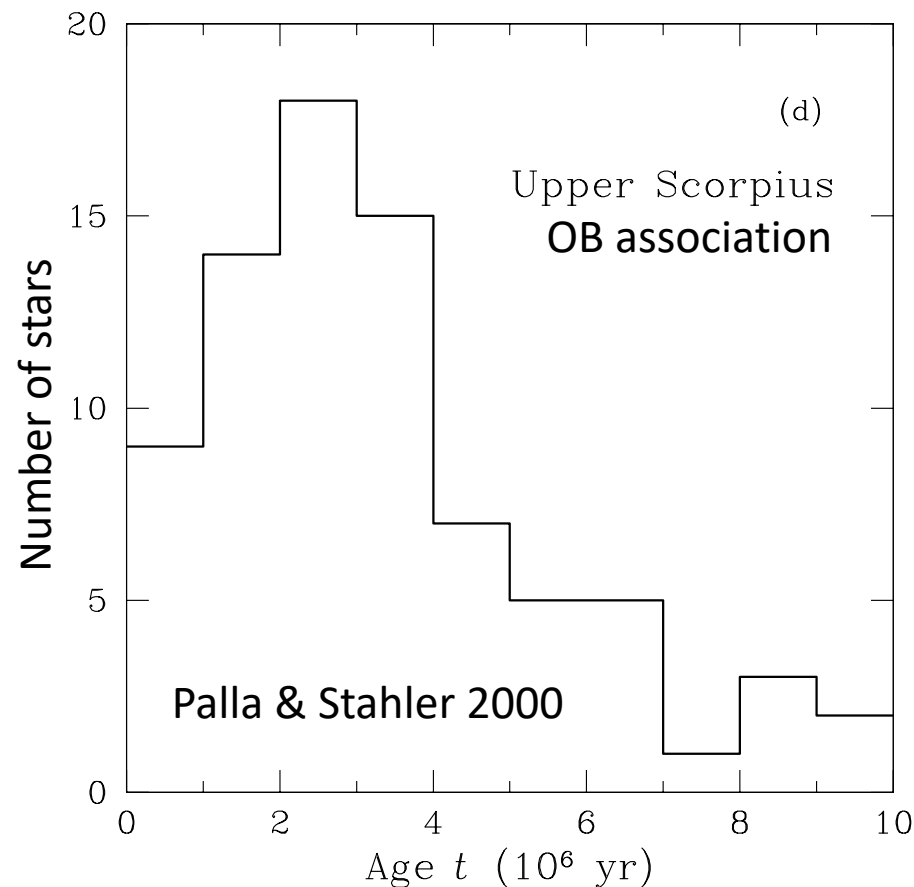
e.g. 星形成率: $\sim 1 M_{\text{solar}} / \text{yr}$

ISMガスの質量 $M \sim 10^9 M_{\text{solar}}$ は $\sim 10 \text{ Myr}$ では変化しない.

宇宙線の起源について②

“quasi-equilibrium” & “uniform ε_{CR} ” are OK?

$$P_{\text{CR}} \sim 10^{41} \text{ erg/s} \left(\varepsilon_{\text{CR}} / 1 \text{ eV cm}^{-3} \right) \left(M / 10^9 M_{\text{solar}} \right) \left(A / 10 \text{ g cm}^{-2} \right)^{-1}$$



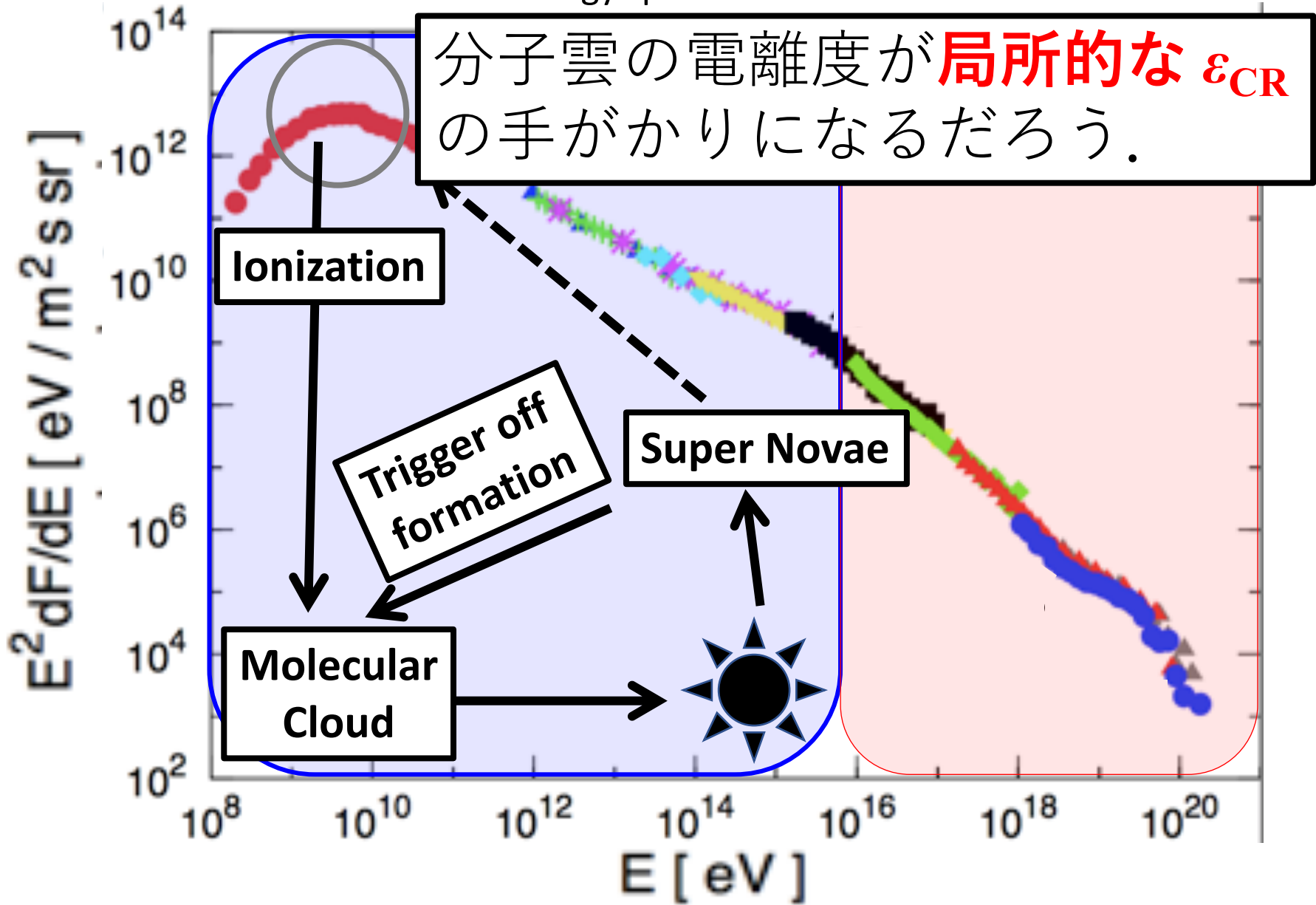
✓ ~ 10 Myr の間に星形成率は ~ 10 倍ほど変動する。

✓ 時間的・空間的に宇宙線の注入率 (by supernova) と ε_{CR} は一様とは限らない?

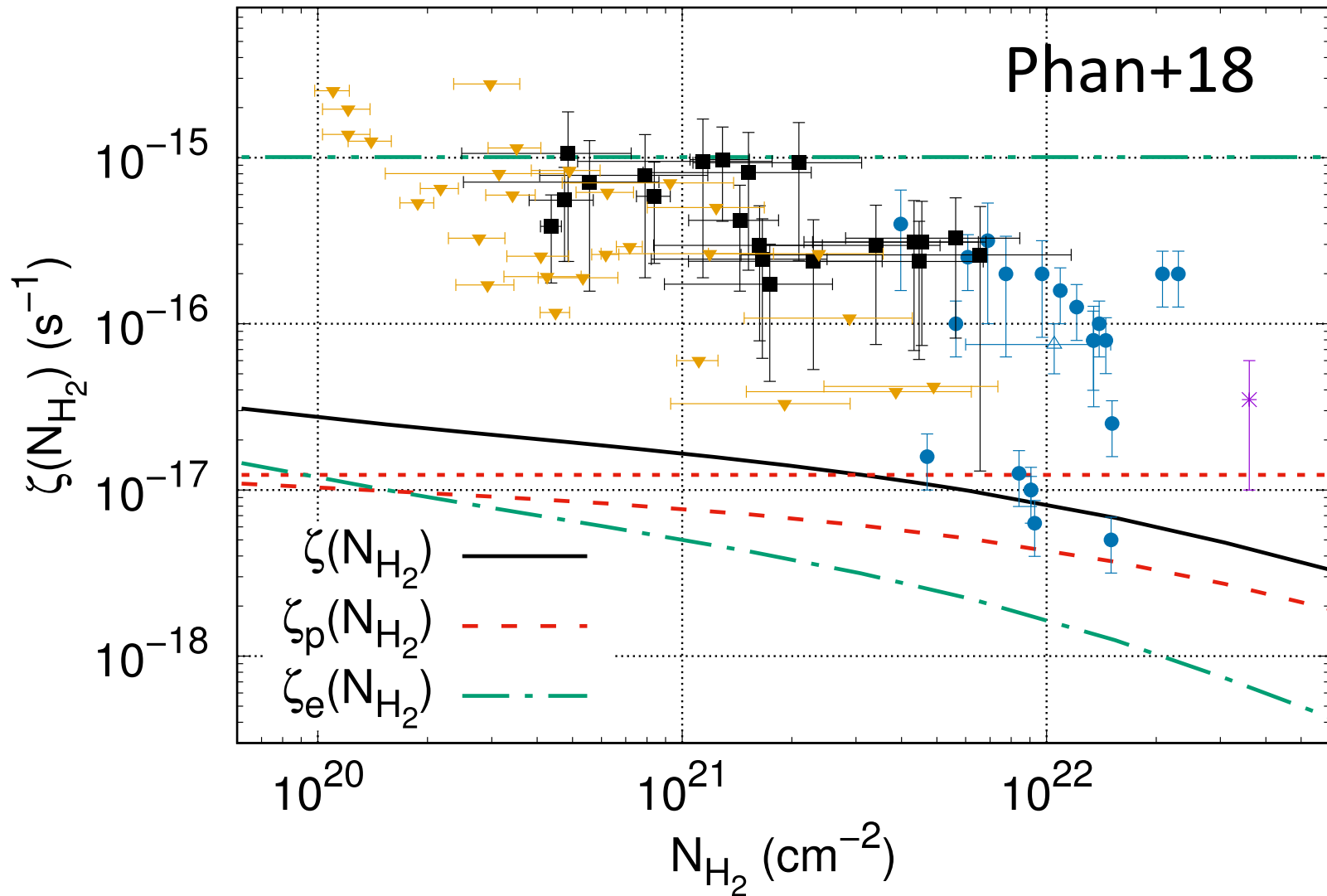
$\varepsilon_{\text{CR}} \sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$ は銀河の代表値なのか???

宇宙線 (Cosmic Rays)

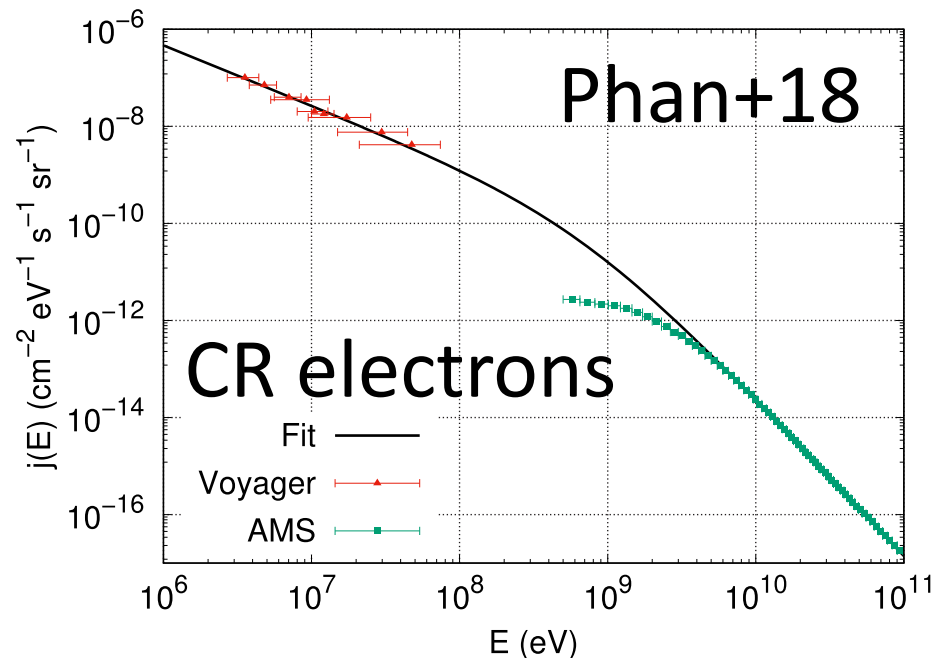
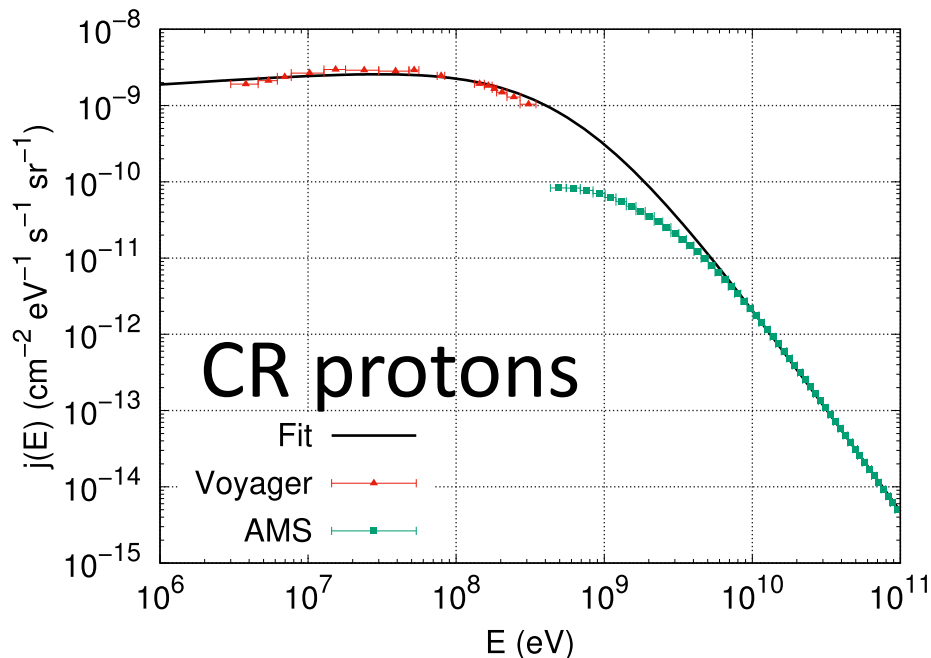
The energy spectrum of CRs



分子雲の宇宙線電離率：観測 vs 理論

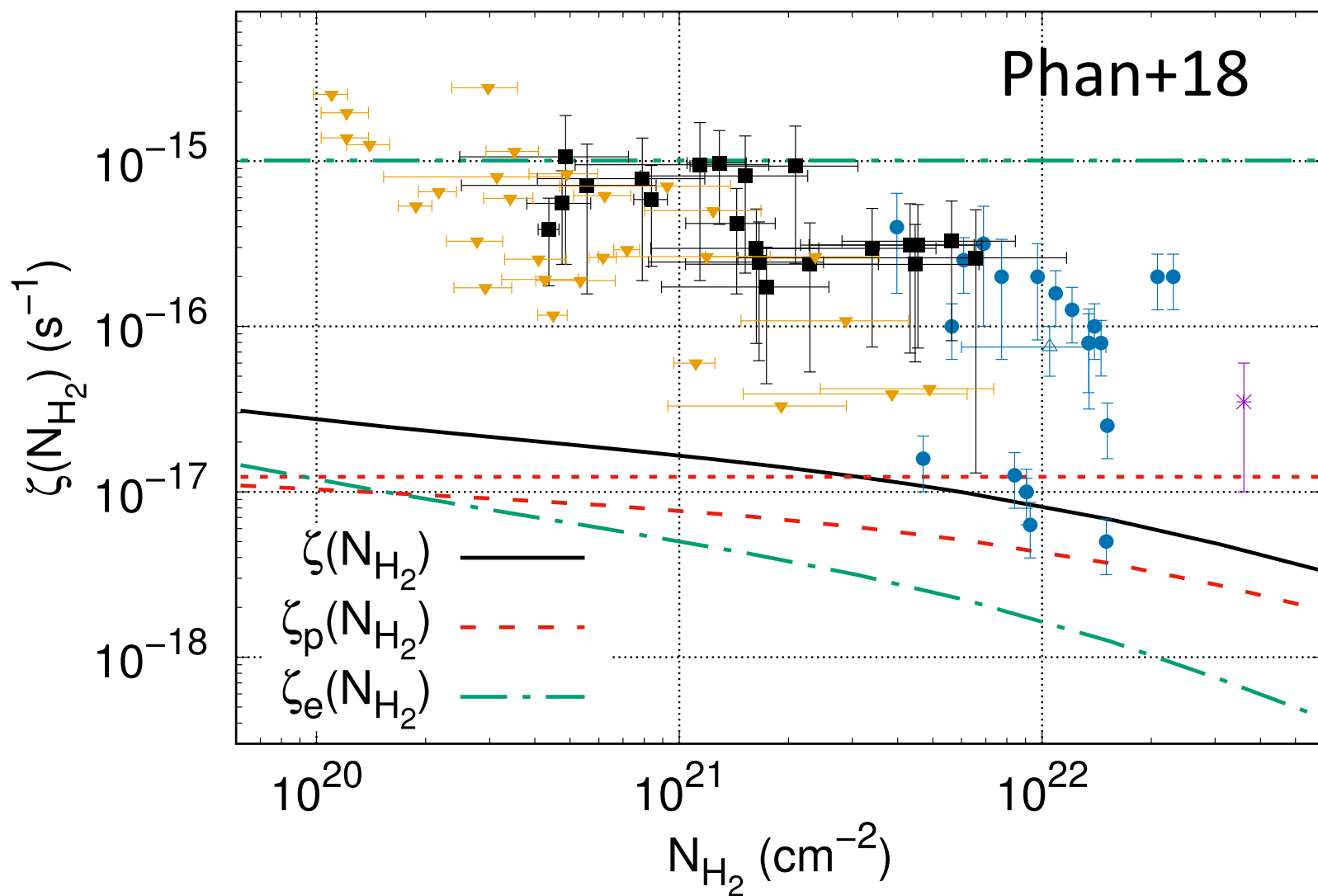


分子雲の宇宙線電離率：観測 vs 理論

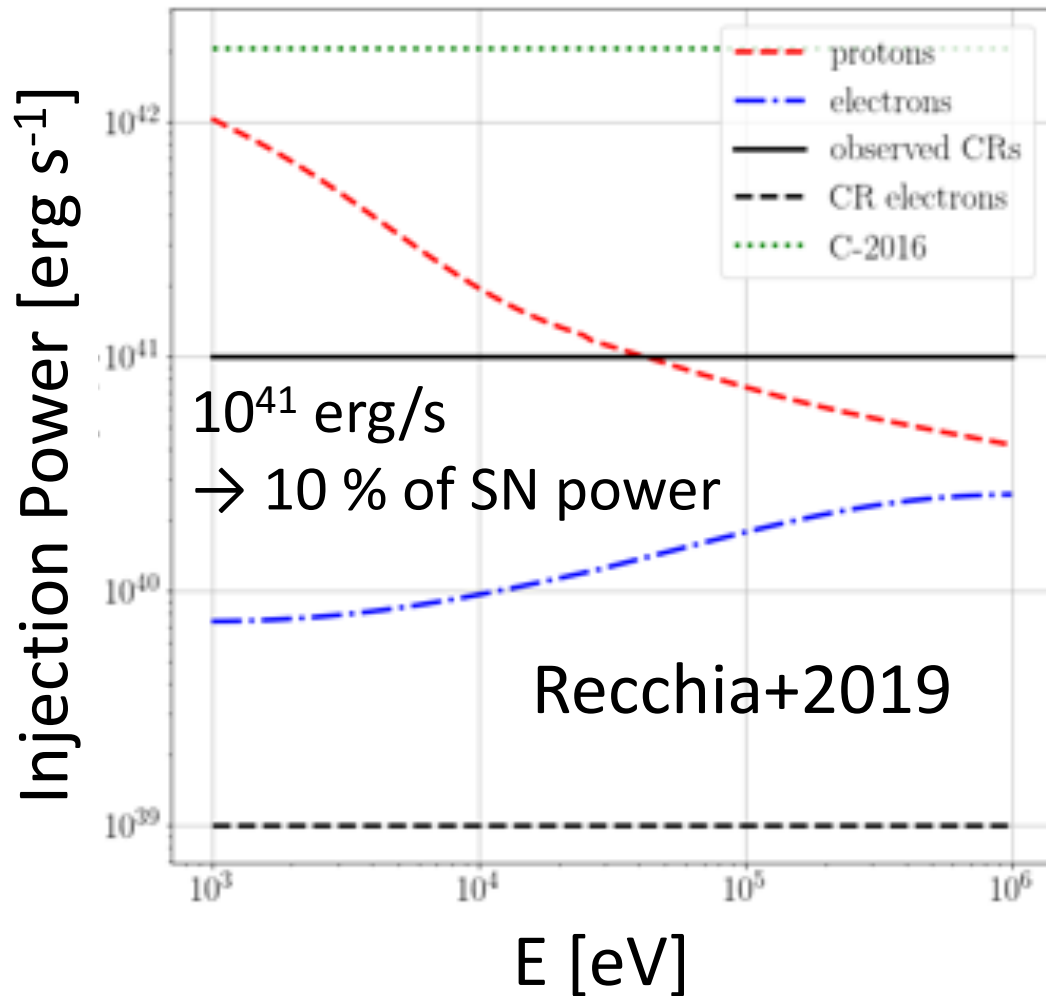


- ❑ Voyager 1 が太陽系“外”に進出したことで，外の宇宙線量が初めて分かった。
- ❑ これが銀河の代表値と仮定すると，宇宙線電離率は $\approx 10^{-17} \text{ s}^{-1}$ is predicted となり，観測を説明できない (Cumplings+16, Phan+18).

分子雲の宇宙線電離率：観測 vs 理論



分子雲の宇宙線電離率：観測 vs 理論



より低いエネルギーの宇宙線 (<MeV) で観測値 $\approx 4 \times 10^{-16} \text{ s}^{-1}$ を説明しようとする、**SNのほぼ全てのエネルギー**を低エネルギー宇宙線の生成に費やさないとはいけない。 **(Recchia+2019)**.

* “uniform” ε_{CR} assumed

分子雲の宇宙線電離率：観測 vs 理論

➤ Cooling time of ~ MeV CRs

$$\tau_{\text{loss,p}}(E) \approx 6 E_{\text{keV}}^{4/3} \text{ yr} \quad \text{for } E \text{ in } 1 \text{ keV} - 1 \text{ MeV}$$

$$\tau_{\text{loss,e}}(E) \approx 3 \times 10^2 E_{\text{keV}} \text{ yr} \quad \text{for } E \text{ in } 1 \text{ keV} - 1 \text{ MeV}$$

Assumed spectrum $f(E) = A\delta(E - \tilde{E})$, Required power $P(\tilde{E}) = \frac{A(\tilde{E})\tilde{E}V_{\text{disc}}}{\tau_{\text{loss}}(\tilde{E})}$.

低エネルギー宇宙線はISMの荷電粒子とのクーロン散乱で冷える。

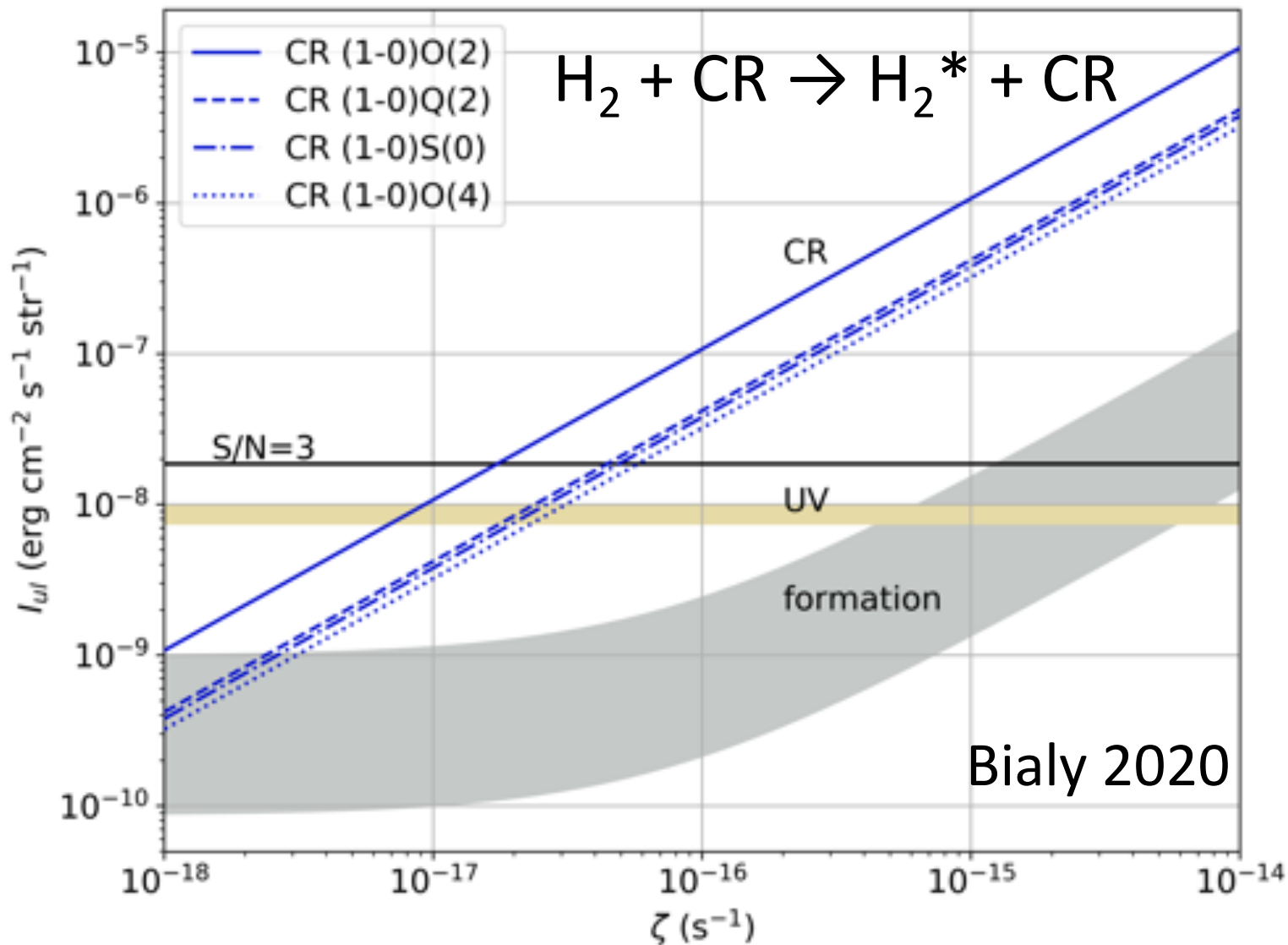
→ 要求される注入エネルギーが増える。

分子雲の中に未知の源があるのだろうか？

(Yang+14; Recchia+19)

分子雲の宇宙線電離率： 新しい測定法の提案 by VLT X-shooter

H₂ line intensity in $\sim\mu\text{m}$ bands



分子雲の宇宙線電離率： 新しい測定法の提案 by VLT X-shooter

宇宙線電離率が高いことは

$\varepsilon_{\text{CR}} > 1 \text{ eV/cc}$ for $\sim\text{GeV}$ CRsを示唆する？

- 分子雲中で $\sim\text{MeV}$ CRsを作るのが必要なのか？
→ 具体的な天体・生成メカニズムは？
- **SNが起源だと思って星形成率の増減で説明する？**
→ **実際のところ、どれだけ生成されるのか？**
- 分子雲の周りでの宇宙線の振る舞いは特殊？
→ 磁場が著しく乱れているといいのか？
- 分子雲の形成過程がヒント？
→ ガスを掃き集めるときに宇宙線も集める？

Supernova Remnant (SNR)



γ -ray: electron or proton?

X-ray: \sim TeV CR electrons
Supernova ejecta

H α : useful tracer of shock
condition & physics.

SNR 0509-67.5 (Chandra & HST)

Blue: 1.5 – 7.0 keV

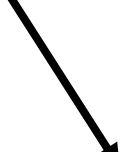
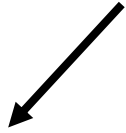
Green: 0.2 – 1.5 keV

Red: H α

**SNR shock は起源の第一候補
である。**

Supernova Remnant (SNR)

γ -ray: electron or **proton**? $dF_{CR}/dE \sim E^{-p} e^{-E/E_{max}}$

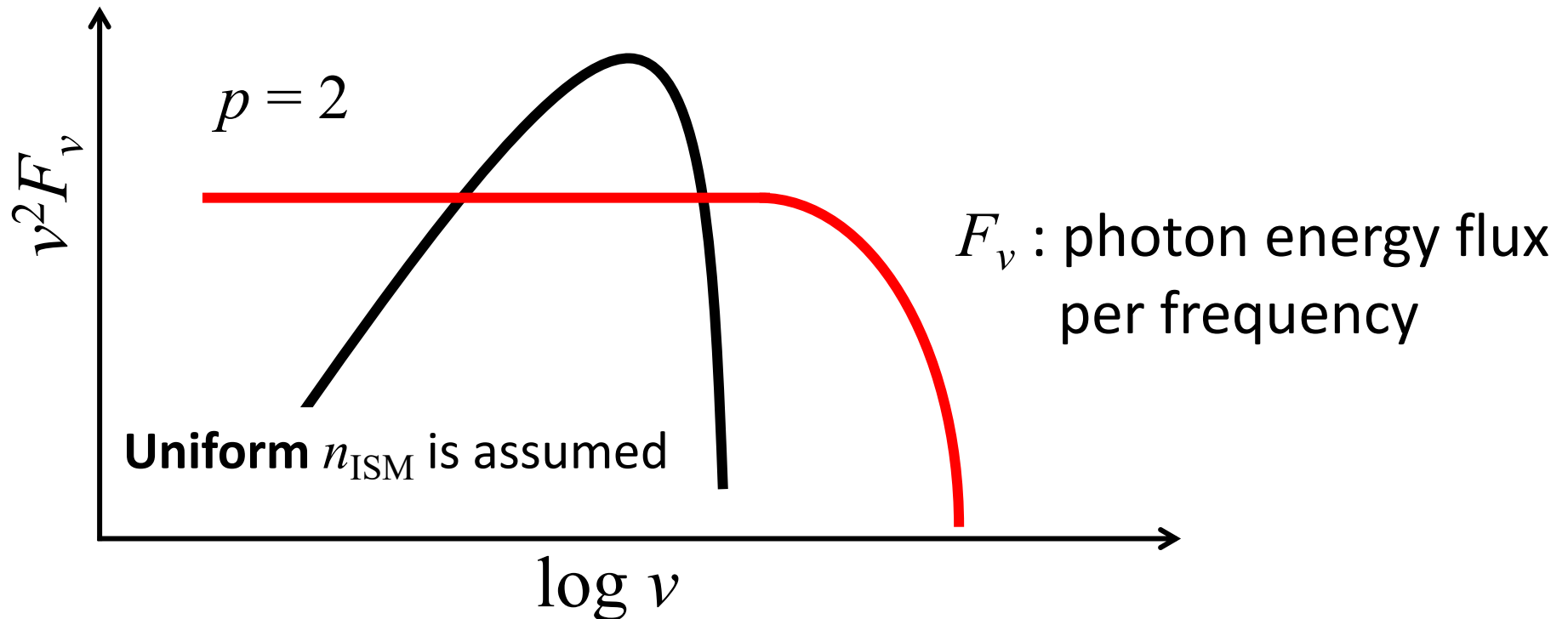


Inverse Compton

$p_{CR} + p_{ISM} \rightarrow \pi^0 \rightarrow 2\gamma$

$$\nu F_\nu d(\log \nu) \sim \nu^{(3-p)/2}$$

$$\nu F_\nu d(\log \nu) \sim \nu^{1-p}$$

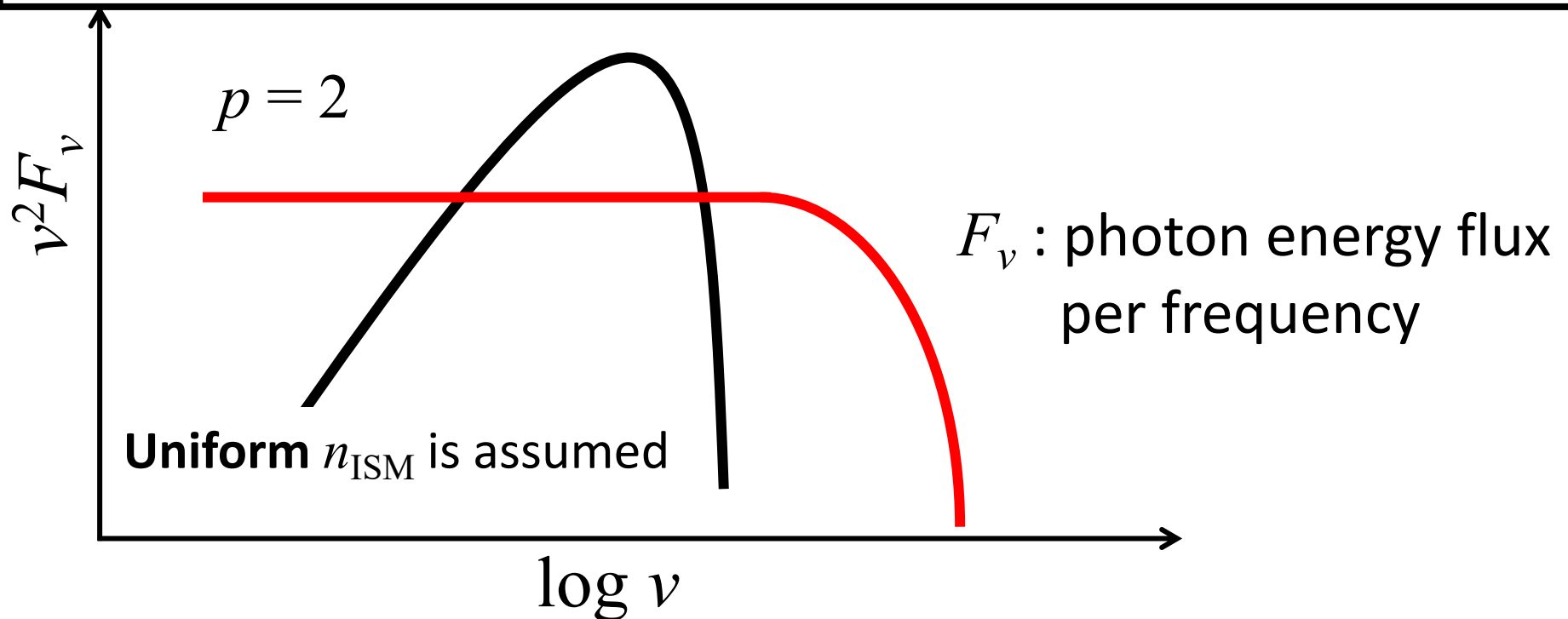


Supernova Remnant (SNR)

γ -ray: electron or proton? $dF_{CR}/dE \sim E^{-p} e^{-E/E_{\max}}$

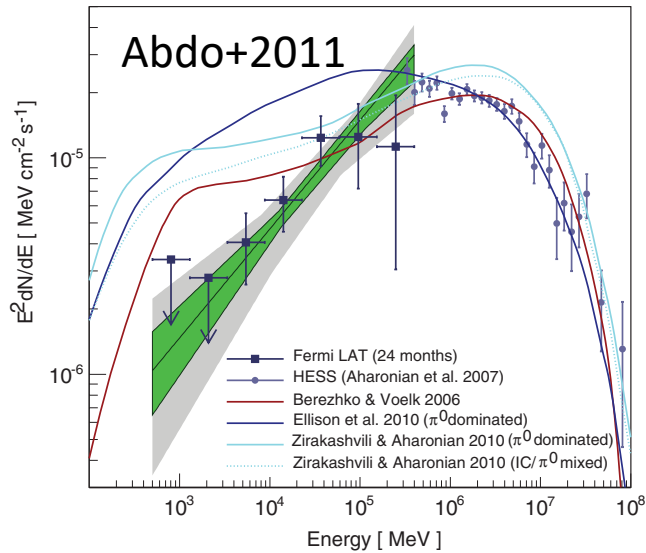
ガンマ線のスペクトルから...

1. 表面輝度から電子と陽子の総量が推定できる。
2. スペクトルの形から加速機構が制限される (スペクトル指数 p & 最高エネルギー E_{\max})



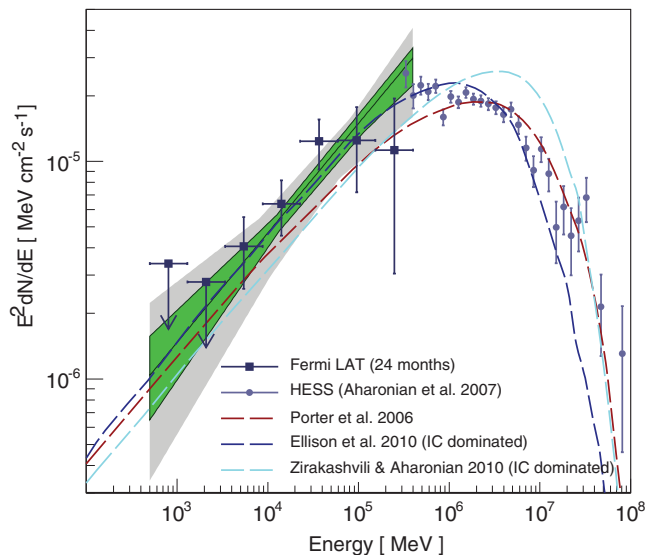
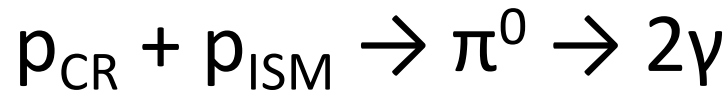
Supernova Remnant (SNR)

γ -ray: electron or proton?



RX J1713.7-3946 の観測例

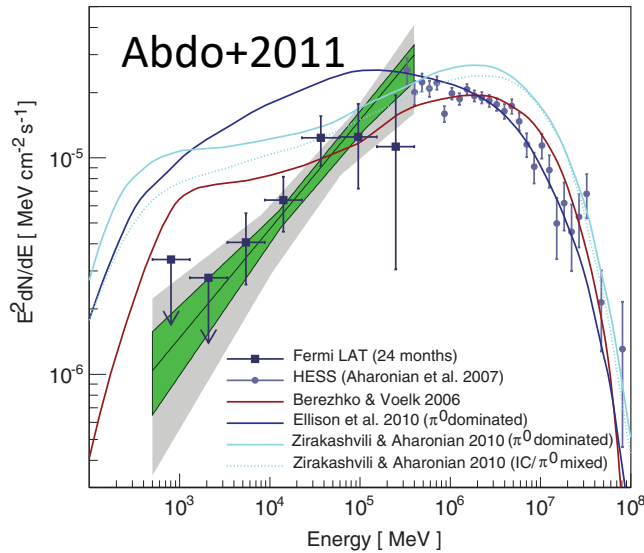
“電子” が支配的な形をしている。
→ 陽子は加速してない???



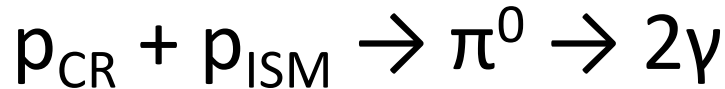
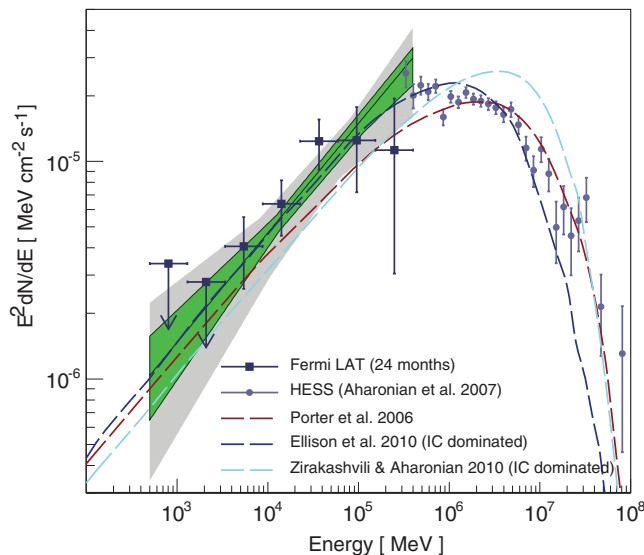
↑
ターゲットのガス密度が空間構造を持つ場合、**電子の場合と似た形になり得る**ことが知られている (Inoue+12; Inoue 19).

Supernova Remnant (SNR)

γ -ray: electron or proton?



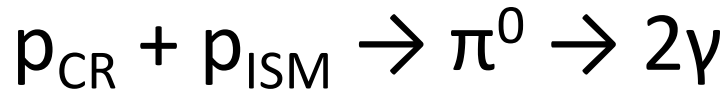
”形”は**ガス密度の空間構造**にも依存する。
→ 加速機構の制限には**不定性**が存在する。



↑
ターゲットのガス密度が空間構造を持つ場合、**電子の場合と似た形になり得る**ことが知られている (Inoue+12; Inoue 19).

Supernova Remnant (SNR)

γ -ray: electron or proton?



➤ 表面輝度

$$L_{\nu, \pi^0} \sim F_{\nu} \times 4\pi d^2 \sim 0.1 \varepsilon_{\text{CR}} V n_{\text{ISM}} \sigma c$$

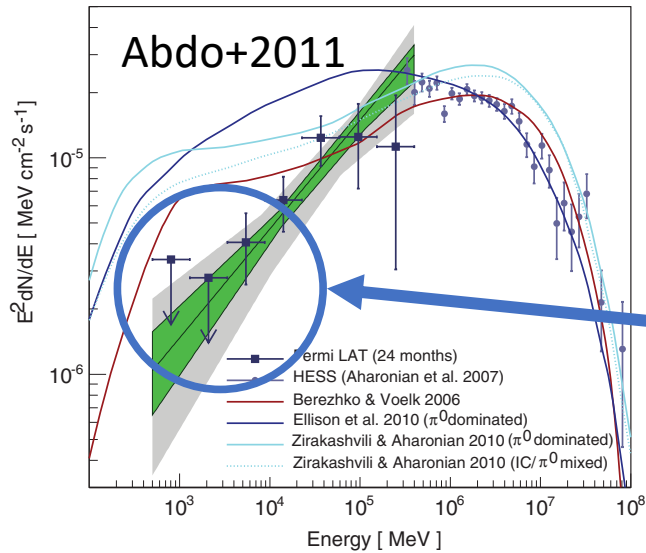
”正確な” 距離 d と 密度 n_{ISM} が必要だが ...

e.g.) RX J1713.7-3946

1. Caswell et al. 1975 : $d \sim 10$ kpc (H_I absorption)
2. Fukui et al. 2003: $d \sim 1$ kpc (CO emission)
3. Wang et al. 2020: $d \sim 5$ kpc (red crump stars)
(arXiv2005.08270)

Supernova Remnant (SNR)

γ -ray: electron or proton?

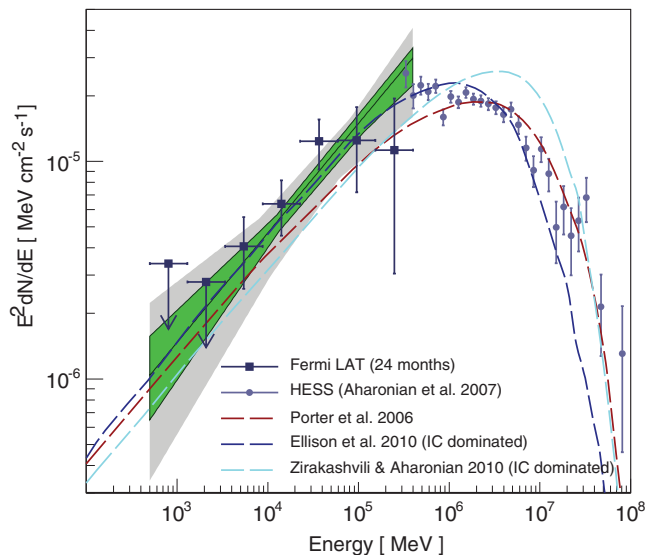


RX J1713.7-3946 の観測例
(one of the brightest SNR?)

For \sim GeV CRs (Abdo+11)

$$\varepsilon_{\text{CR}} V < 0.3 \times 10^{51} \text{ erg}$$

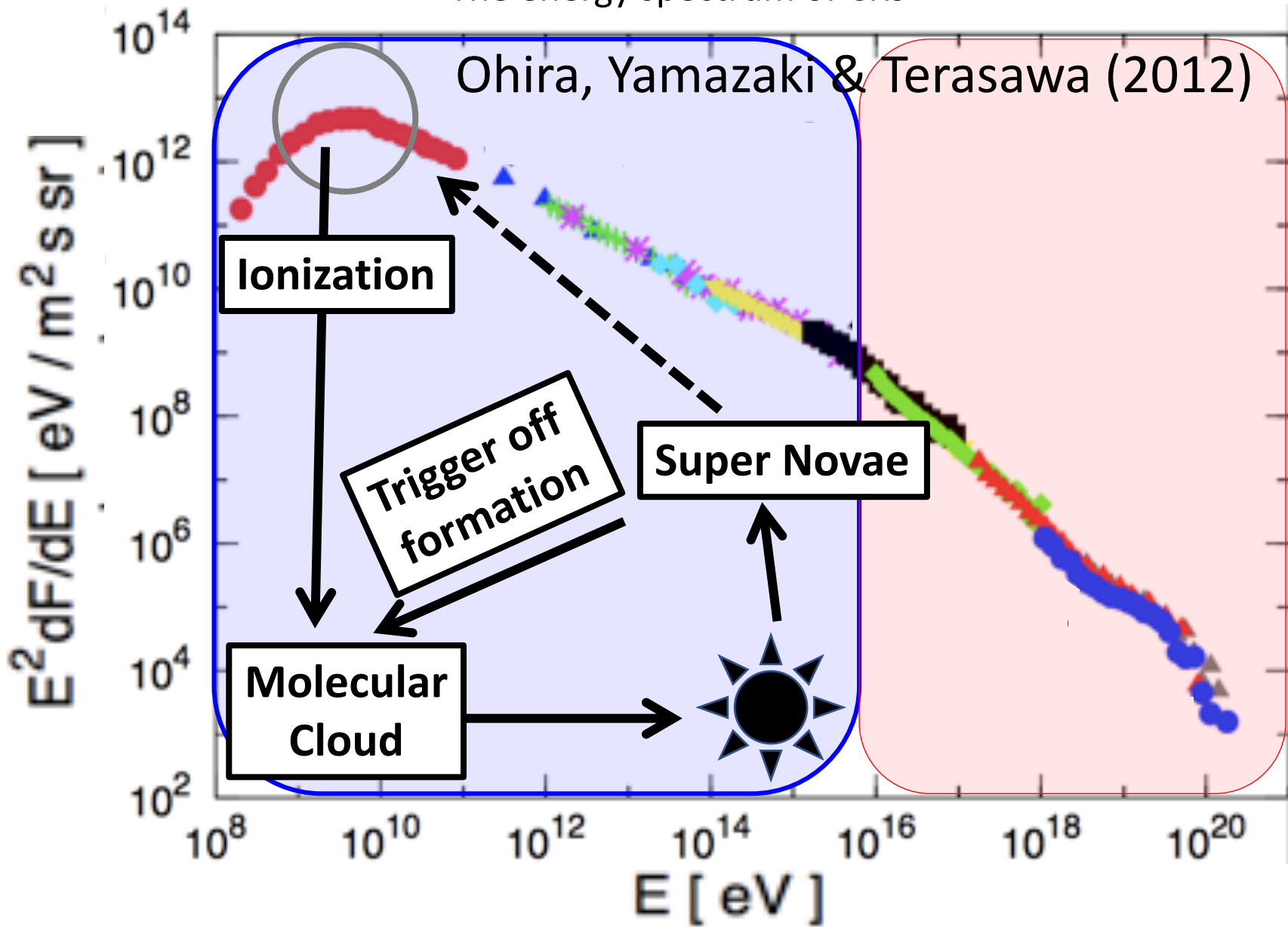
$$(n_{\text{ISM}} / 0.1 \text{ cm}^{-3})^{-1} (d / 1 \text{ kpc})^2$$



✘ Proton origin is **assumed**.

Cosmic Rays

The energy spectrum of CRs



宇宙物理学での宇宙線の例

1. ISMのエネルギー平衡 (太陽近傍)

CR ~ turbulence ~ B -field ~ thermal ~ 1 eV/cc

→ ガスの運動に影響を与える:

e.g. 銀河風の駆動源 (Breitschwerdt+ 1991)

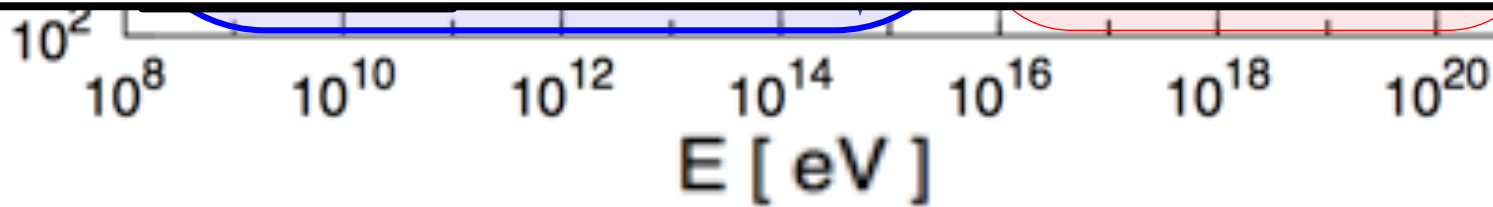
2. 分子雲の電離源

電離ガスは磁場と結合している.

磁場はプラズマ状態に依存して散逸する.

→ 星形成中の磁束と角運動量の再分配 (cf. Inutsuka 2012).

宇宙線の起源は？



宇宙物理学での宇宙線の例

- $\epsilon_{\text{CR}} \sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$ ($\sim \text{GeV CRs}$ が担う)
Supernova が最有力“候補”.
分子雲の電離度は星形成率で説明できるのか?
CR ~ turbulence ~ B-field ~ thermal ~ 1 eV/cc
は銀河(ISM)のどこでも成り立つのか?
- SNRの先行研究
宇宙線の生成率と加速機構は**未説明**.

SNRでの加速機構を解明するための提案：

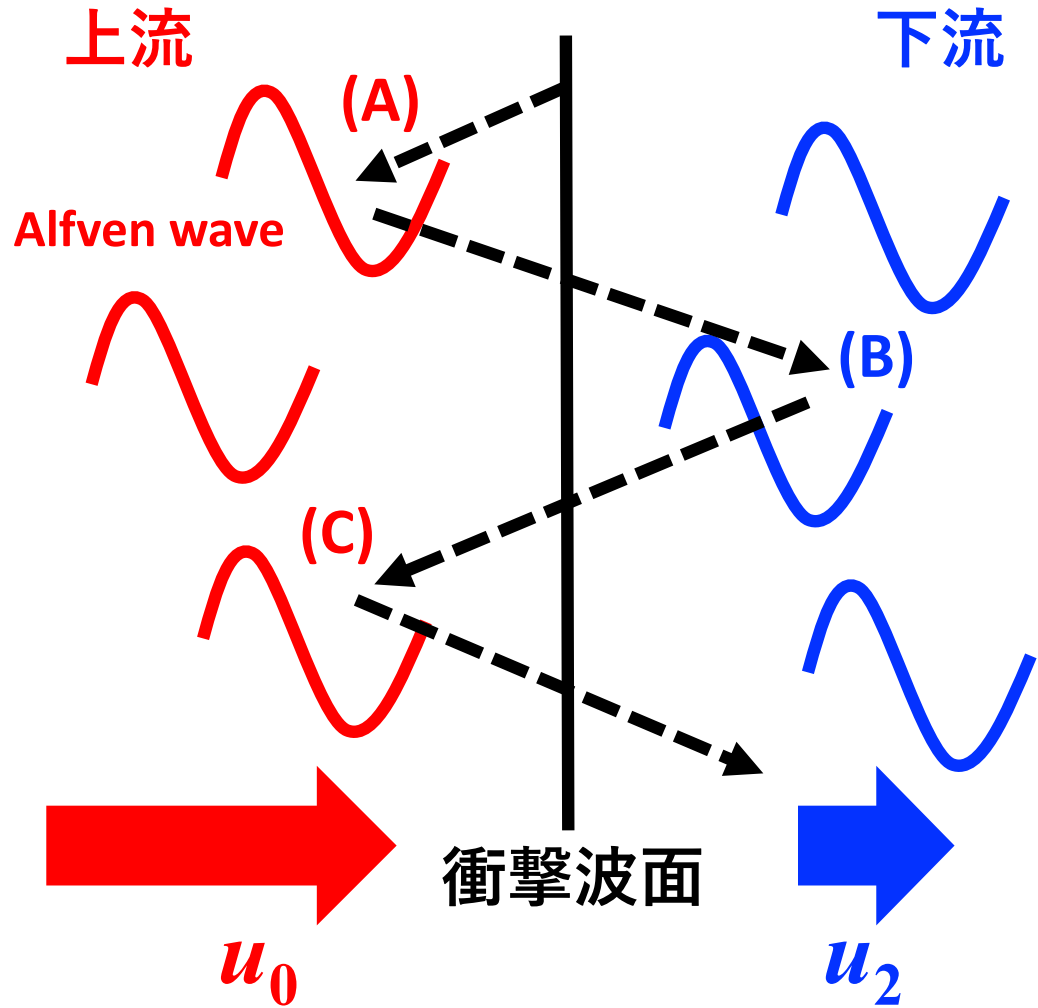
H α の偏光観測が重要である.

Cf. Shimoda et al. 2018

Shimoda & Laming 2019 a, b

E [eV]

Diffusive Shock Acceleration; DSA



Assumption :

- ① "無衝突衝撃波"である。
- ② 衝撃波を往復する高エネルギー粒子が存在する。

"power-law"分布を
予言する。

$$dF_{CR}/dE \sim E^{-p} e^{-E/E_{max}}$$

$$p = 1 + 3u_2 / (u_0 - u_2)$$

Diffusive Shock Acceleration; DSA

Assumption

- 背景の衝撃波構造 ($u_0(r)$ & $u_2(r)$) は宇宙線の反作用効果によって変調する (e.g. Drury & Volk 81; Drury & Falle 86).
- そのような反作用効果の証拠は見つかっていない。
- 宇宙線がどれだけ加速されるかと、どのように振る舞うか (\equiv 拡散係数) を決めることが、宇宙線加速研究の最重要課題の一つである。



u_0

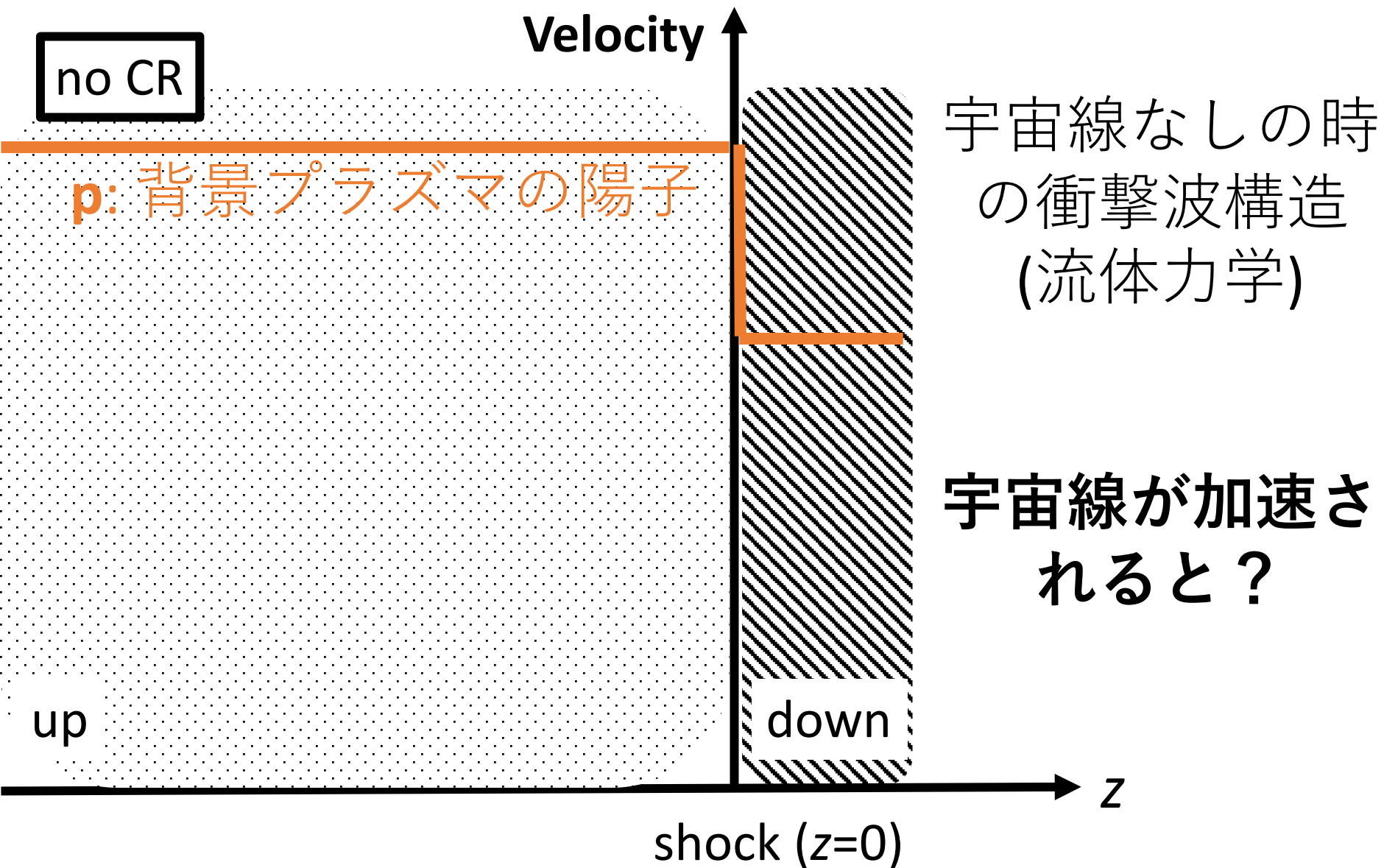
衝撃波面



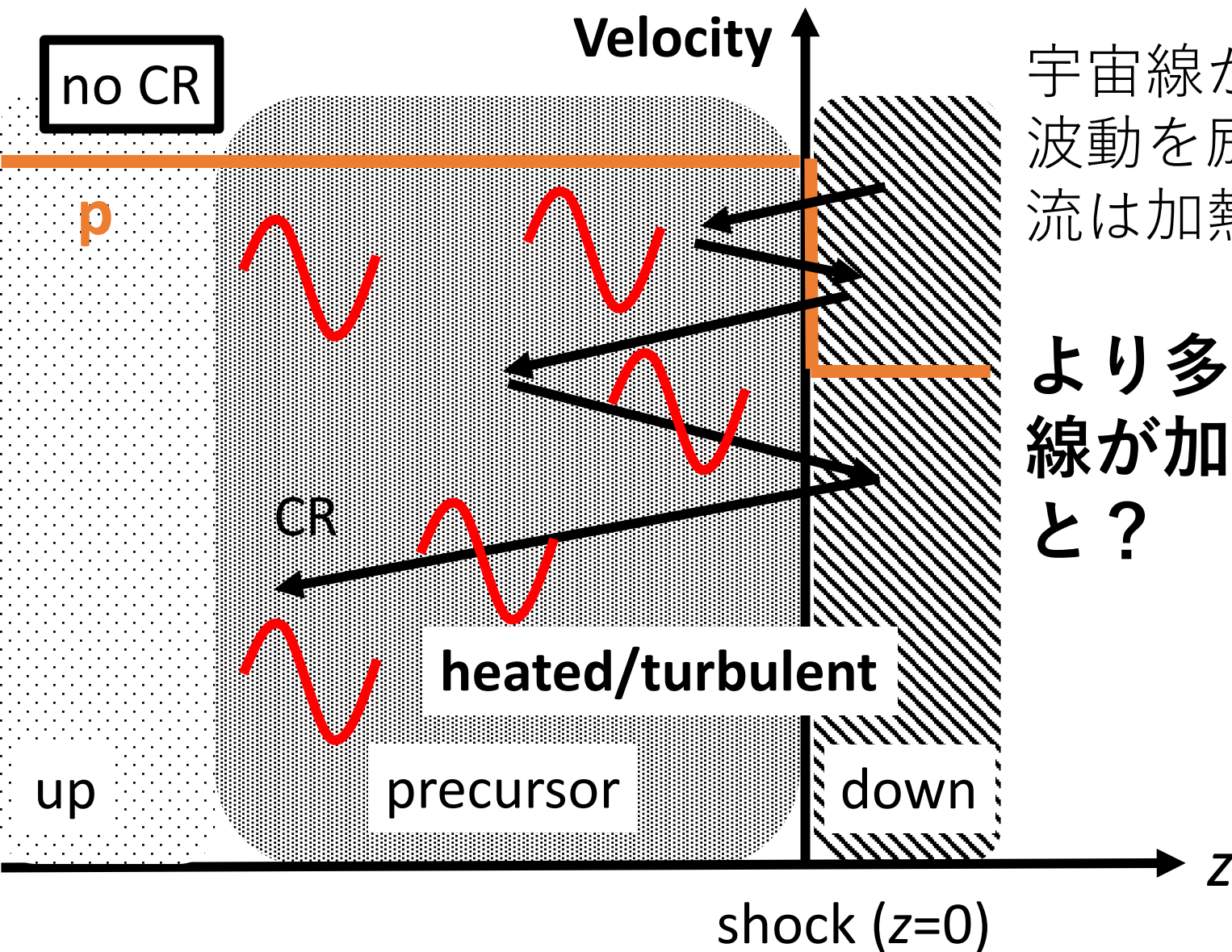
u_2

$$p = 1 + 3u_2 / (u_0 - u_2)$$

宇宙線と衝撃波構造



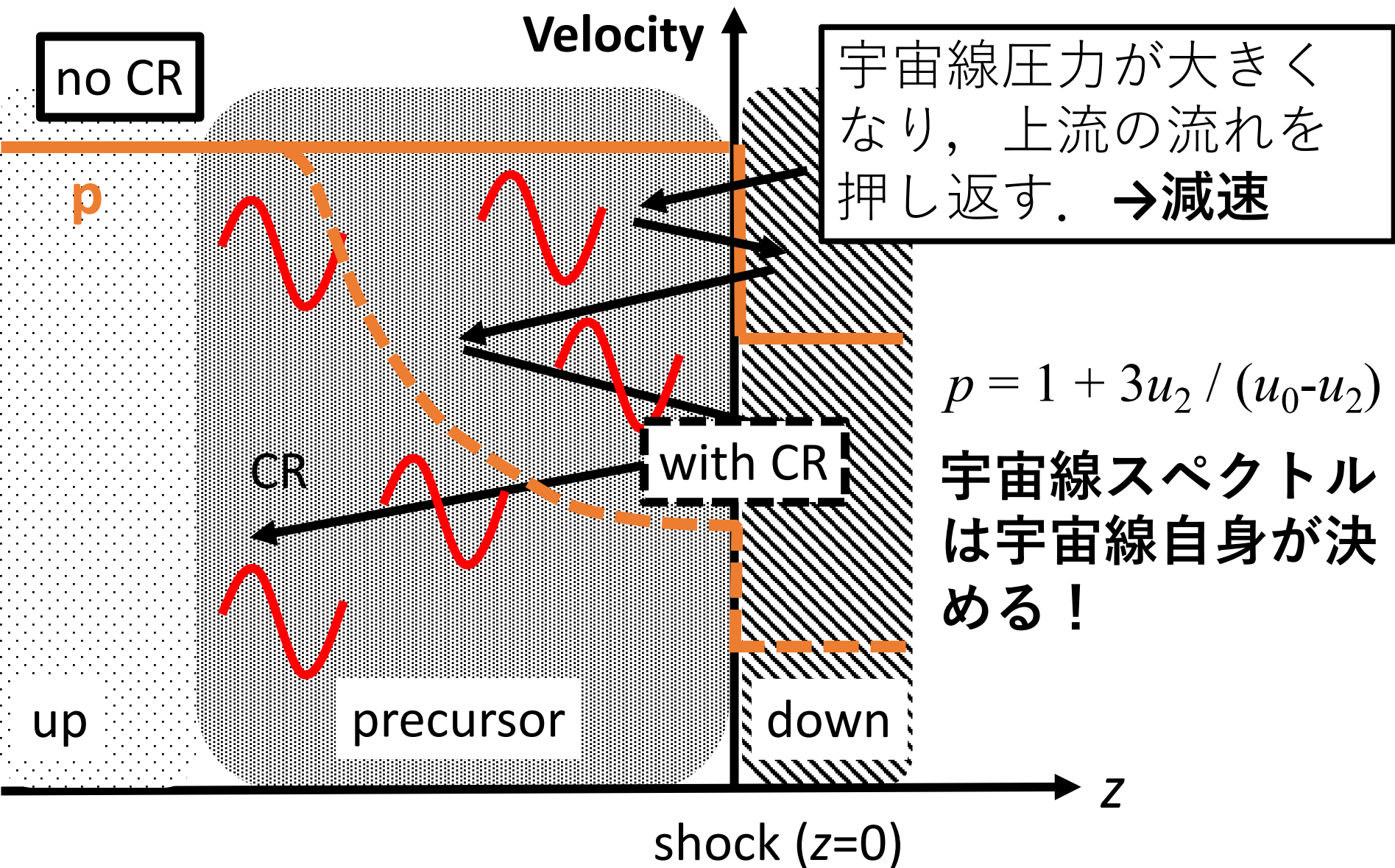
宇宙線と衝撃波構造



宇宙線がプラズマ波動を励起し，上流は加熱される。

より多くの宇宙線が加速されると？

宇宙線と衝撃波構造



宇宙線と衝撃波構造

Velocity ↑

no CR

宇宙線圧力が大きくなり、上流の流れを

- Cosmic Ray Modified Shock (CRMS) という。
- 上流の“加熱” precursor は光電離でも起きる (e.g. Ghavamian+00, Medina+14).
- 「速度変化」を確認して CRMS の証拠を捉えたい。

up

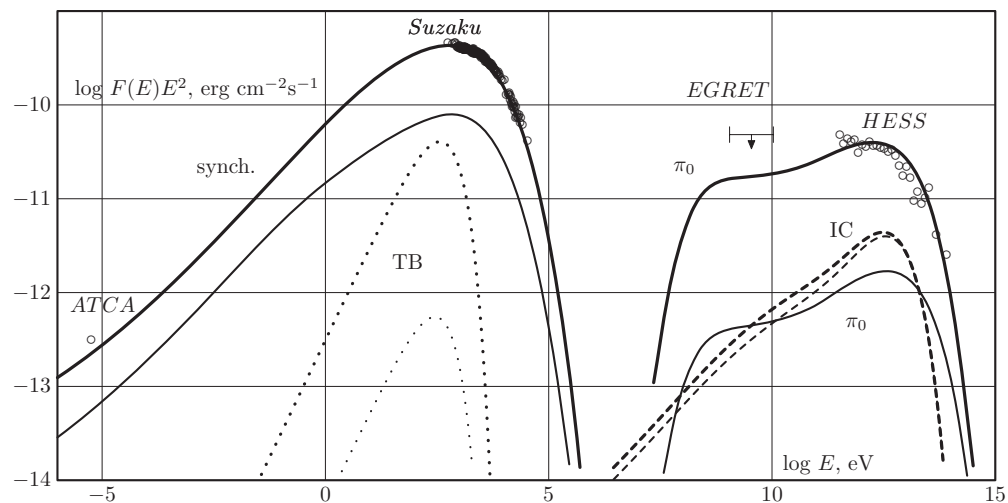
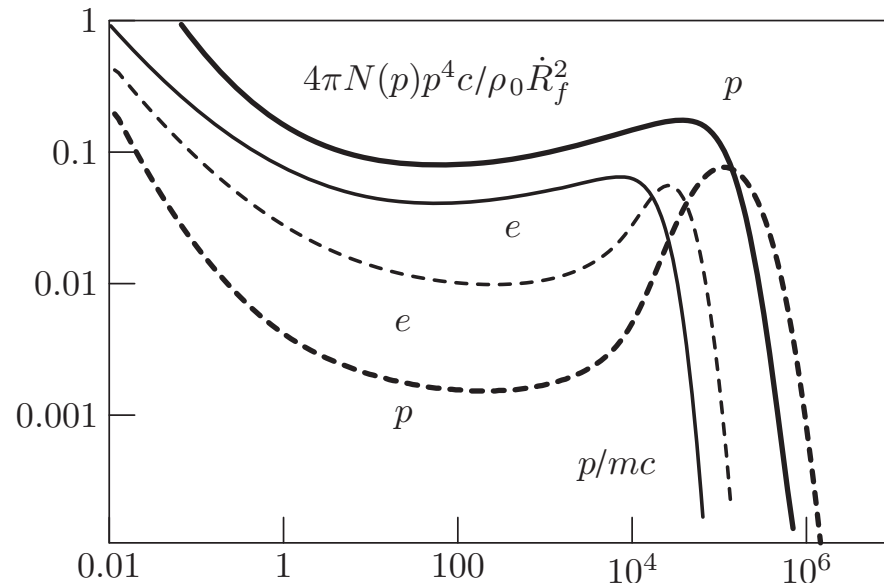
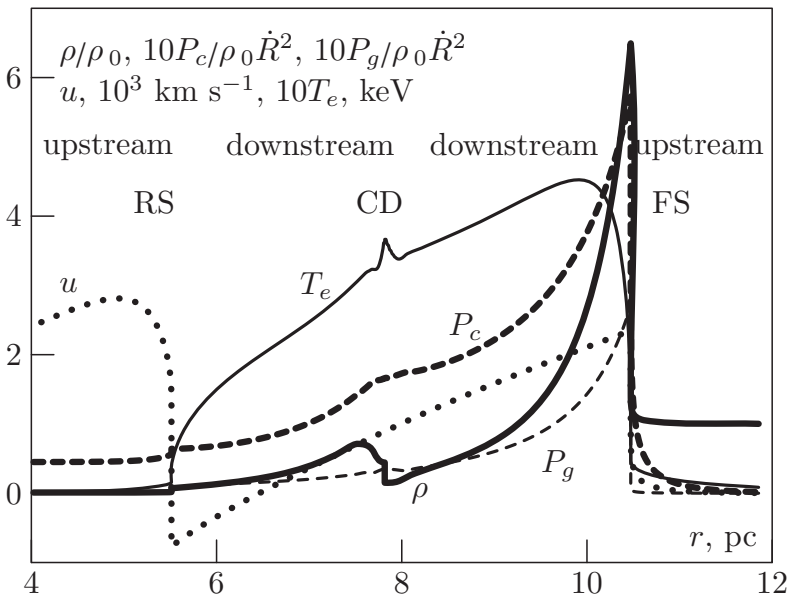
precursor

down

shock ($z=0$)

z

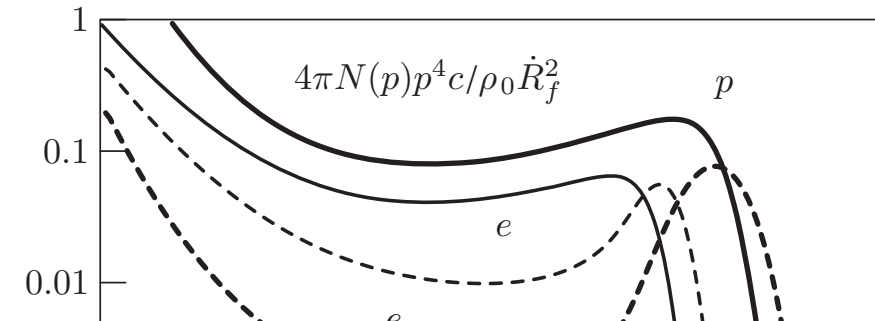
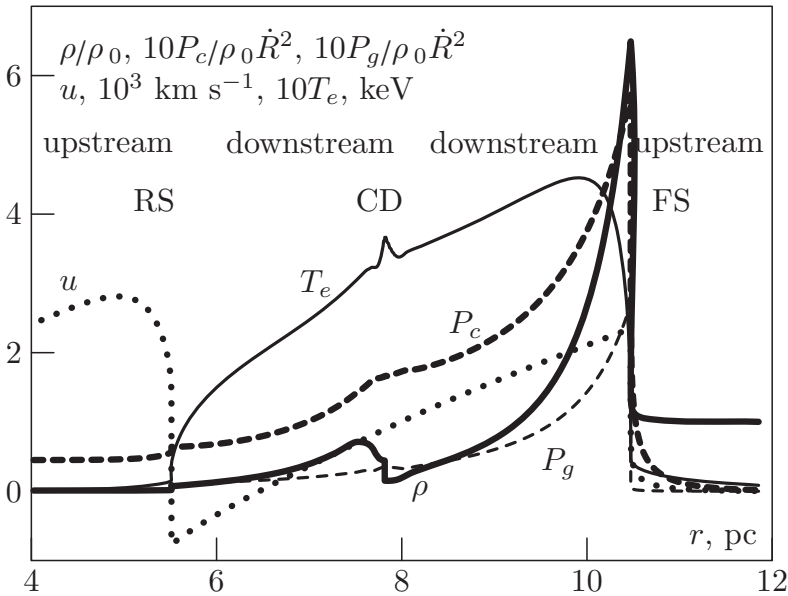
Cosmic-Ray Modified Shock (CRMS)



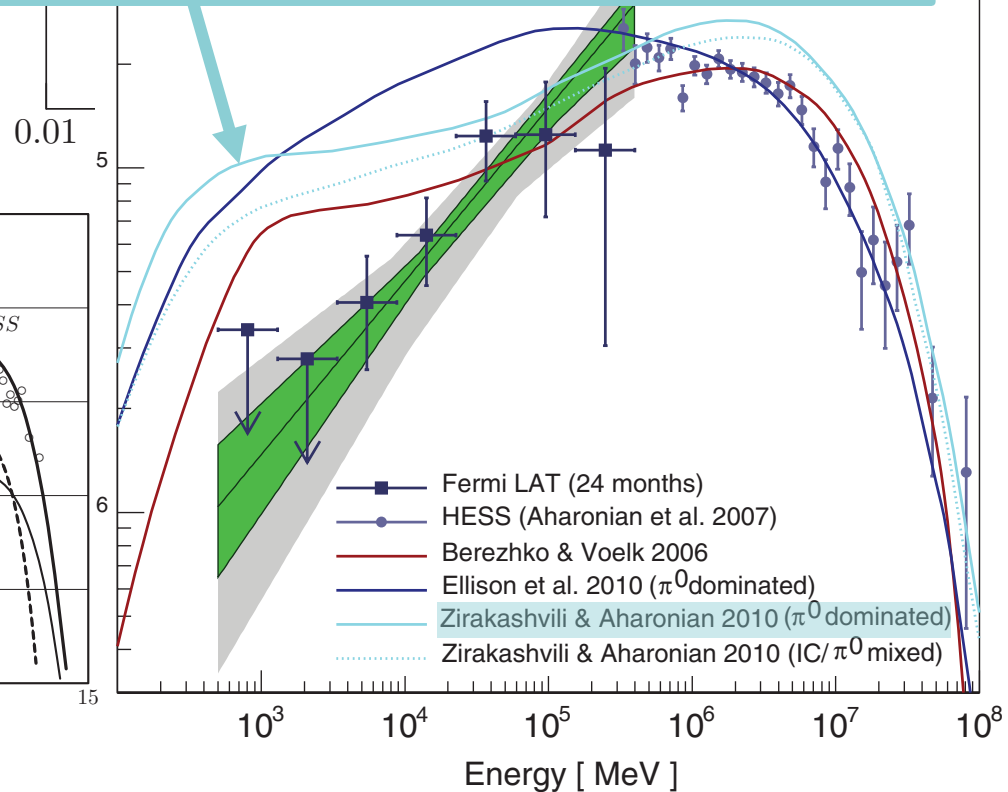
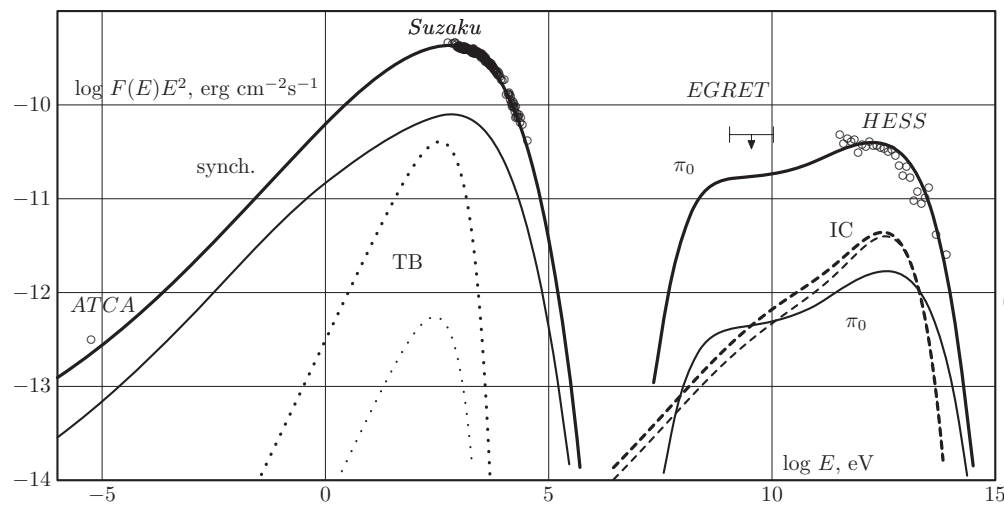
For RX J1713.7-3946

➤ Zirakashvili & Aharonian 2010
 先行研究のガンマ線スペクトルの解釈では、宇宙線圧力が非常に大きい場合を考えている。

Cosmic-Ray Modified Shock (CRMS)

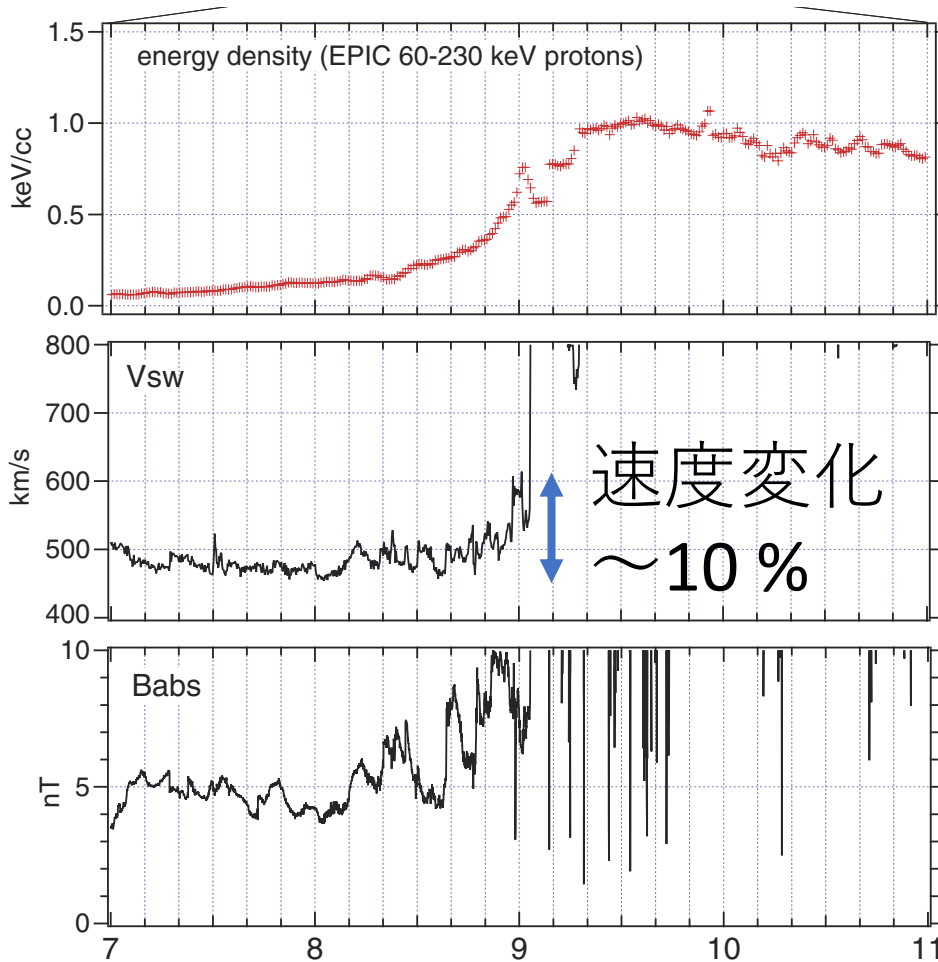


Zirakashvili & Aharonian 2010



For RX J1713.7-3946

Cosmic-Ray Modified Shock (CRMS)



Terasawa 2006

~20 % of shock energy (flux)
converted to non-thermal particles

- 太陽風の「その場観測」で確認済み.

太陽風

$V_{sh} \sim 100$ km/s

$E_{CR} \sim 10$ keV - MeV

$B \sim 10$ μ G ($M_A \sim 5$)

Age \sim day

若いSNR

$V_{sh} > \sim 1000$ km/s

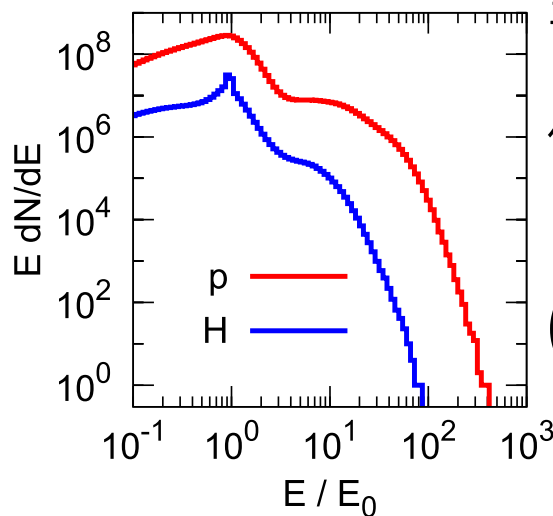
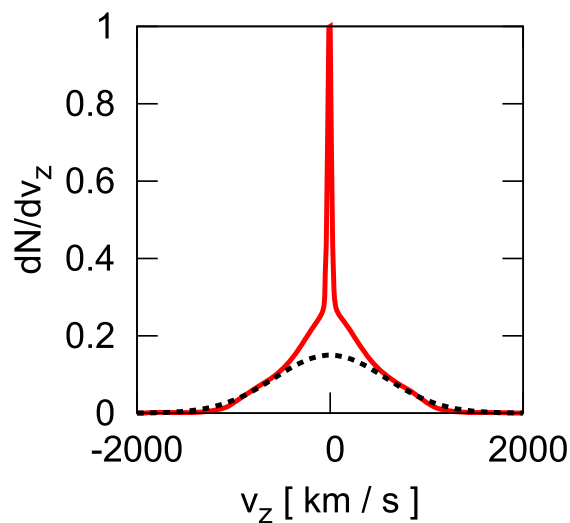
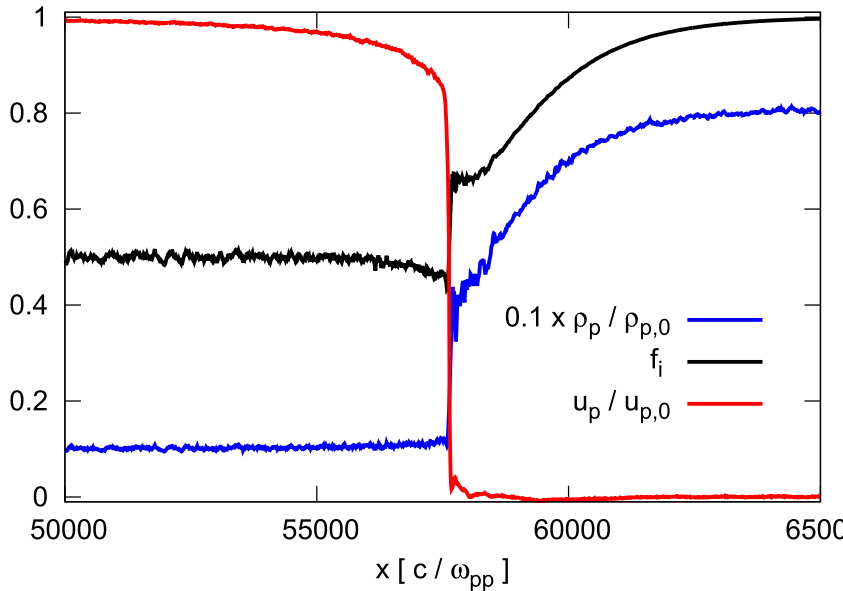
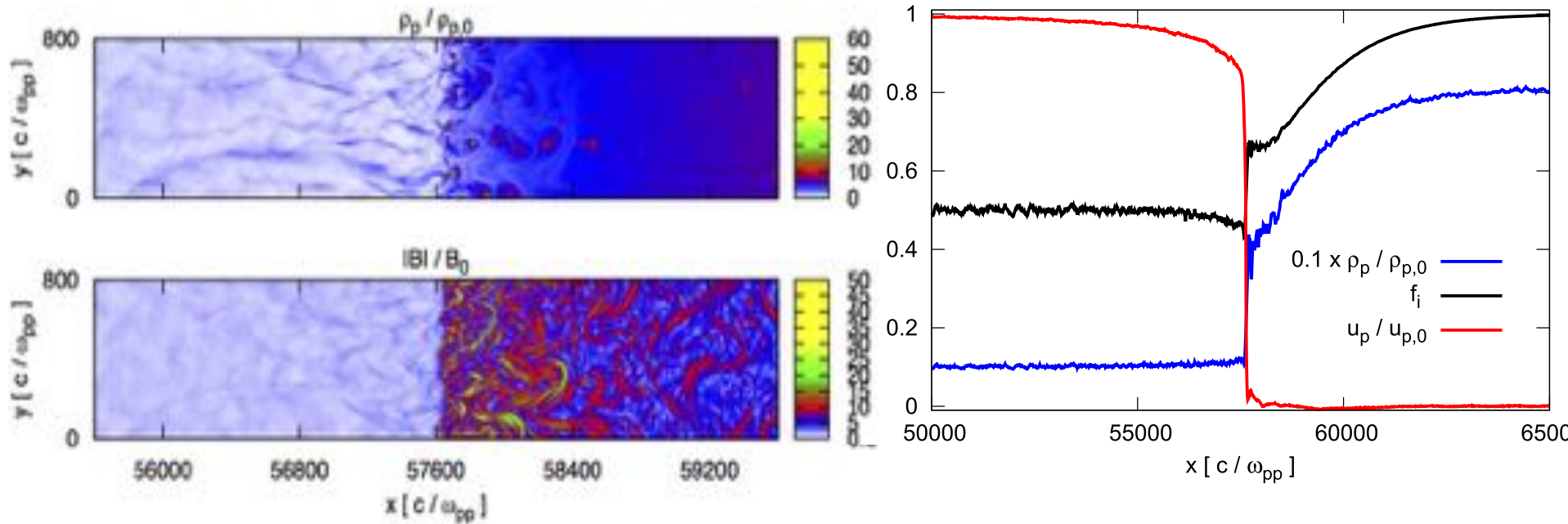
$E_{CR} \sim 1$ GeV - 3 PeV ?

$B \sim 1 - 100$ μ G ?

($M_A \sim 1 - 100$?)

Age $\sim 100 - 1000$ yr.

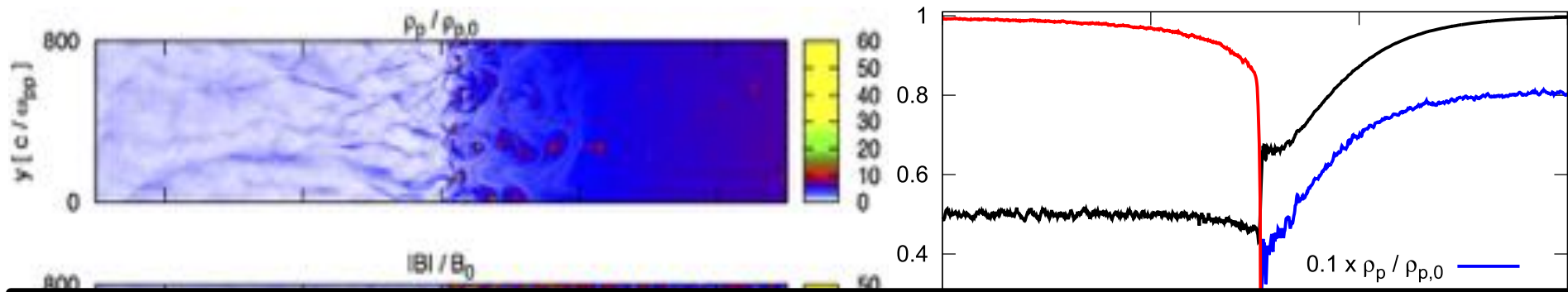
Cosmic-Ray Modified Shock (CRMS)



部分電離プラズマ中を
伝播するSNR衝撃波
のhybrid simulation
(Ohira 16).

Age \sim 1 day

Cosmic-Ray Modified Shock (CRMS)



- 示唆される「速度変化」は $\sim 10\%$.
最低限, これを識別する必要がある.

**SNR(\sim 数kpc)にあるプラズマの $\sim 10\%$ の
速度変化を判別せよ!**

Challenging!

v_z [km/s]

E/E_0

Supernova Remnant (SNR)



From Chandra archival image

γ -ray: electron or proton?

X-ray: \sim TeV CR electrons
Supernova ejecta

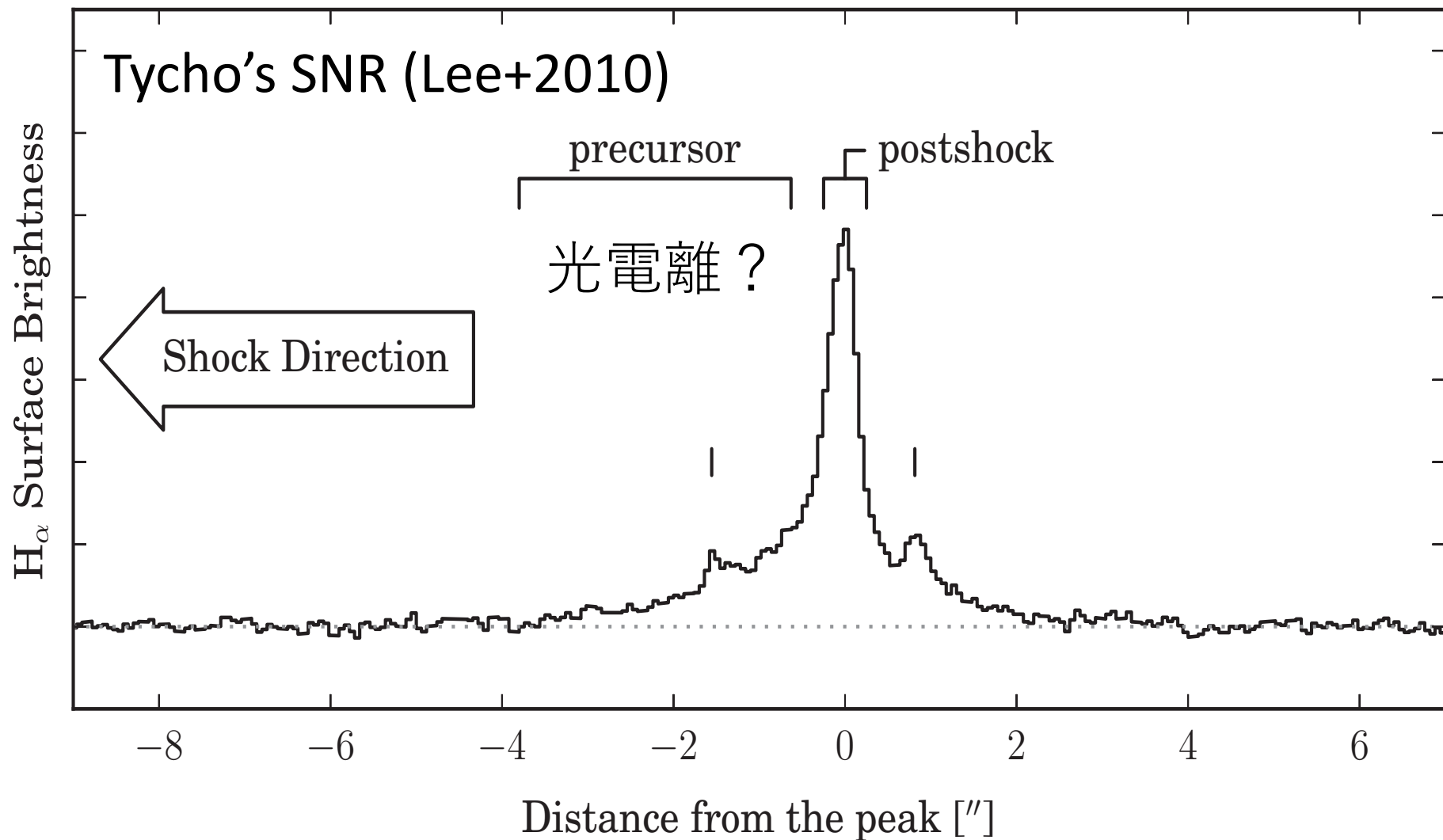
H α : useful tracer of shock condition & physics.

H α は衝撃波周辺のプラズマ状態を反映して光る (e.g. Raymond 91 for review).

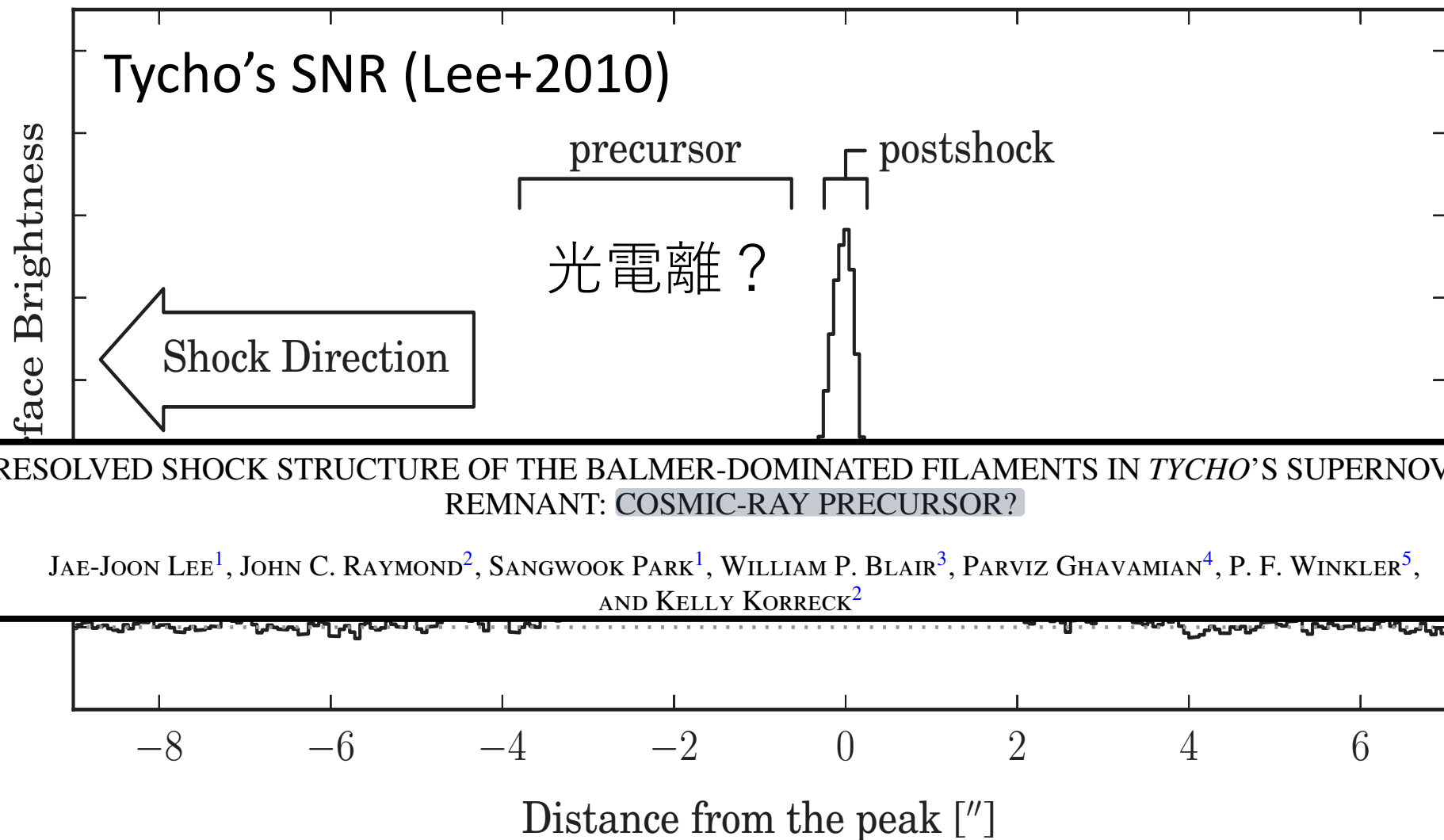
Red: H α

である。

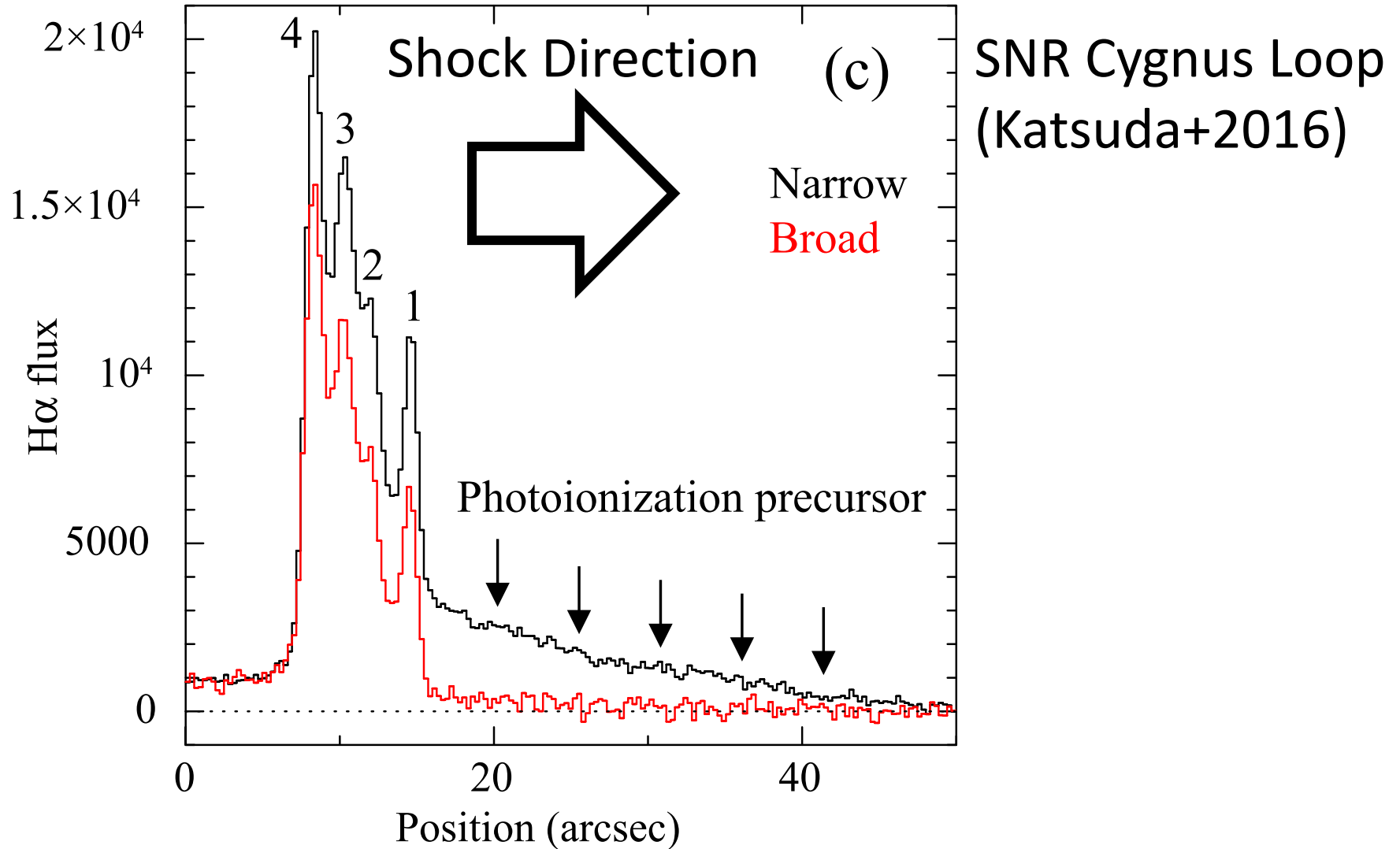
H α emission from upstream



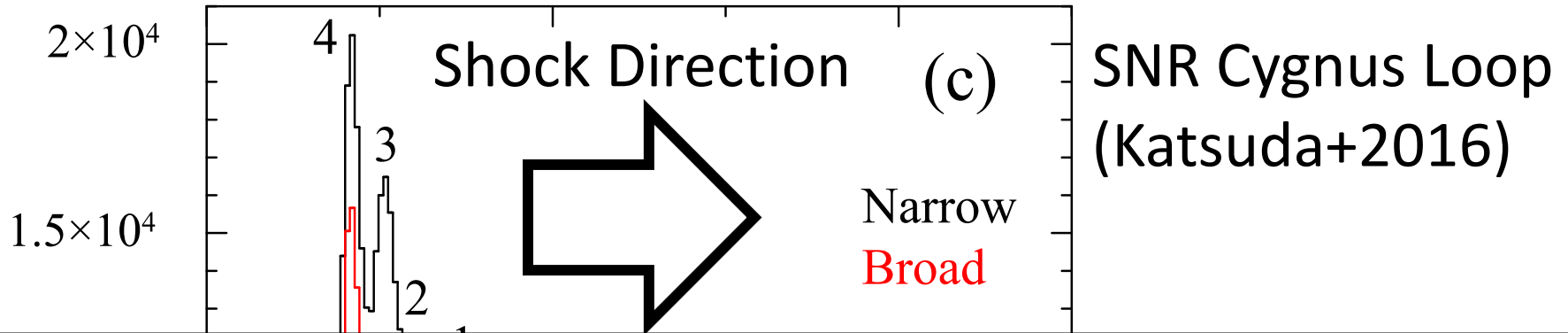
H α emission from upstream



H α emission from upstream

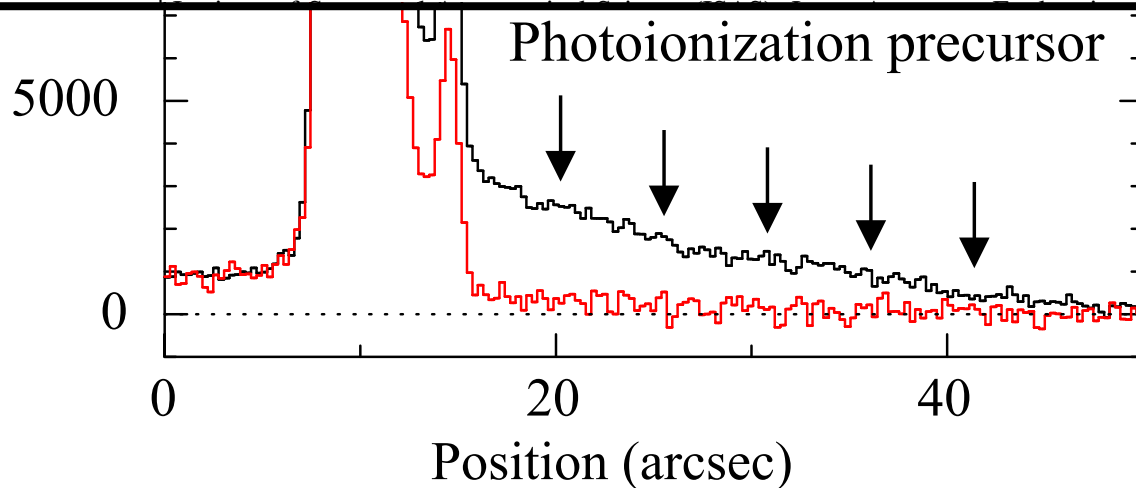


H α emission from upstream

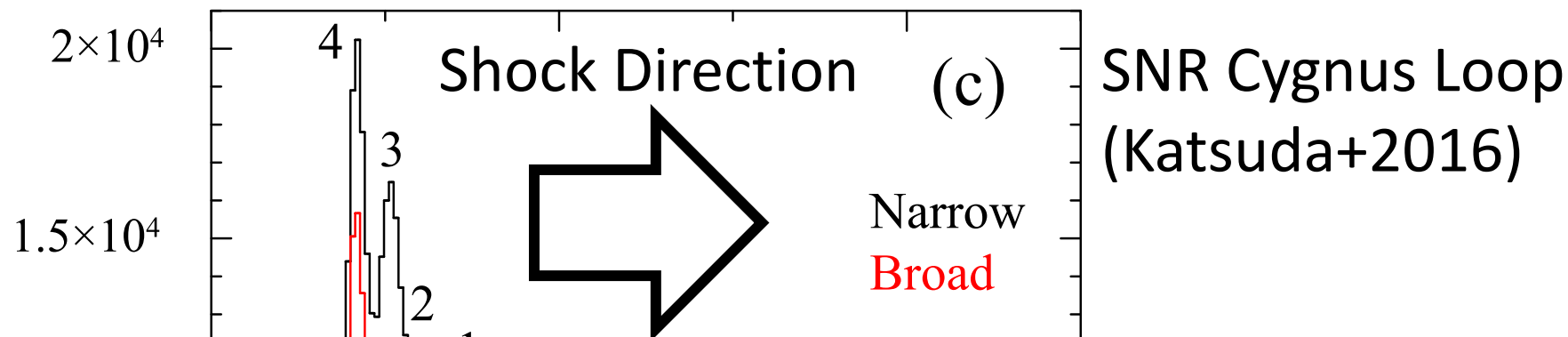


SPATIALLY RESOLVED SPECTROSCOPY OF A BALMER-DOMINATED SHOCK IN THE CYGNUS LOOP:
AN EXTREMELY THIN COSMIC-RAY PRECURSOR?

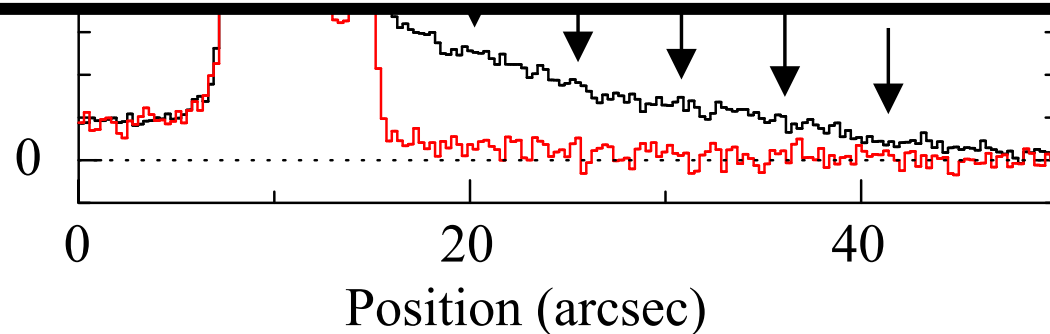
SATORU KATSUDA¹, KEIICHI MAEDA^{2,3}, YUTAKA OHIRA⁴, YOICHI YATSU⁵, KOJI MORI⁶, WAKO AOKI⁷, KUMIKO MORIHANA⁸,
JOHN C. RAYMOND⁹, PARVIZ GHAVAMIAN¹⁰, JAE-JOON LEE¹¹, JIRO SHIMODA⁴, AND RYO YAMAZAKI⁴



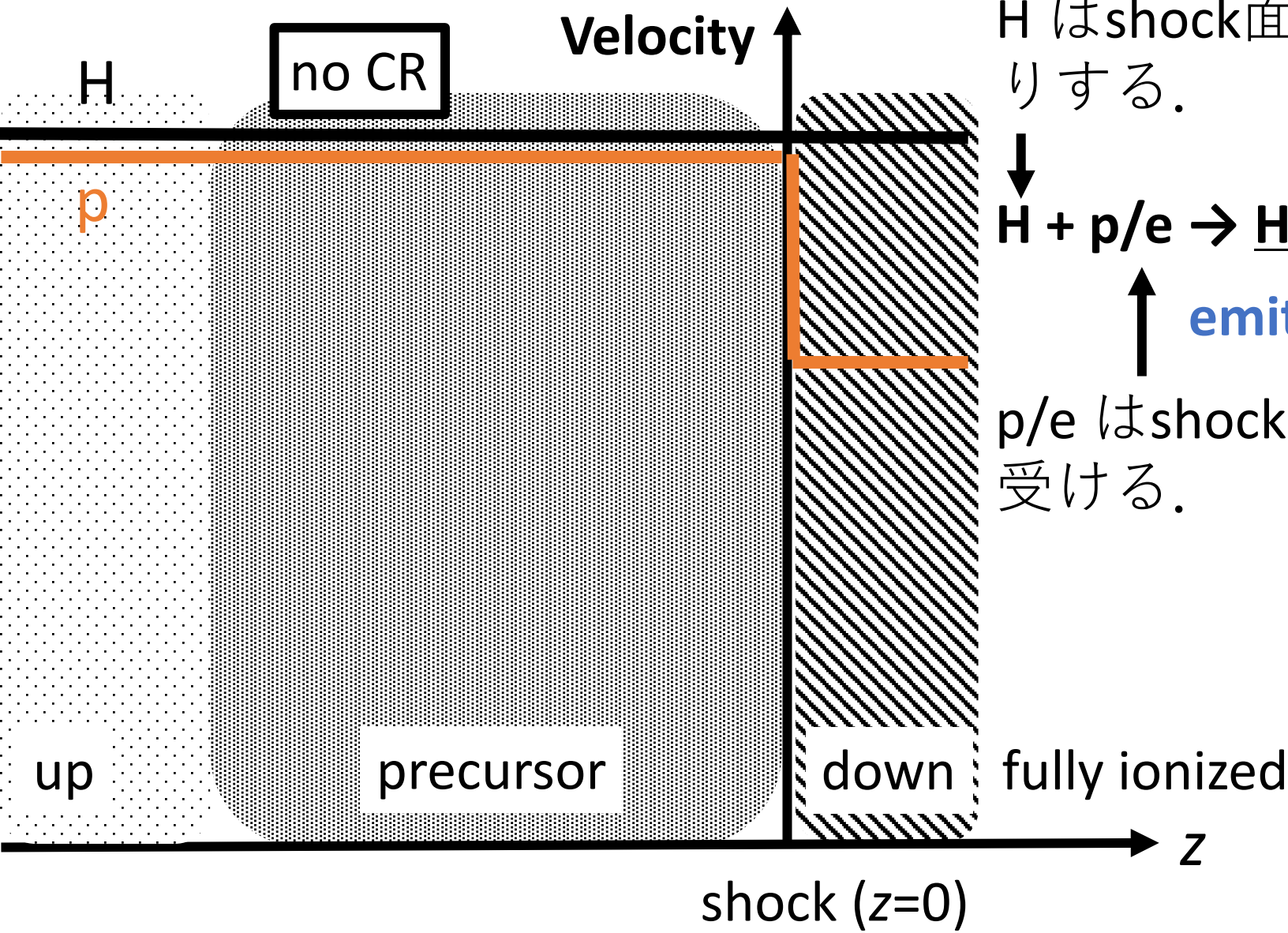
H α emission from upstream



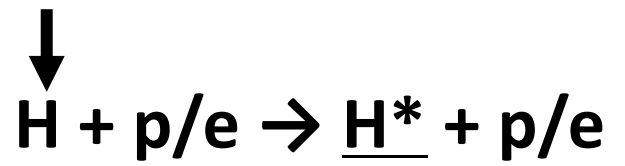
- H α は上流で光っている。
- 「速度変化」があると分かればCRMS.
- H α の理論的な解釈は？



H α emission from upstream



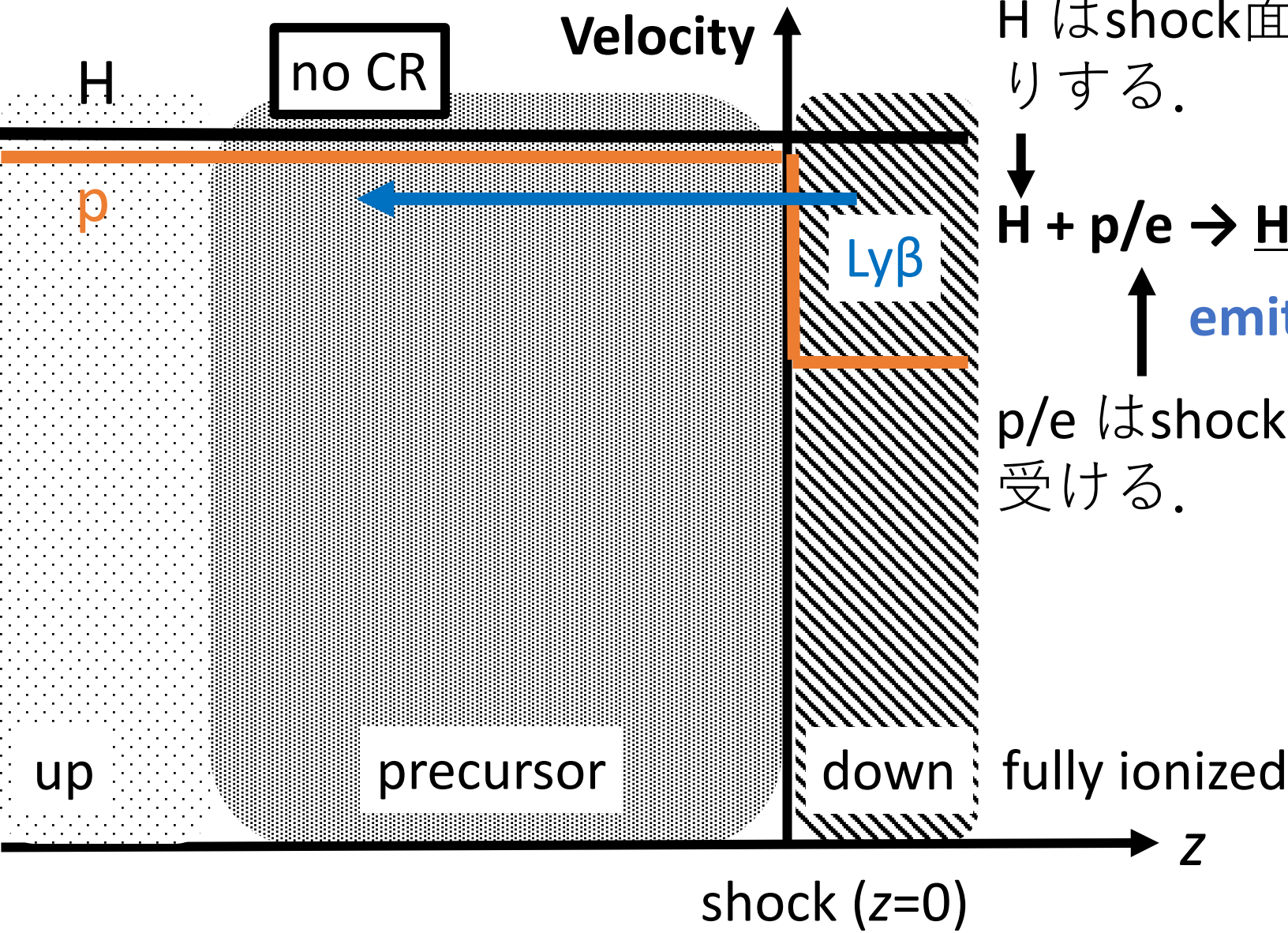
H はshock面を素通りする。



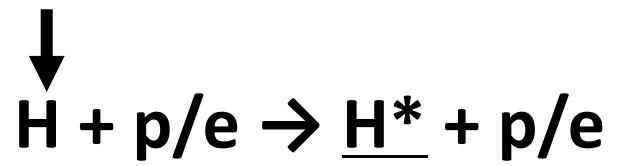
↑ emits Ly β

p/e はshock散逸を受ける。

H α emission from upstream



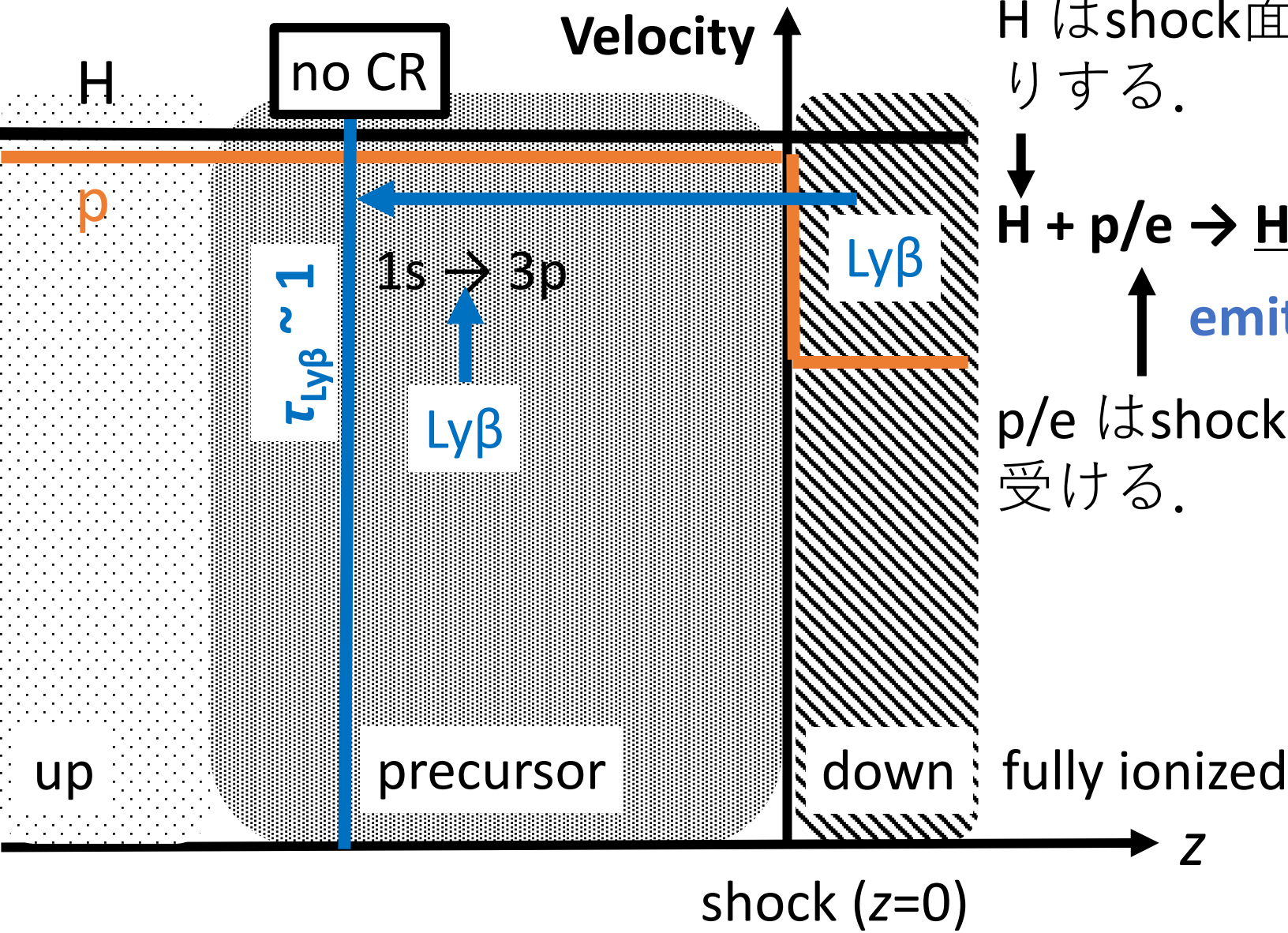
H はshock面を素通りする。



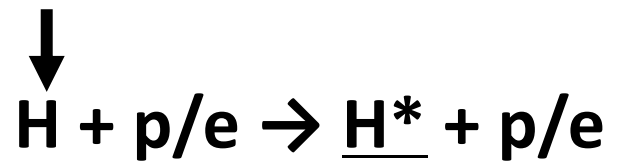
↑ emits Ly β

p/e はshock散逸を受ける。

H α emission from upstream



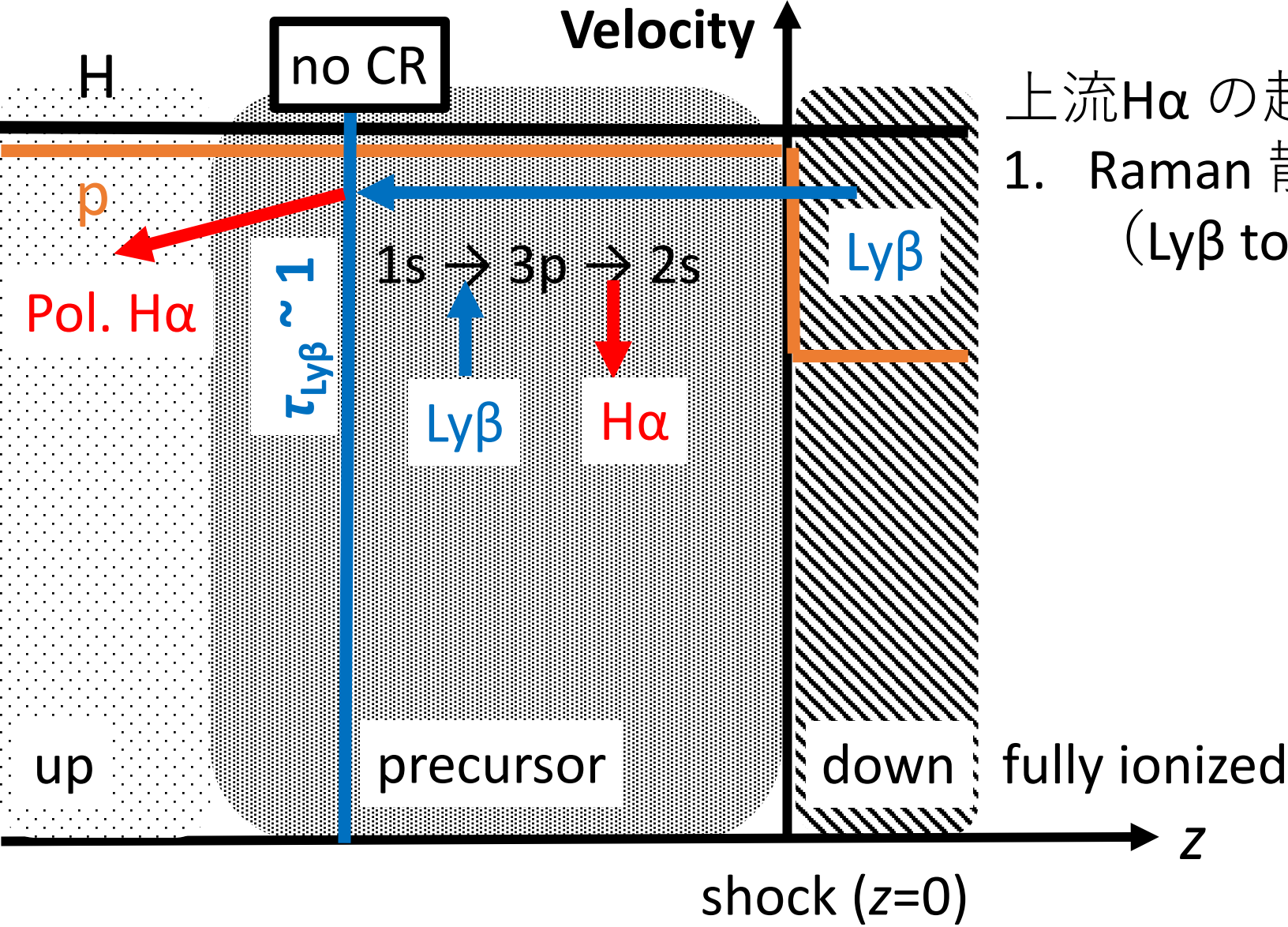
H はshock面を素通りする。



\uparrow emits Ly β

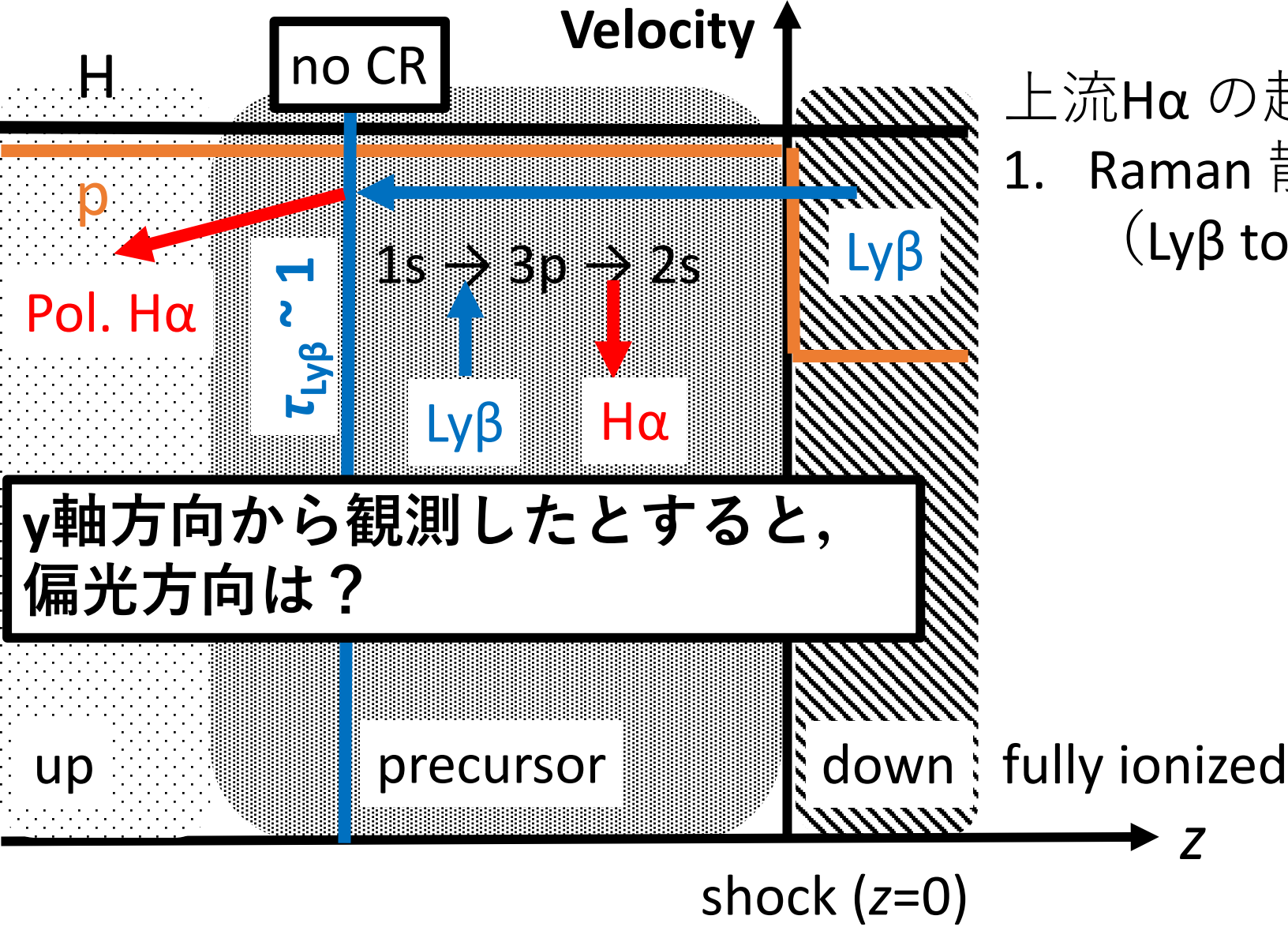
p/e はshock散逸を受ける。

H α emission from upstream



上流H α の起源：
 1. Raman 散乱
 (Ly β to H α) .

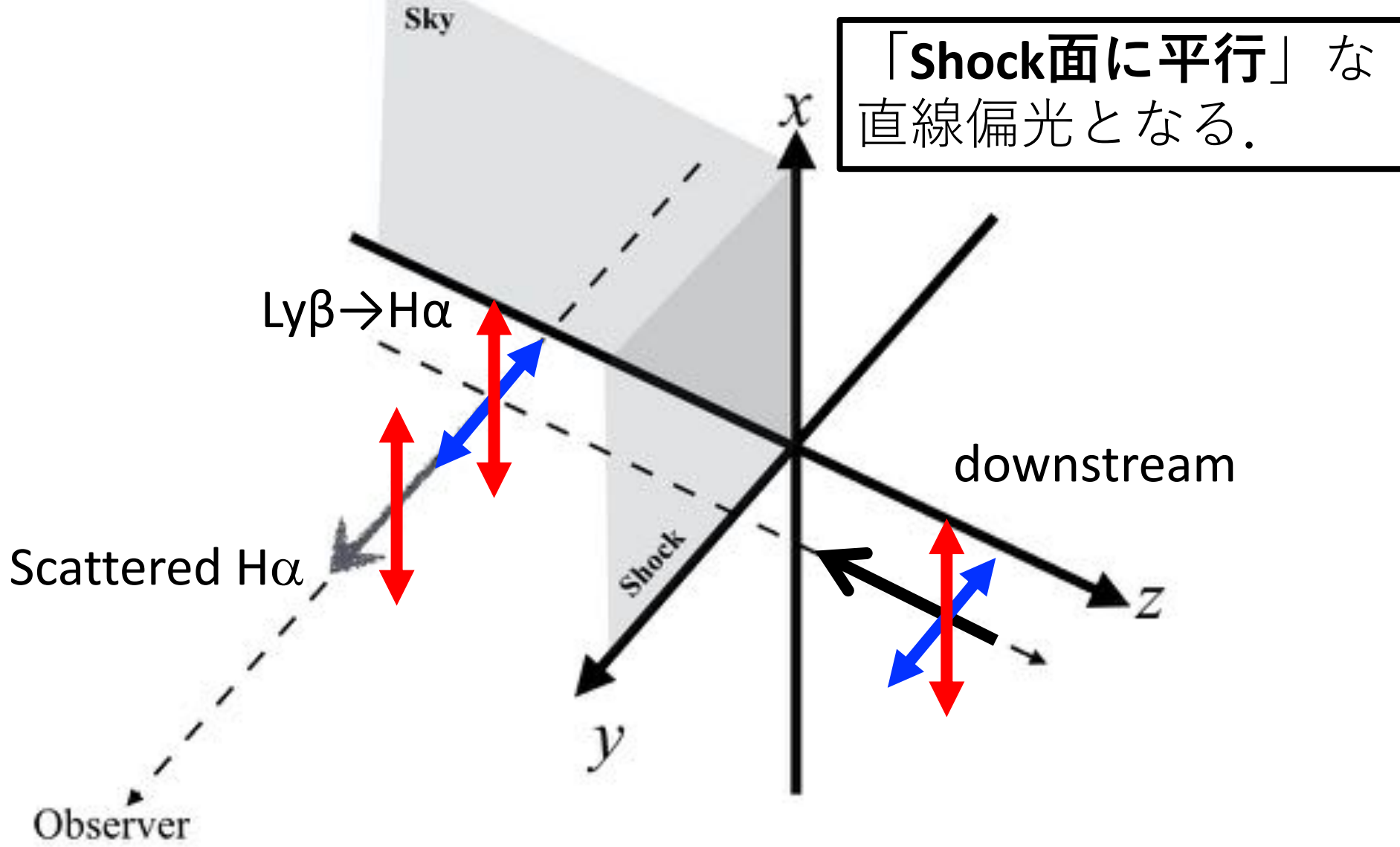
H α emission from upstream



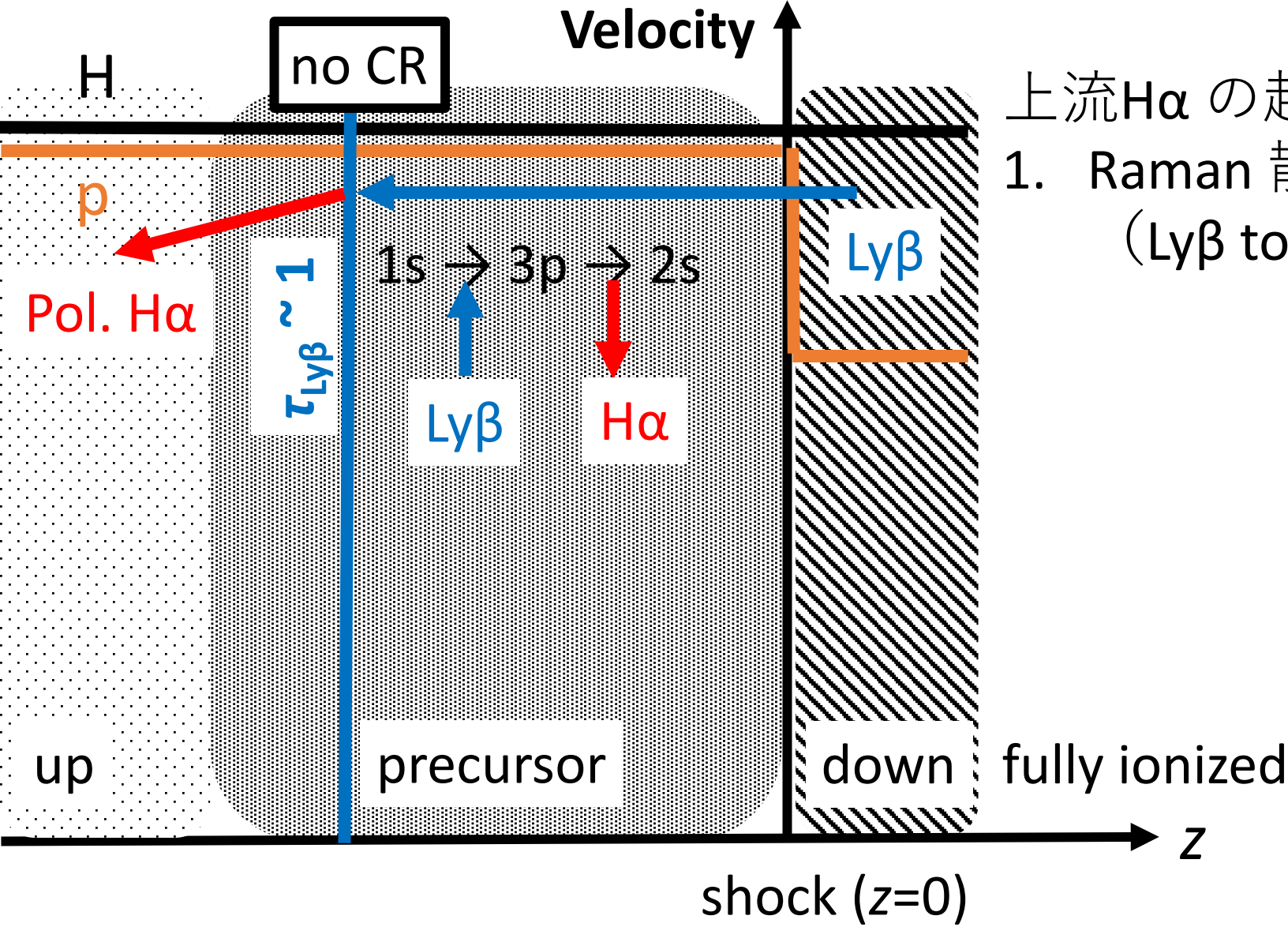
上流H α の起源：
 1. Raman 散乱
 (Ly β to H α) .

y軸方向から観測したとすると、
 偏光方向は？

Polarization angle for $\text{Ly}\beta \rightarrow \text{H}\alpha$

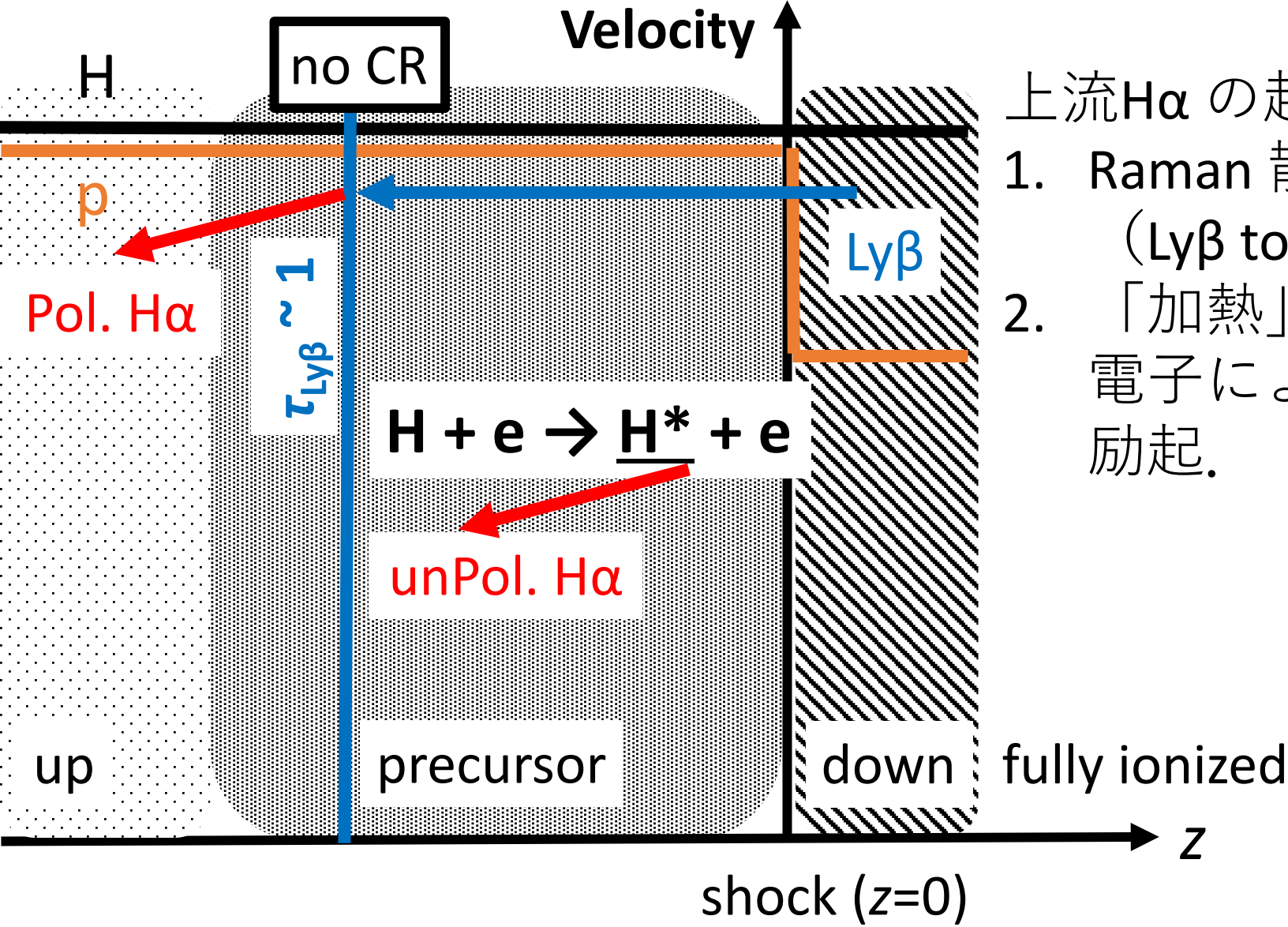


H α emission from upstream



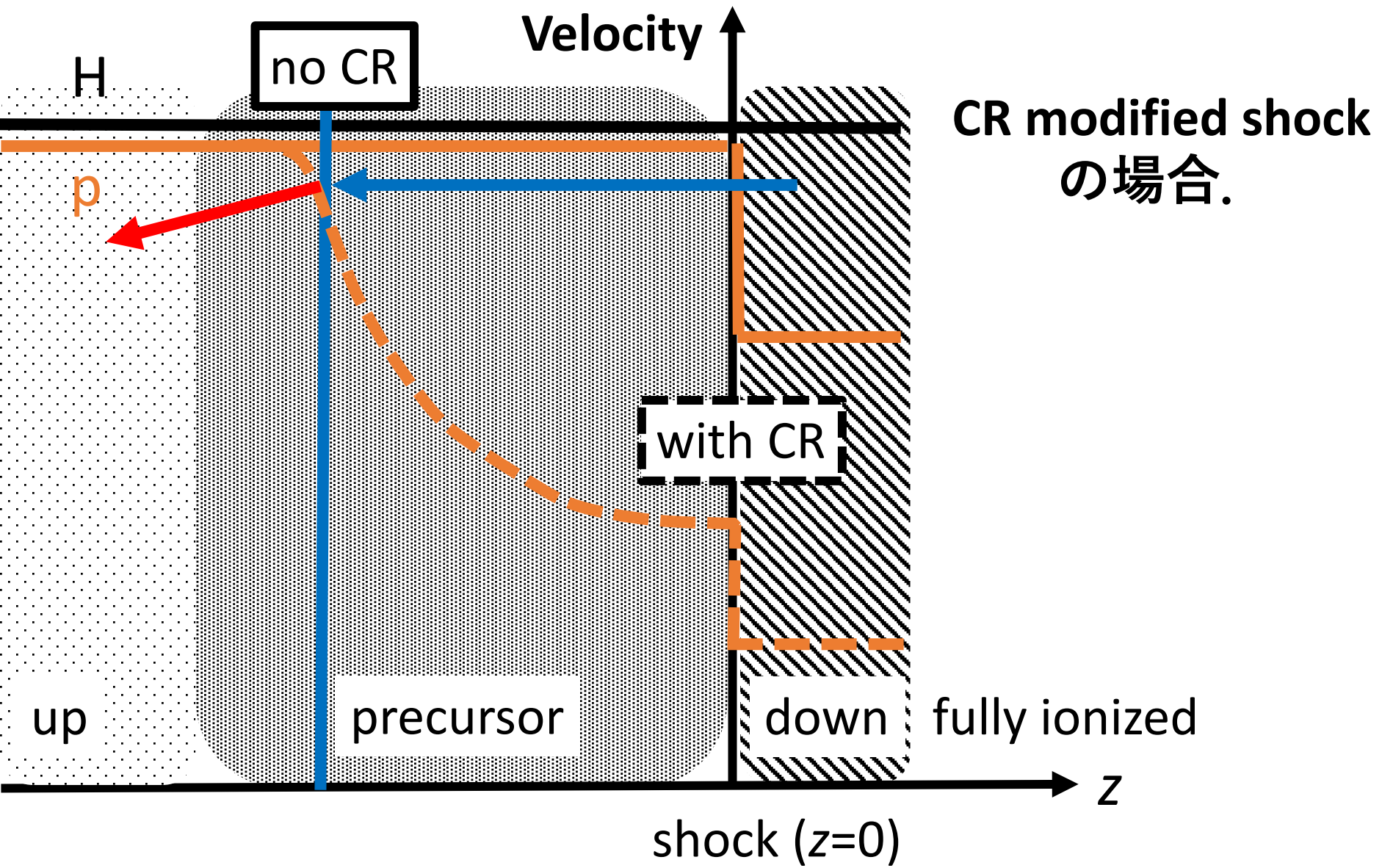
上流H α の起源：
 1. Raman 散乱
 (Ly β to H α) .

H α emission from upstream

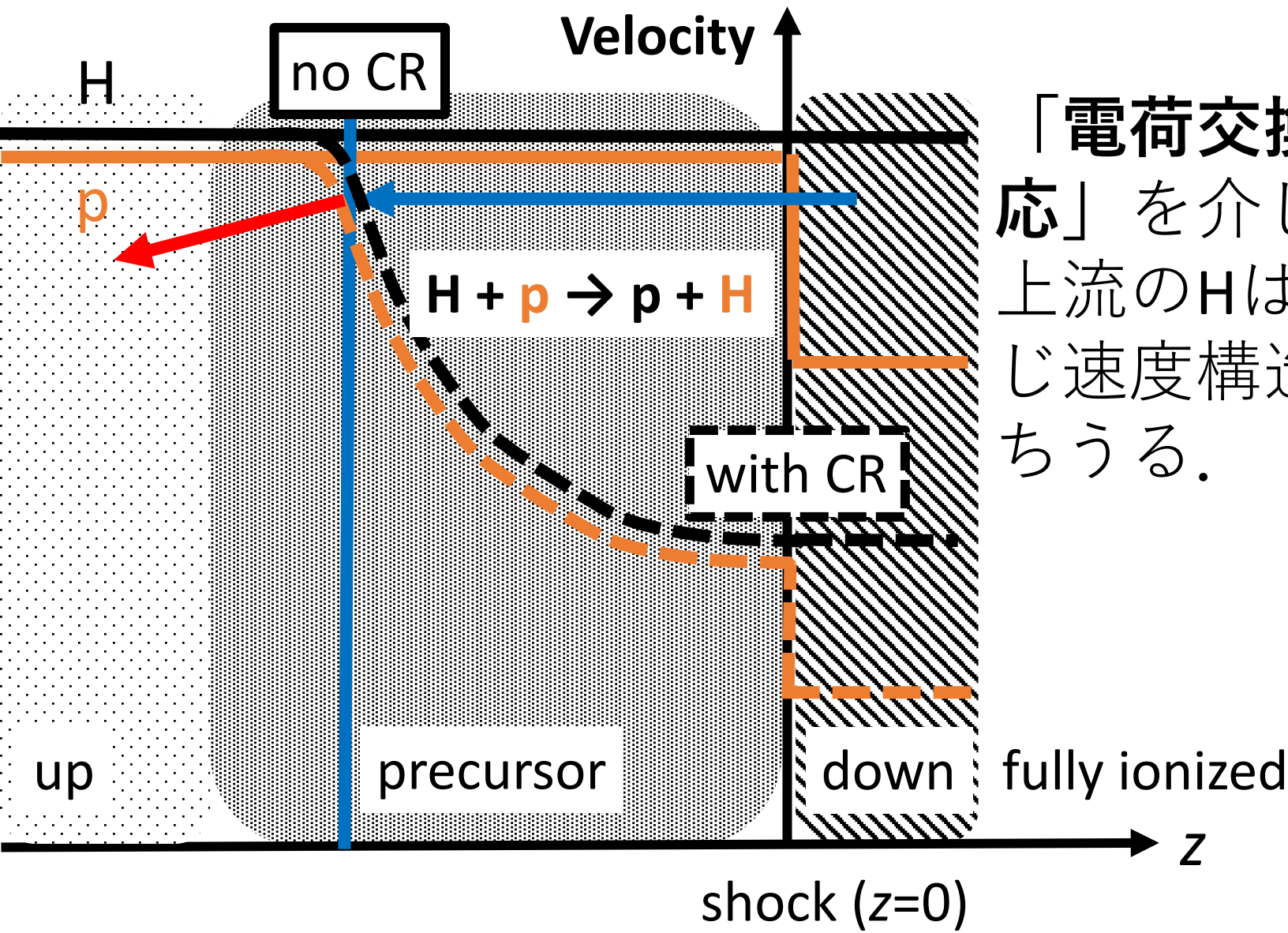


- 上流H α の起源：
1. Raman 散乱 (Ly β to H α) .
 2. 「加熱」された電子による衝突励起.

H α emission from upstream

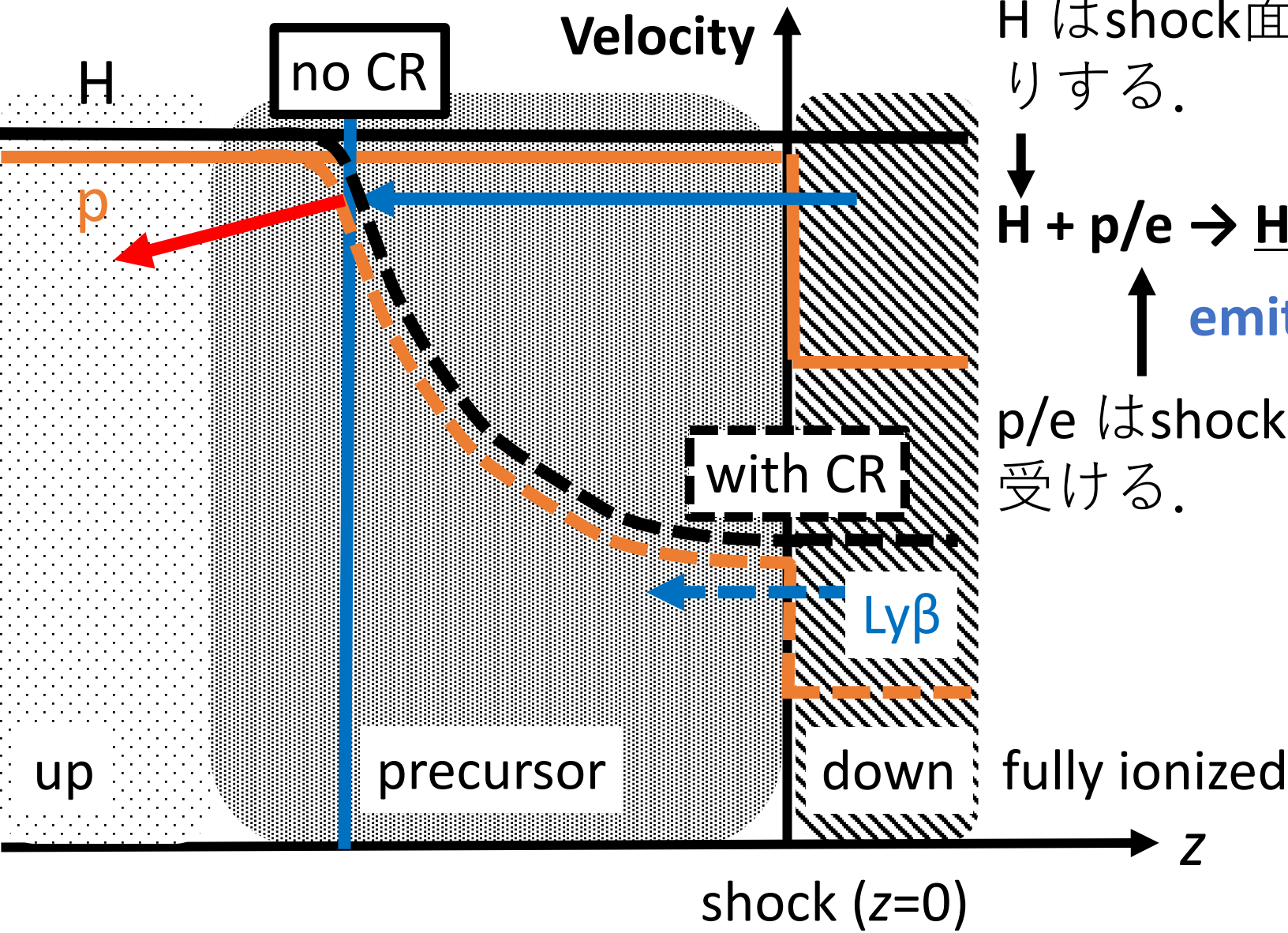


H α emission from upstream

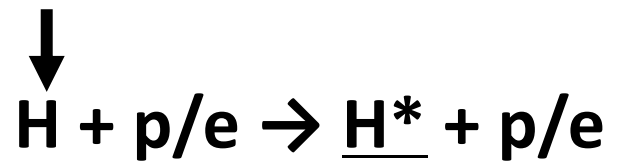


「電荷交換反応」を介して、上流のHはpと同じ速度構造を持ちうる。

H α emission from upstream



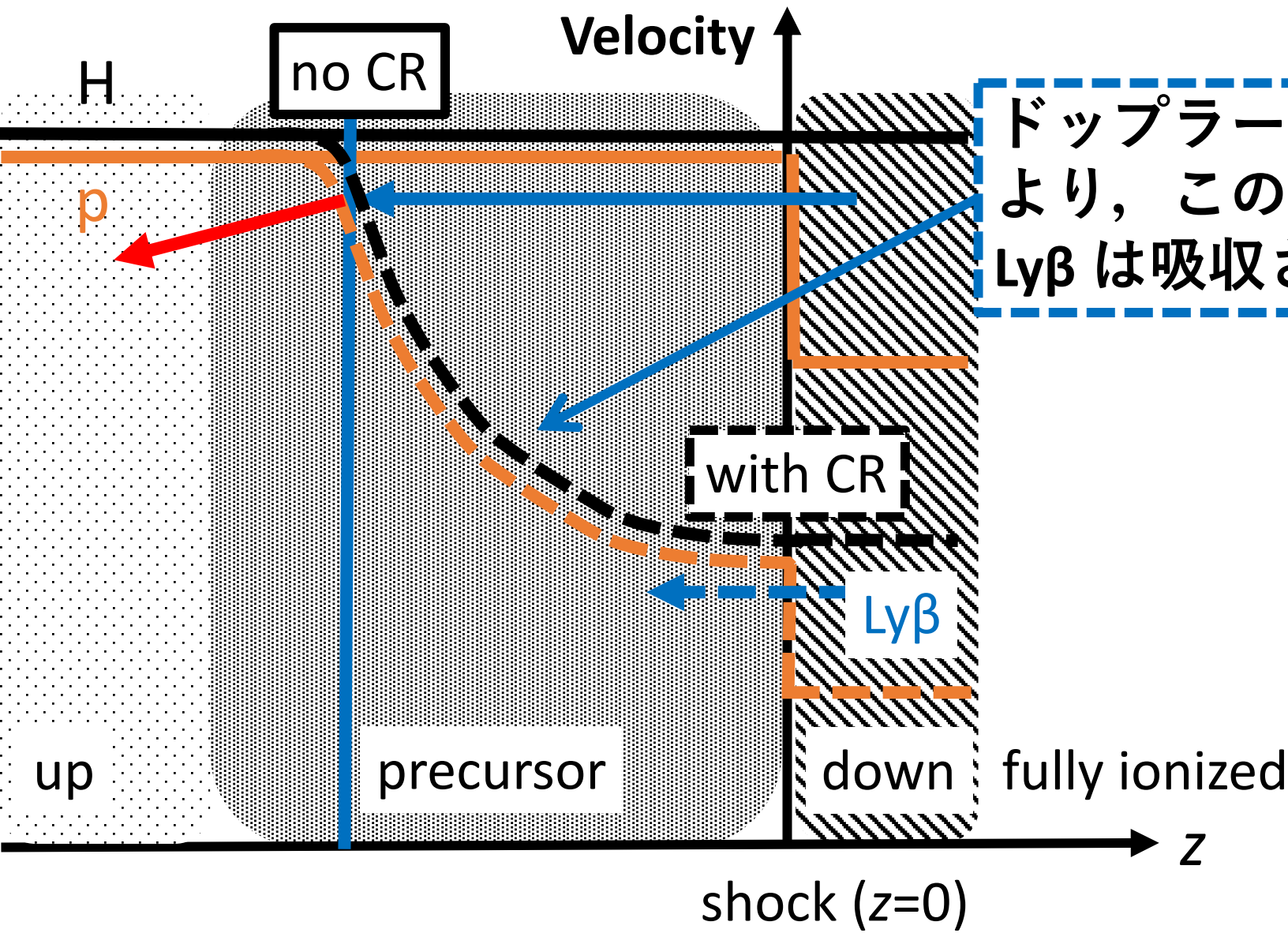
H はshock面を素通りする。



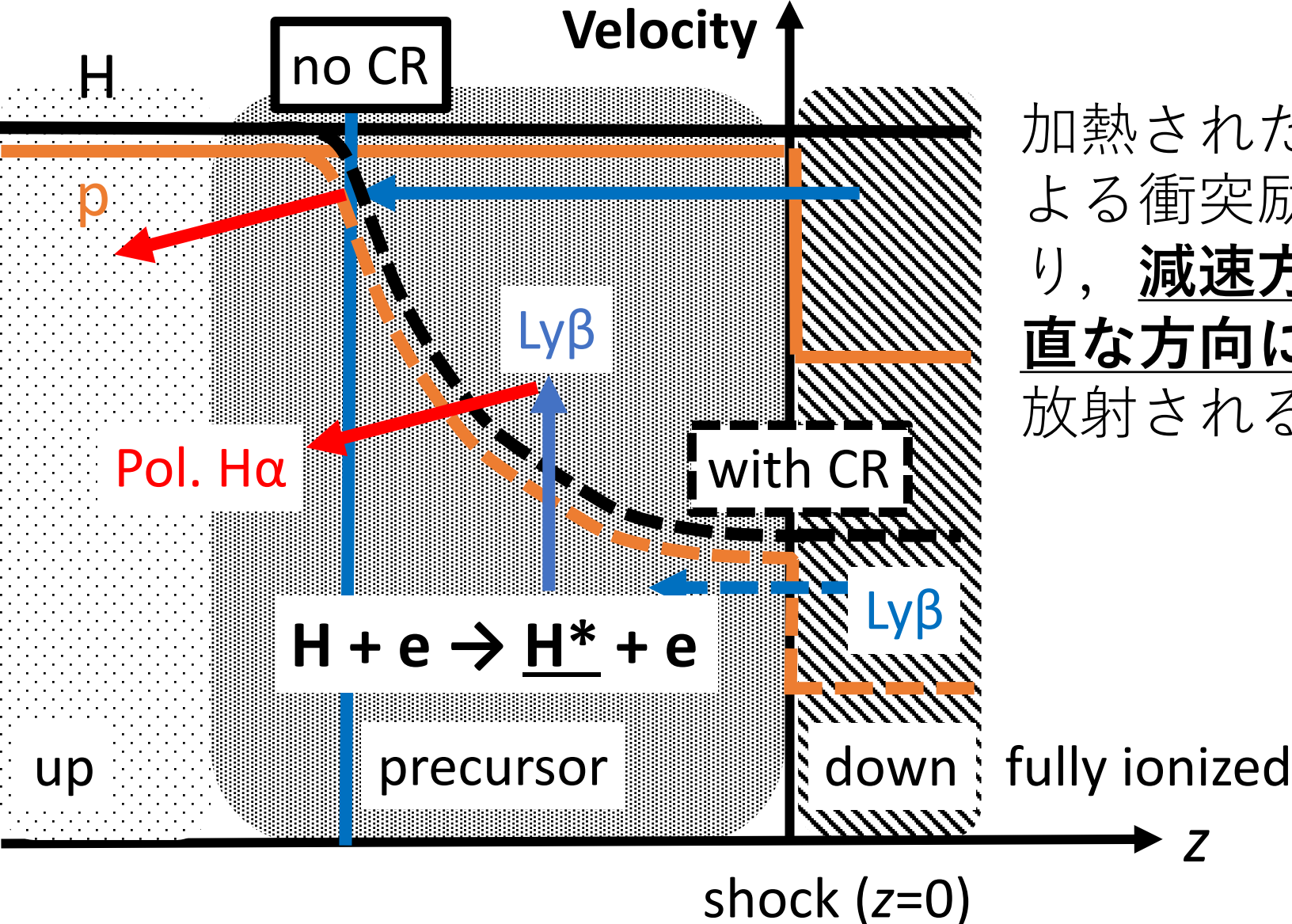
↑ emits Ly β

p/e はshock散逸を受ける。

H α emission from upstream

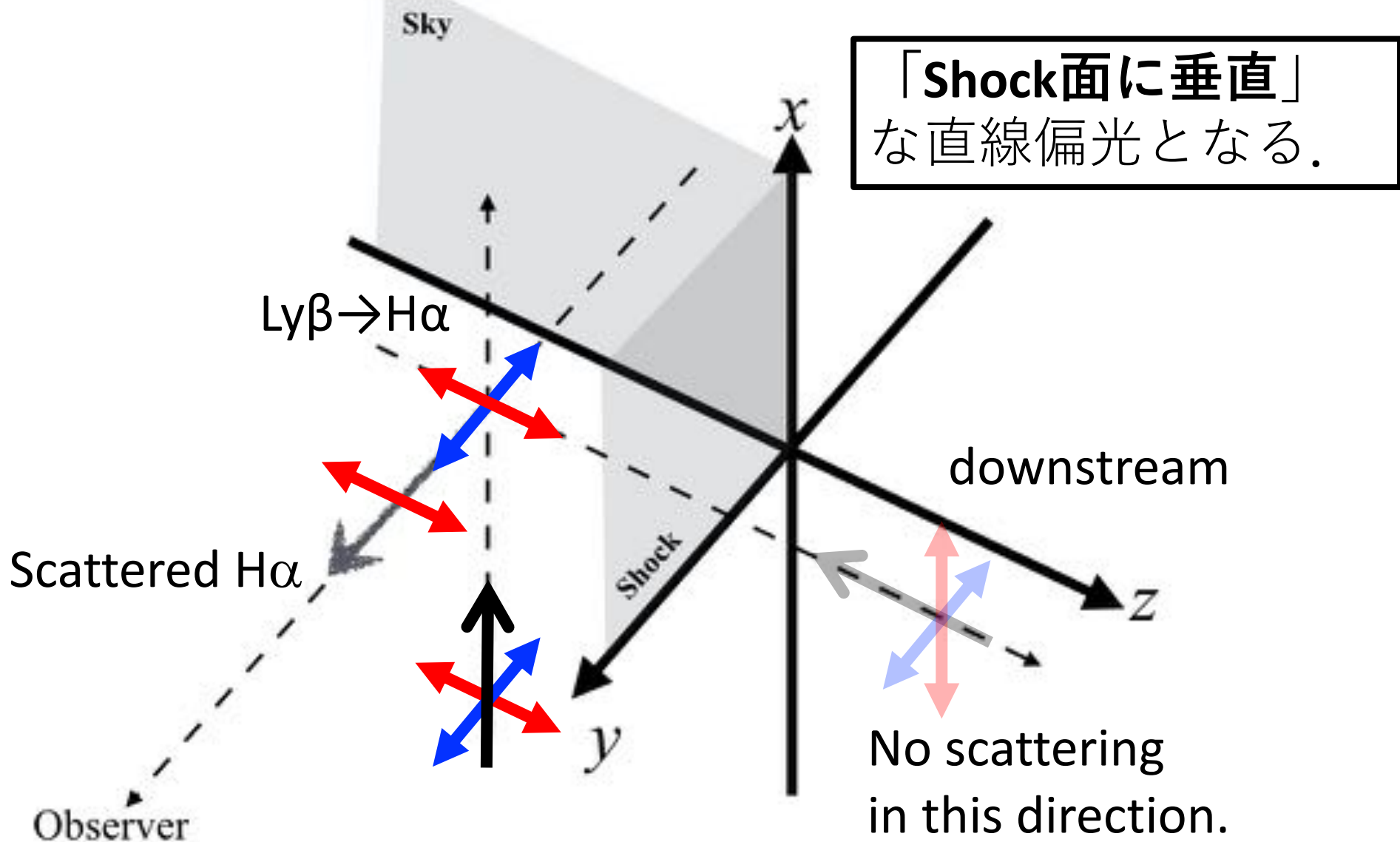


H α emission from upstream



加熱された電子による衝突励起により，減速方向に垂直な方向に Ly β が放射される。

Polarization angle for $\text{Ly}\beta \rightarrow \text{H}\alpha$



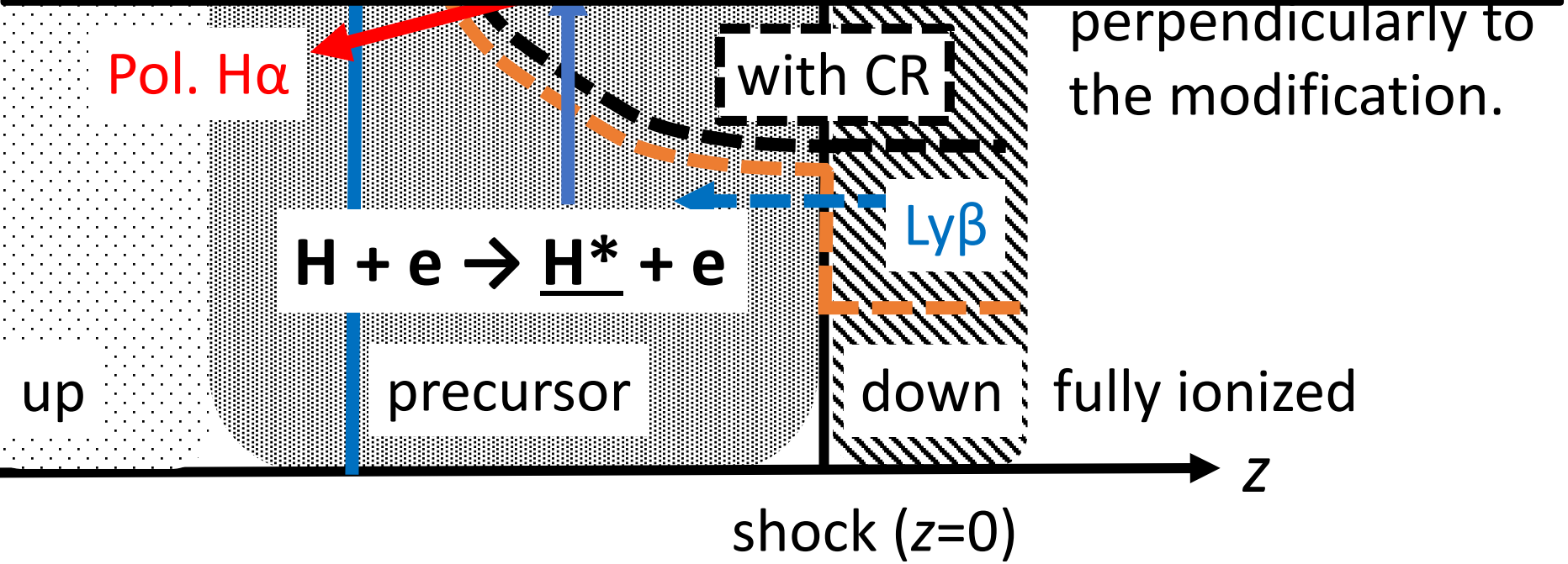
H α emission from upstream



偏光方向と偏光度の定義:

「減速なし」 \rightarrow 「shock面に平行」 \rightarrow 偏光度 < 0

「減速あり」 \rightarrow 「shock面に垂直」 \rightarrow 偏光度 > 0



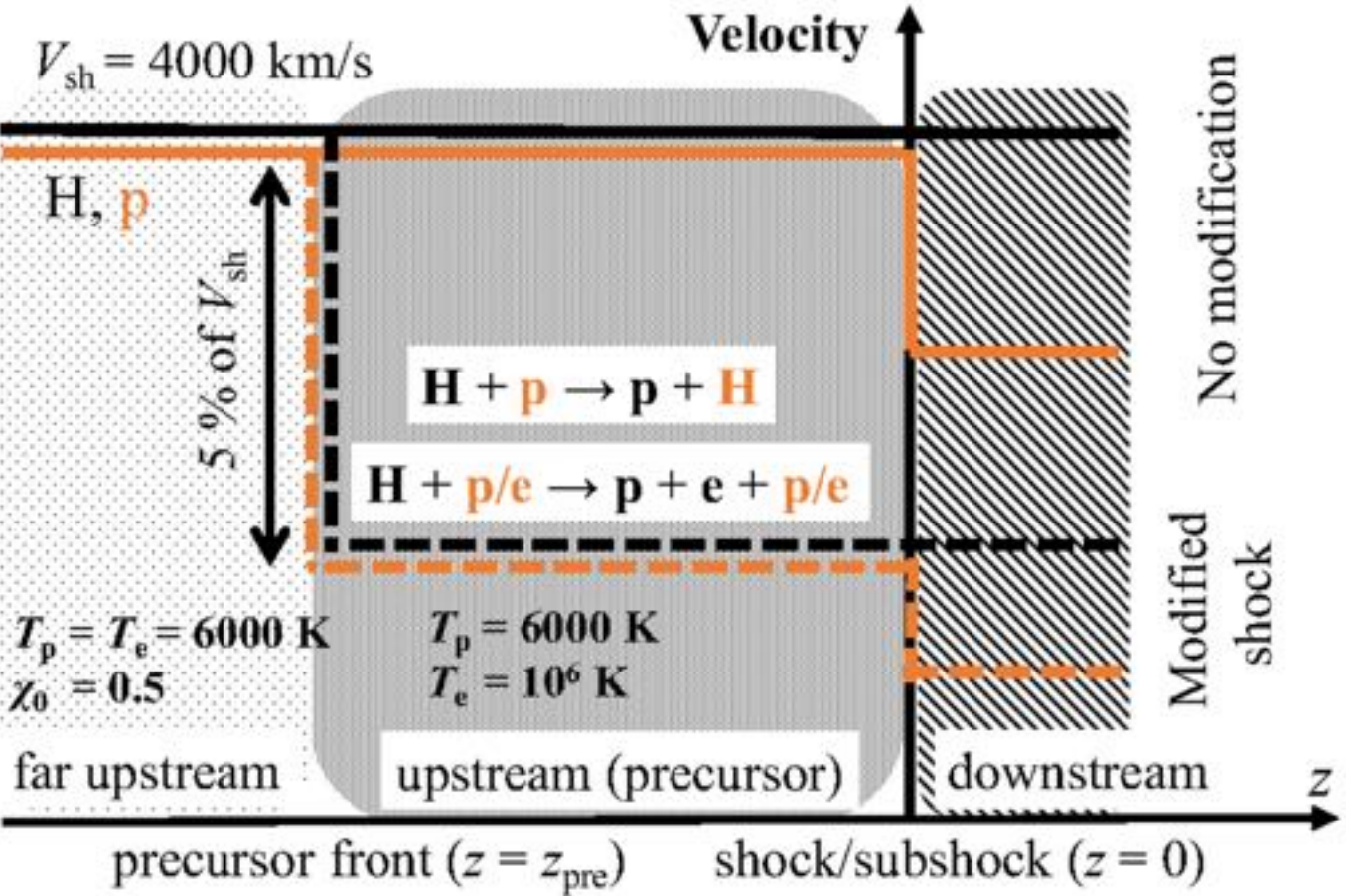
□ Lineの輻射輸送とH原子の準位分布(rate-eq.)を偏光と同時に解く。 → 極めて複雑！

□ 簡単化して偏光度を評価する：

1. 準位分布は偏光なしで解く (SJ & Laming 19a).
Stokes I はちゃんと計算できる.
2. Ly β は完全に無偏光であるとする.
3. 上流の3p $_{3/2}$ 状態はLy β の吸収励起だけに由来するとして **Stokes Q** を評価する.

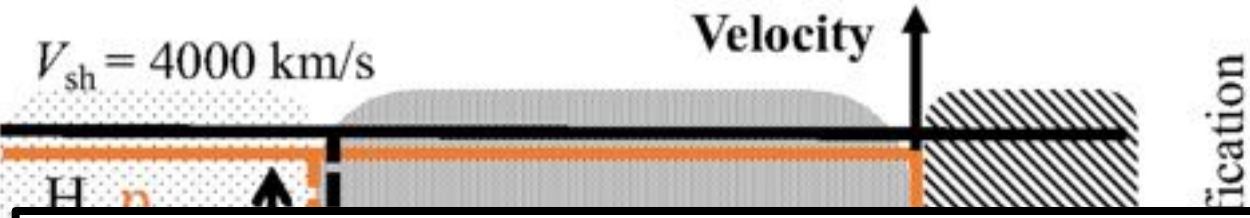
See, SJ & Laming 19b for details

Model set up for the shock



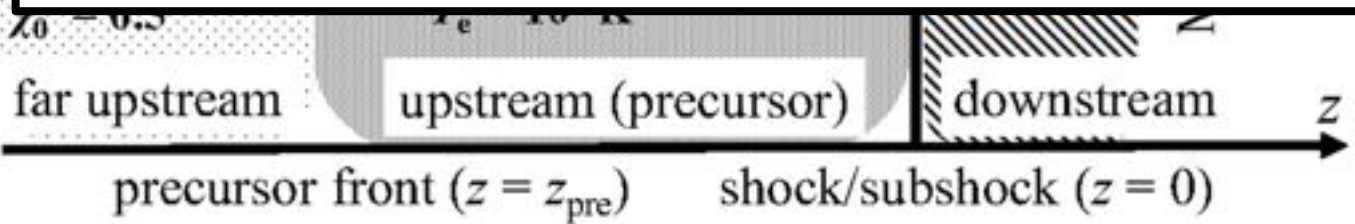
Shock下流は簡単のため、通常のランキン・ユゴニオ関係で与え、 $T_e = 0.1 T_p$ を仮定する。

Model set up for the shock



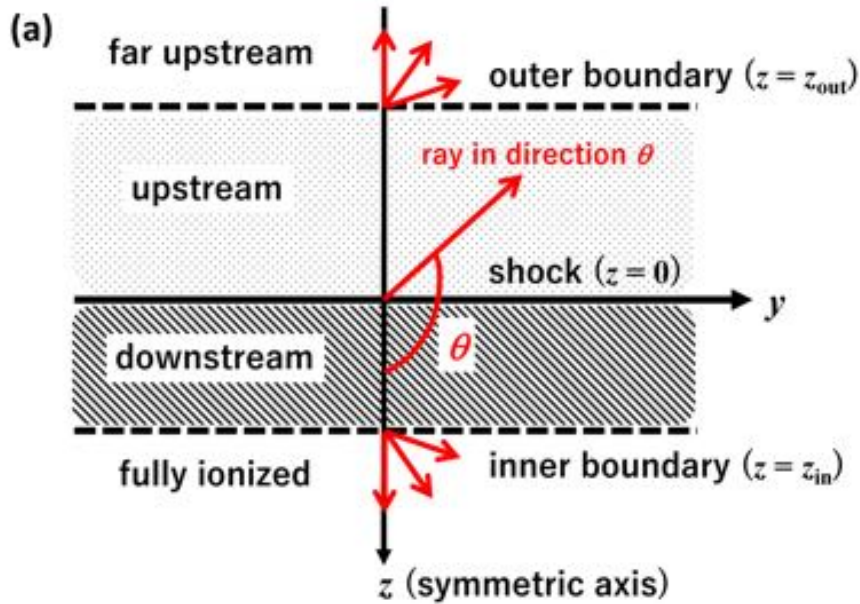
We solve 3 cases:

1. No precursor (流体力学的な衝撃波)
2. 電子加熱あり, 減速なし (electron heating precursor)
3. 電子加熱あり, 減速あり (Cosmic-Ray Modified Shock)



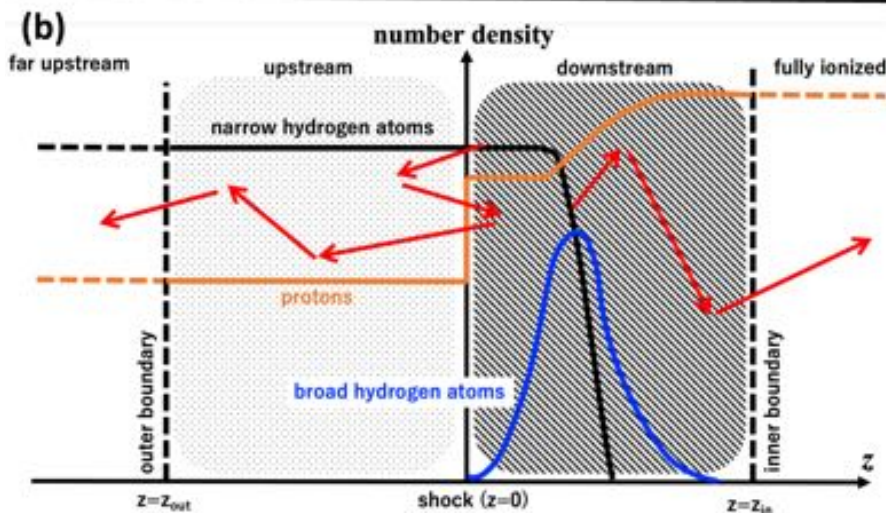
Shock下流は簡単のため, 通常のランキン・ユゴニオ関係で与え, $T_e = 0.1 T_p$ を仮定する.

Line Transfer Model



Parameters:

- ① 衝撃波速度 V_{sh}
- ② 上流の個数密度 $n_{tot,0}$
- ③ 電離度 (proton fraction) χ_0
- ④ 下流の陽子温度 T_{down}
- ⑤ 下流の電子温度 $T_e = \beta T_{down}$

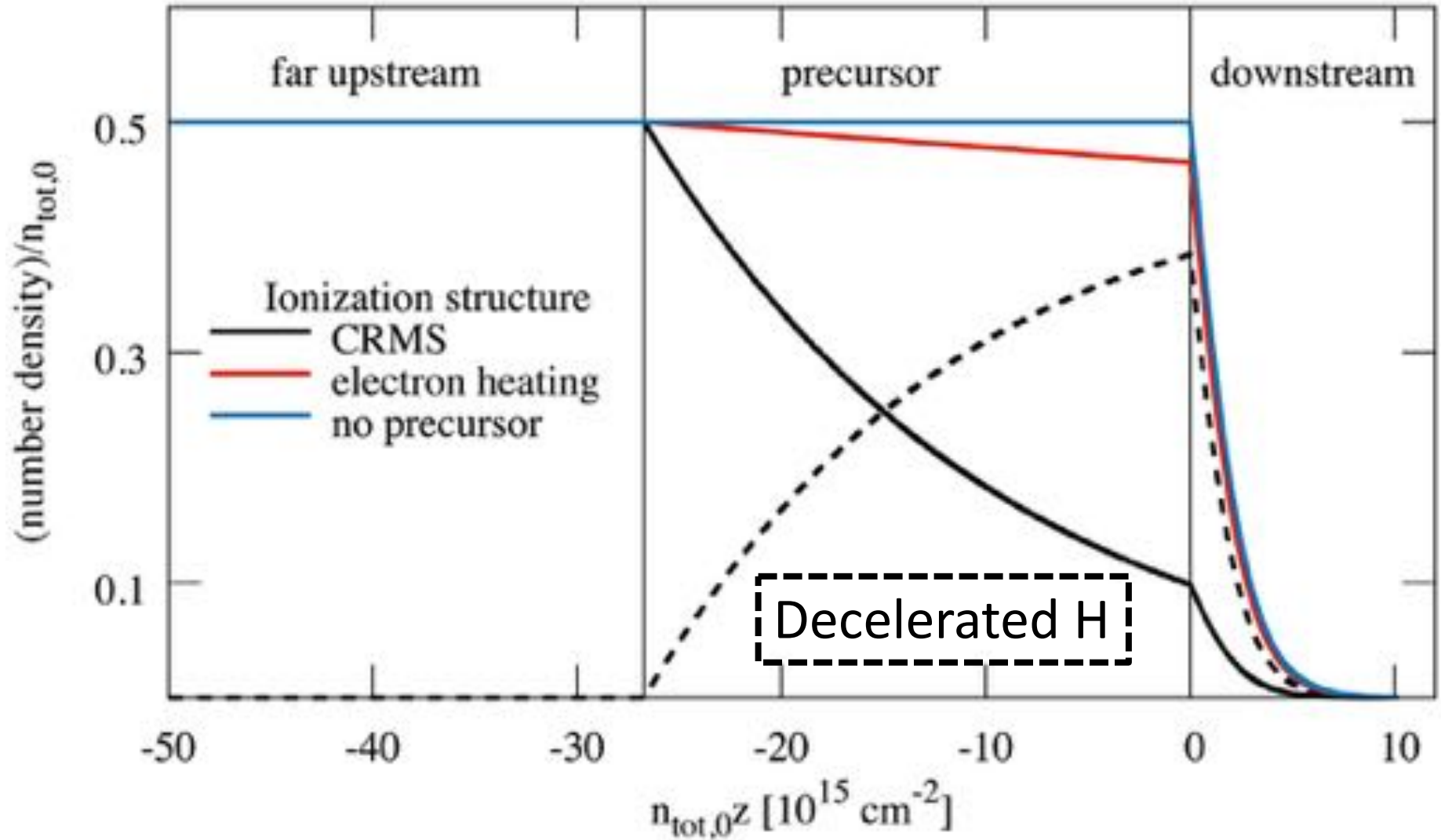


Pure hydrogen plasma.

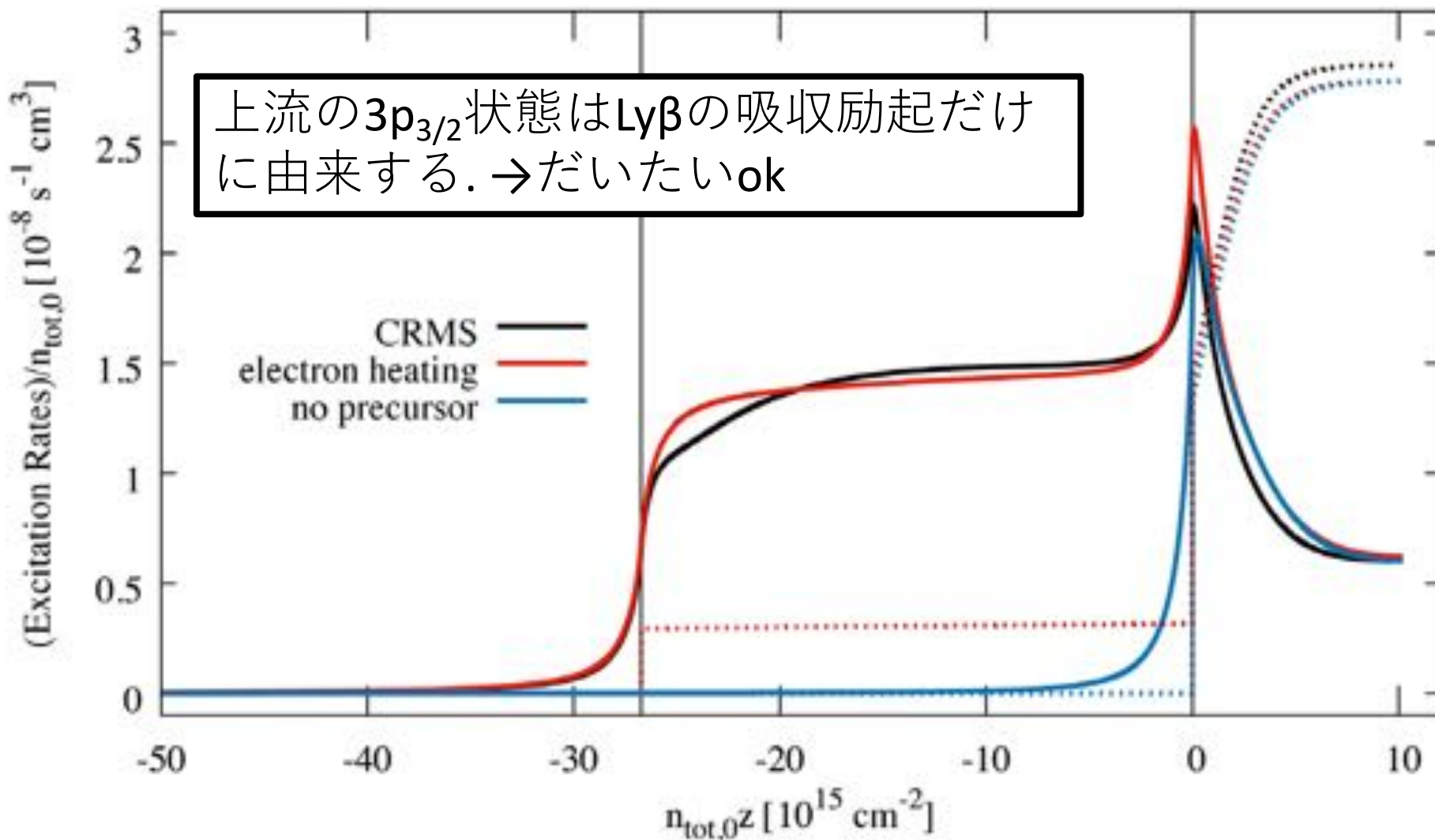
励起準位は4fまで解かれている。

(SJ & Laming 19a)

Results: Ionization Structure of H

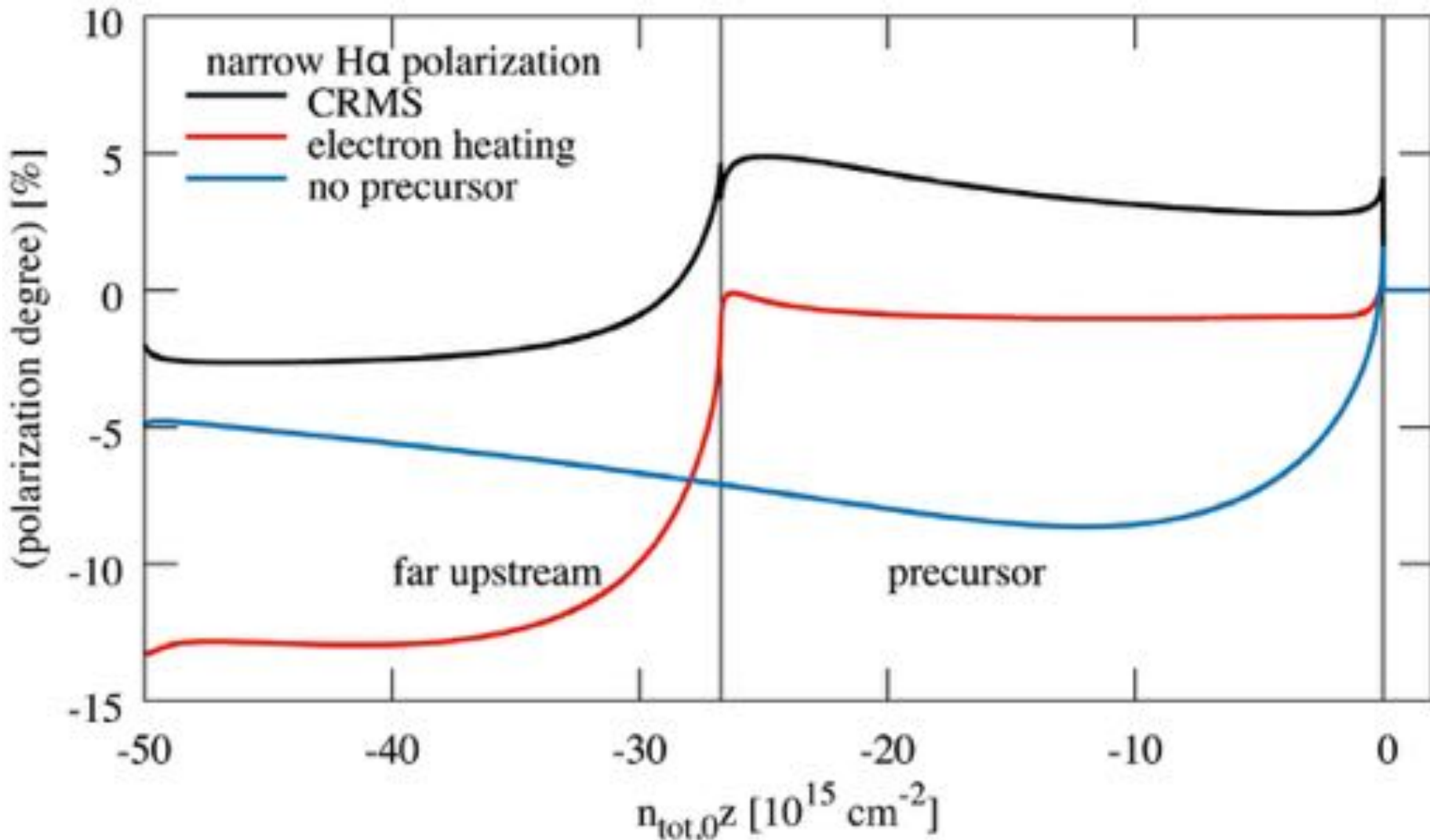


Results: Radiative vs. Collisional



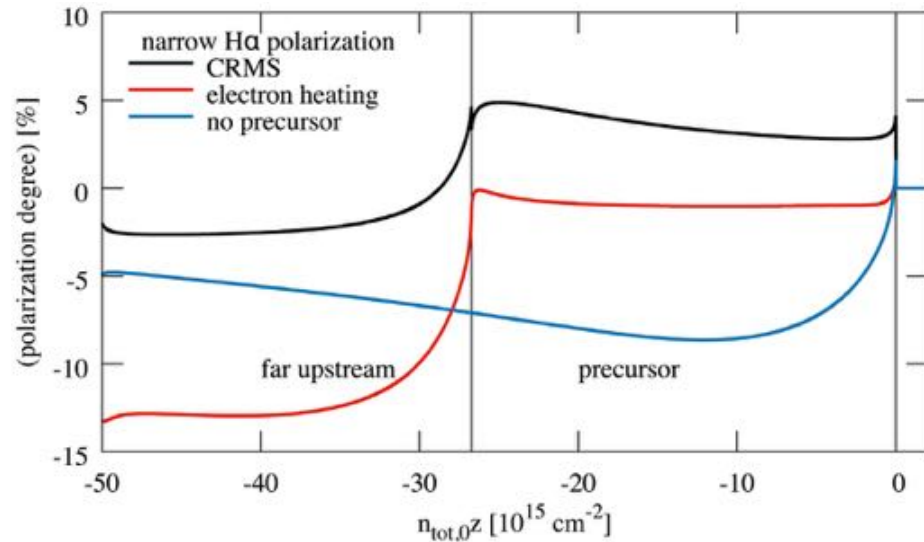
Results: Polarization of H α

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

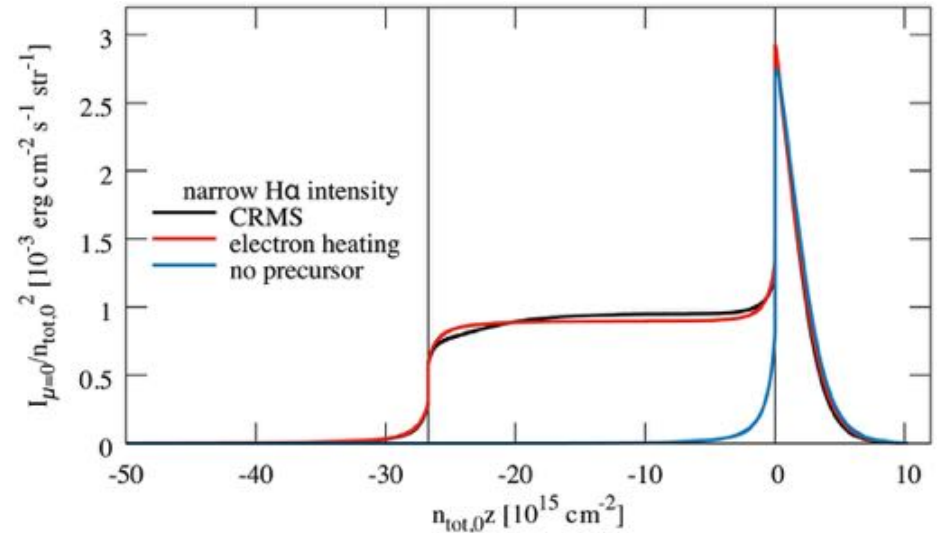


Results: Polarization of H α

Polarization degree

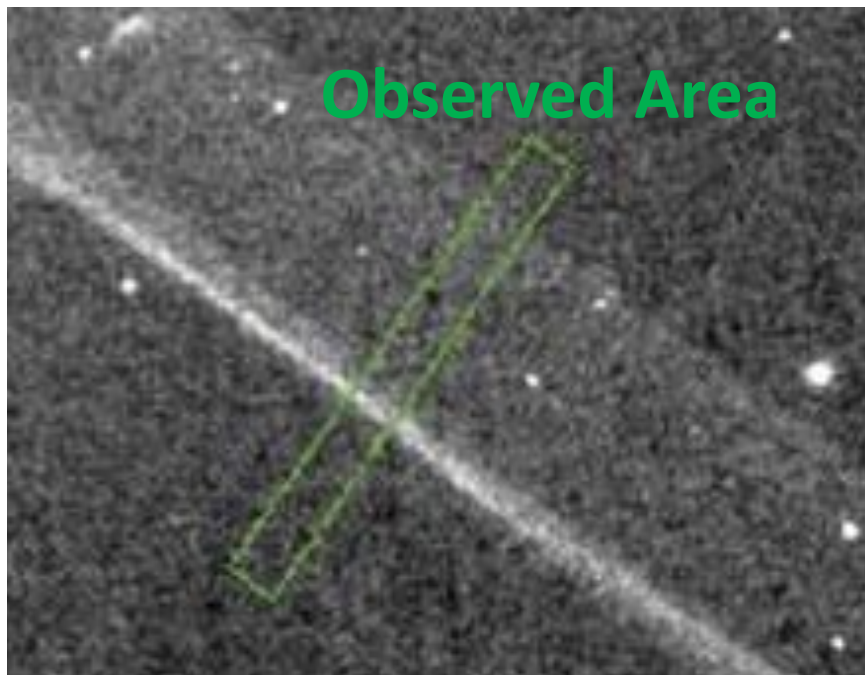
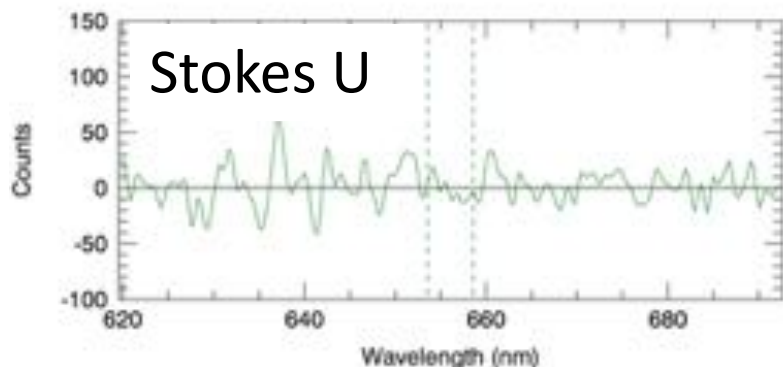
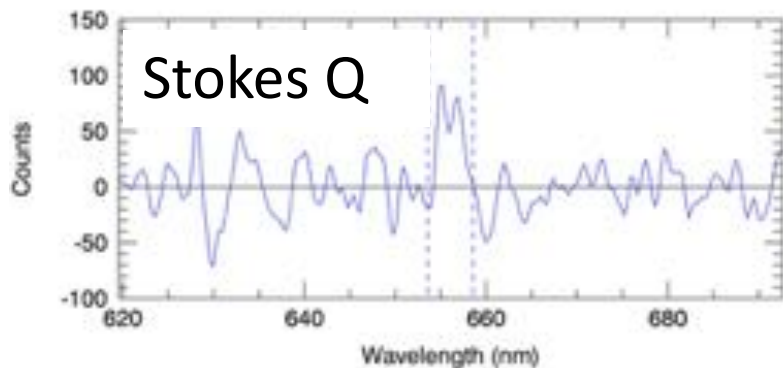
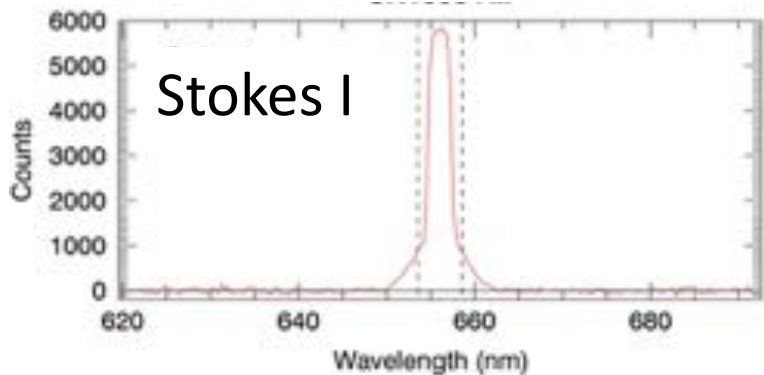


Surface brightness



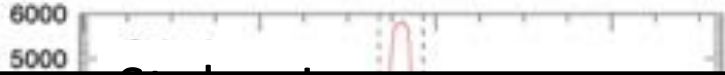
偏光方向で「速度変化」の有無が分かる！
偏光度～数％は観測できうる (Sparks+ 15).

Discovery of polarized H α emission @ bright filament of SN 1006 (Sparks+ 15)

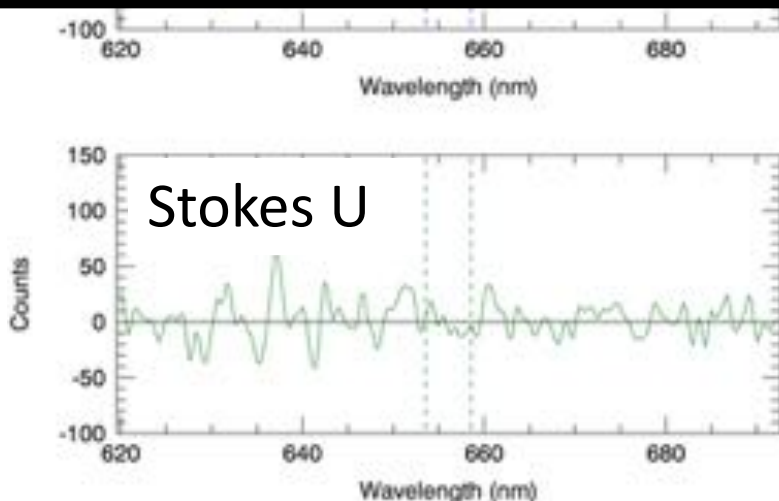


- **Linear Polarization**
- **Polarization angle :**
perpendicular to the shock
- **Degree : 2.0 ± 0.4 %**

Discovery of polarized H α emission @ bright filament of SN 1006 (Sparks+ 15)



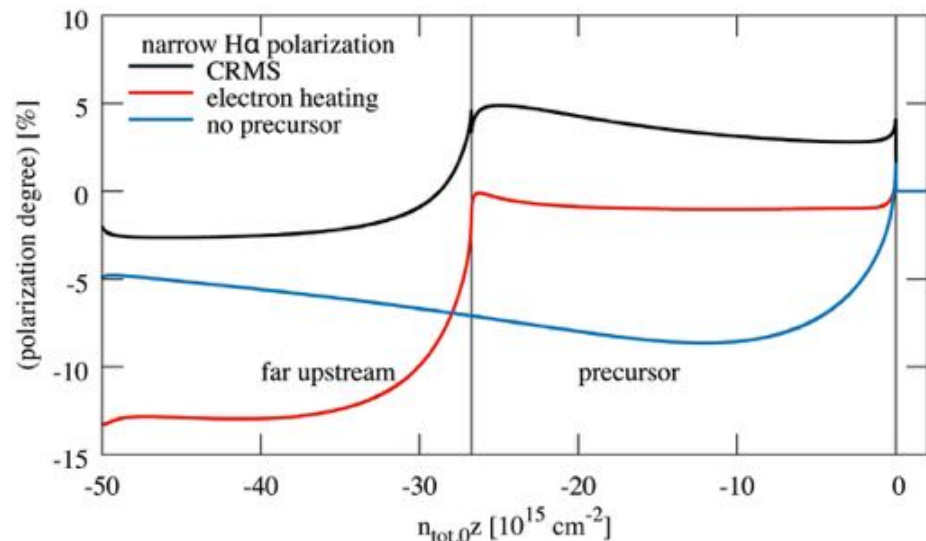
- ✓ 観測と同程度の偏光度を推定できた。 →理論計算はよさそう。
- ✓ Sparks+15の観測は空間分解されていないので、「速度変化」があるかはまだ分からない。
- ✓ 上流・下流を空間分解した観測が必要。



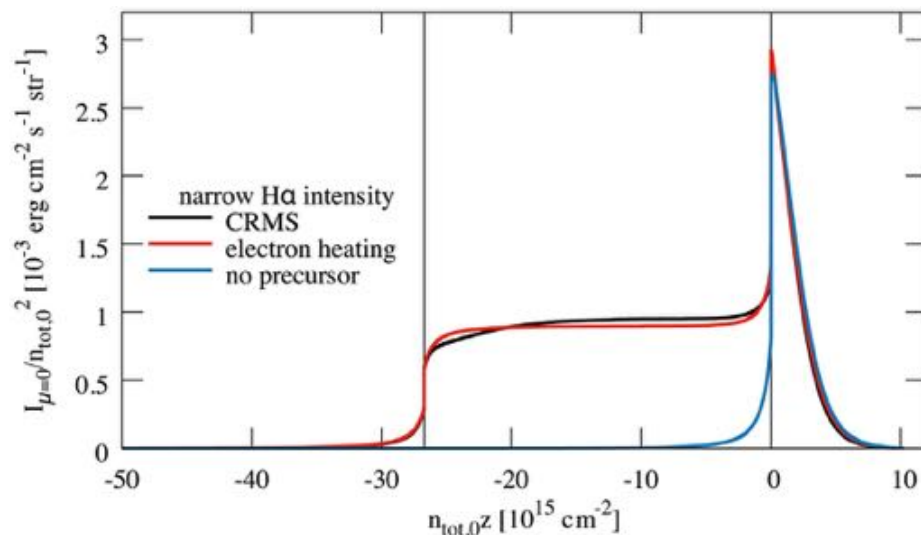
- **Linear Polarization**
- **Polarization angle :**
perpendicular to the shock
- **Degree : 2.0 ± 0.4 %**

Polarization of H α vs others

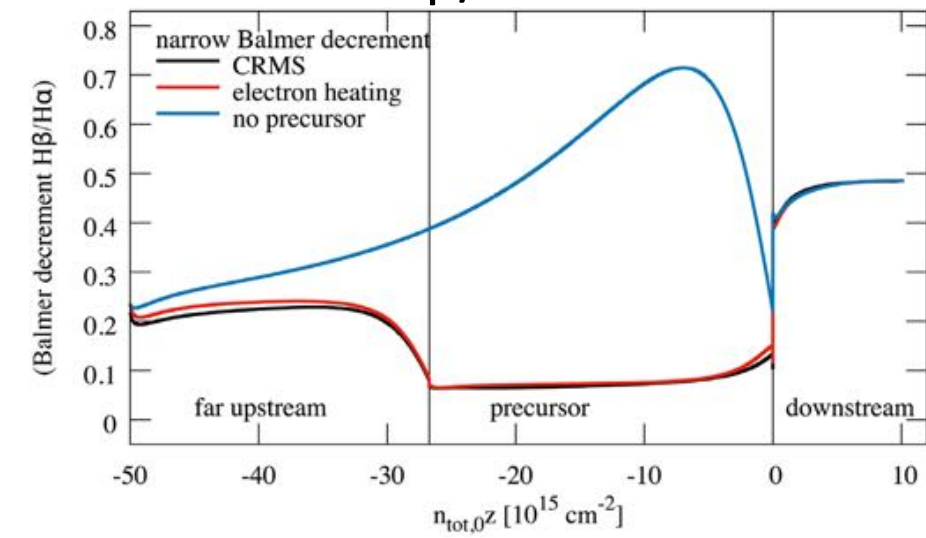
Polarization degree



Surface brightness



H β /H α



「速度変化」を捉えているのは偏光観測だけ。

Outcome

Polarization degree



$$z_{\text{pre}} \simeq 3(n_p/n_{\text{tot},0})V_{\text{sh}}/C_{\text{CX}}$$

- ✓ 偏光観測から減速領域の長さが分かる。

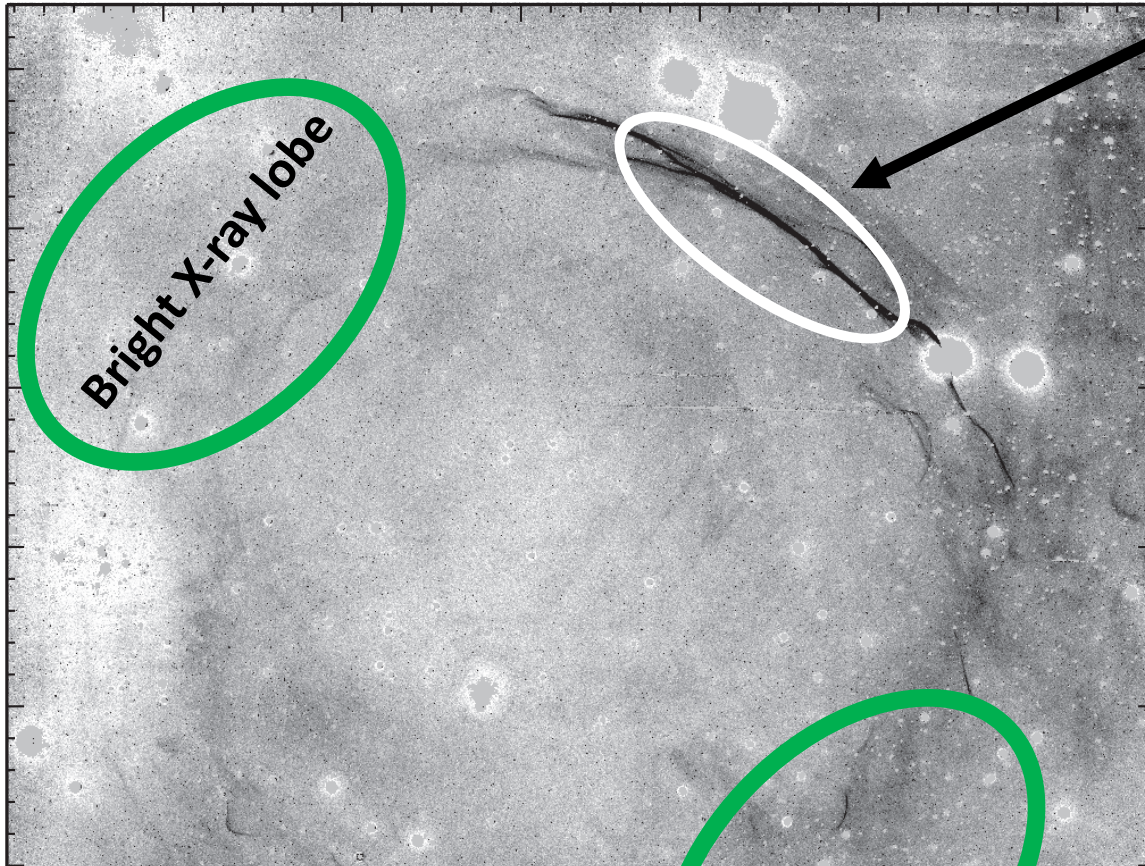
$$D(E) \gtrsim 1.05 \times 10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \left(\frac{V_{\text{sh}}}{4000 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \times \left(\frac{n_{\text{tot},0}}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta V_{\text{sh}}}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1},$$

* $D(E)$ がボーム極限の場合に対応するエネルギー

$$E \gtrsim 33 \text{ TeV} \frac{1}{\xi_B} \times \left(\frac{B}{100 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{V_{\text{sh}}}{4000 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \times \left(\frac{n_{\text{tot},0}}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta V_{\text{sh}}}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{-1}.$$

- ✓ 「速度変化」を担う宇宙線の拡散係数がわかる。
→加速モデルの制限となる。

SN 1006



$\eta \sim 0.1$? (this work)

✓ density $\sim 0.3 \text{ cm}^{-3}$

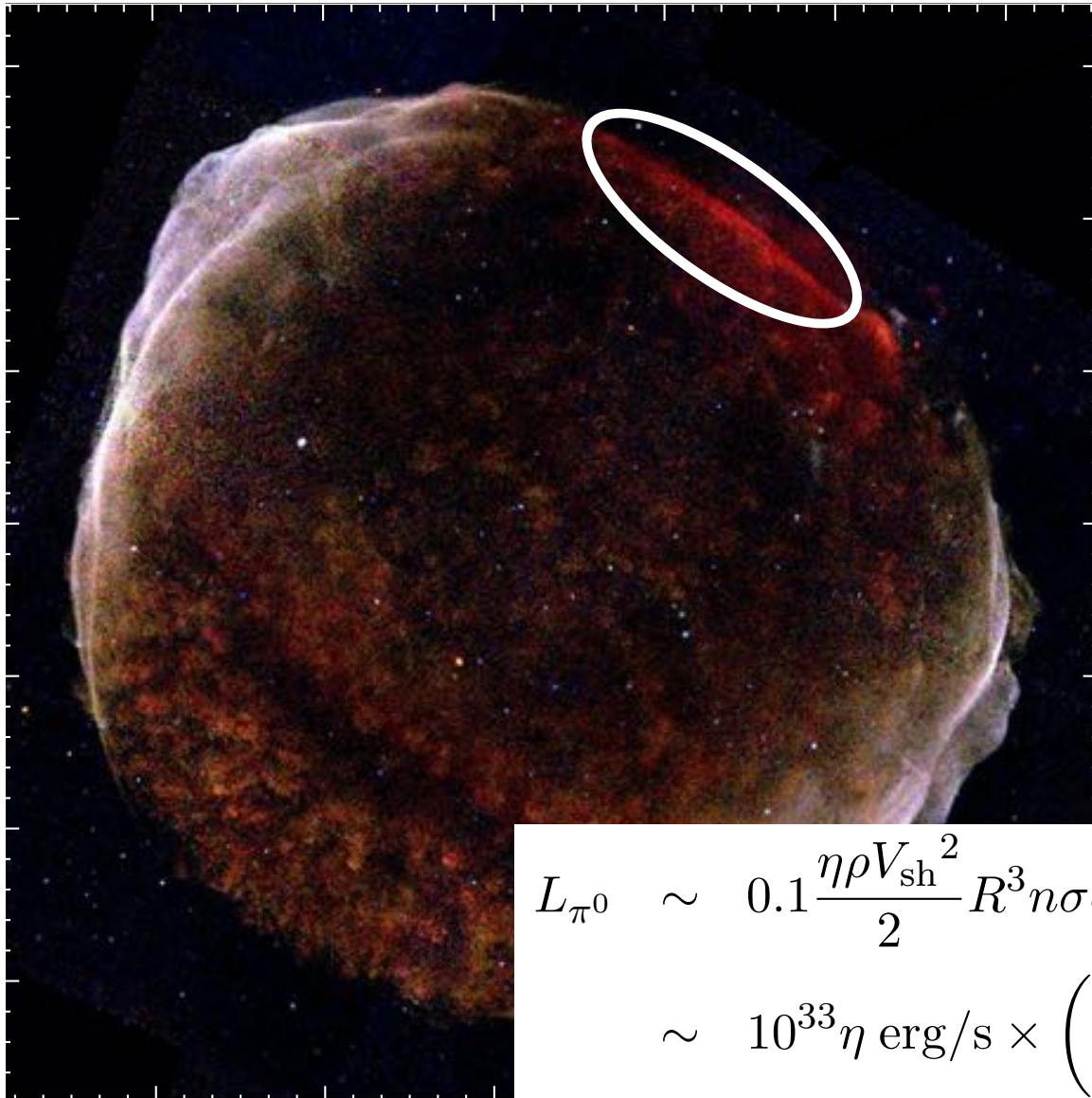
✓ $V_{\text{sh}} \sim 3000 \text{ km/s}$ @
2.2 kpc

(Raymond+ 07; Katsuda+12)

$$L_{\pi^0} \sim 0.1 \frac{\eta \rho V_{\text{sh}}^2}{2} R^3 n \sigma c$$

$$\sim 10^{33} \eta \text{ erg/s} \times \left(\frac{R}{3 \text{ pc}} \right)^3 \left(\frac{V_{\text{sh}}}{0.01c} \right)^2 \left(\frac{n}{0.3 \text{ cm}^{-3}} \right)^2$$

SN 1006



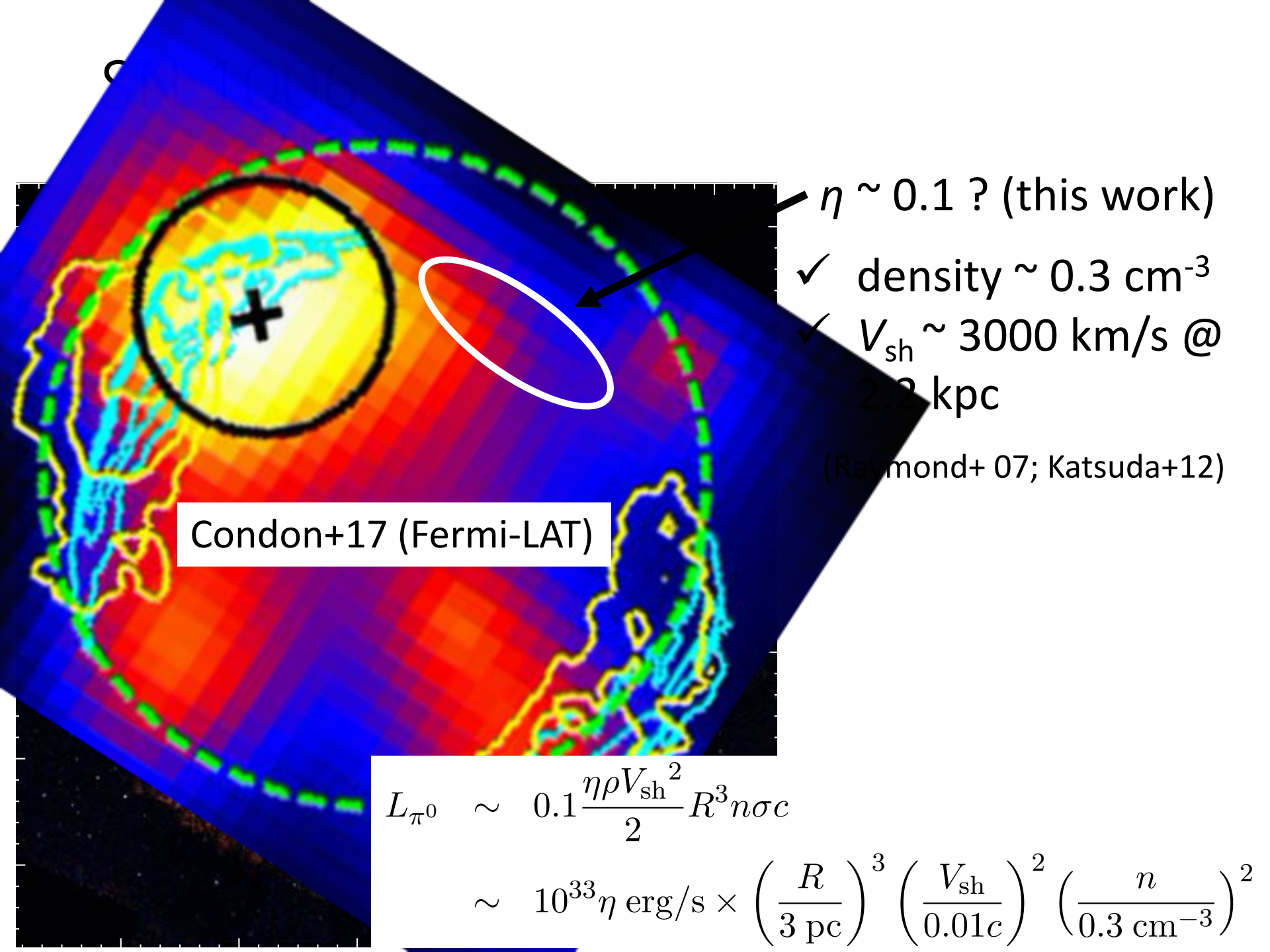
✓ $\eta \sim 0.1$? (this work)

✓ density $\sim 0.3 \text{ cm}^{-3}$

✓ $V_{\text{sh}} \sim 3000 \text{ km/s}$ @
2.2 kpc

(Raymond+ 07; Katsuda+12)

$$L_{\pi^0} \sim 0.1 \frac{\eta \rho V_{\text{sh}}^2}{2} R^3 n \sigma c$$
$$\sim 10^{33} \eta \text{ erg/s} \times \left(\frac{R}{3 \text{ pc}} \right)^3 \left(\frac{V_{\text{sh}}}{0.01c} \right)^2 \left(\frac{n}{0.3 \text{ cm}^{-3}} \right)^2$$



Condon+17 (Fermi-LAT)

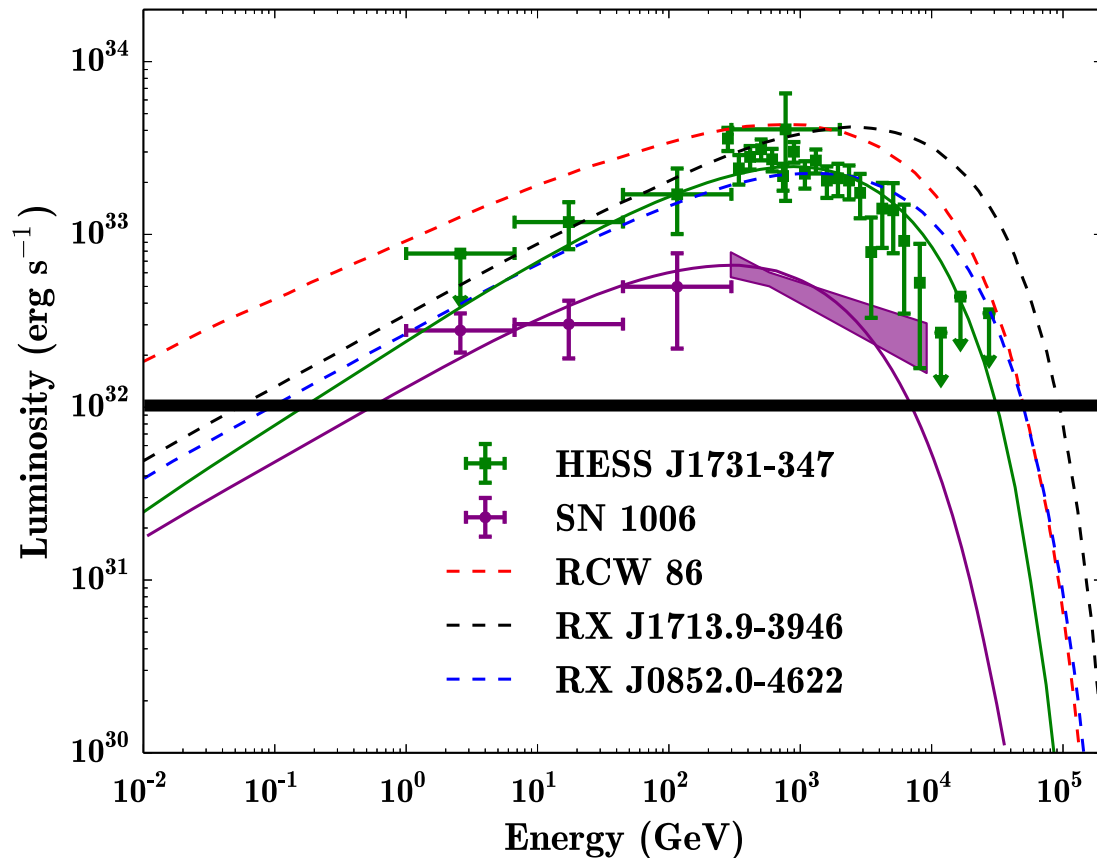
$\eta \sim 0.1$? (this work)

✓ density $\sim 0.3 \text{ cm}^{-3}$

✓ $V_{\text{sh}} \sim 3000 \text{ km/s}$ @
2.2 kpc

(Raymond+ 07; Katsuda+12)

$$L_{\pi^0} \sim 0.1 \frac{\eta \rho V_{\text{sh}}^2}{2} R^3 n \sigma c$$
$$\sim 10^{33} \eta \text{ erg/s} \times \left(\frac{R}{3 \text{ pc}} \right)^3 \left(\frac{V_{\text{sh}}}{0.01c} \right)^2 \left(\frac{n}{0.3 \text{ cm}^{-3}} \right)^2$$



➤ $\eta \sim 0.1$? (this work)

✓ density $\sim 0.3 \text{ cm}^{-3}$

✓ $V_{\text{sh}} \sim 3000 \text{ km/s}$ @
2.2 kpc

(Raymond+ 07; Katsuda+12)

$$L_{\pi^0} \sim 0.1 \frac{\eta \rho V_{\text{sh}}^2}{2} R^3 n \sigma c$$

$$\sim 10^{33} \eta \text{ erg/s} \times \left(\frac{R}{3 \text{ pc}} \right)^3 \left(\frac{V_{\text{sh}}}{0.01c} \right)^2 \left(\frac{n}{0.3 \text{ cm}^{-3}} \right)^2$$

Summary

- $\varepsilon_{\text{CR}} \sim 1 \text{ eV cm}^{-3}$ ($\sim \text{GeV CRs}$ が担う)
 - Supernova が最有力“候補”.
 - 分子雲の電離度は星形成率で説明できるのか？
 - **CR ~ turbulence ~ *B*-field ~ thermal ~ 1 eV/cc**
は銀河(ISM)のどこでも成り立つのか？
 - SNRの先行研究
 - 宇宙線の生成率と加速機構は**未説明**.
 - SNRでの加速機構を解明するための提案：
H α の偏光観測が重要である.
- Cf. Shimoda et al. 2018**
Shimoda & Laming 2019 a, b (見てね)