

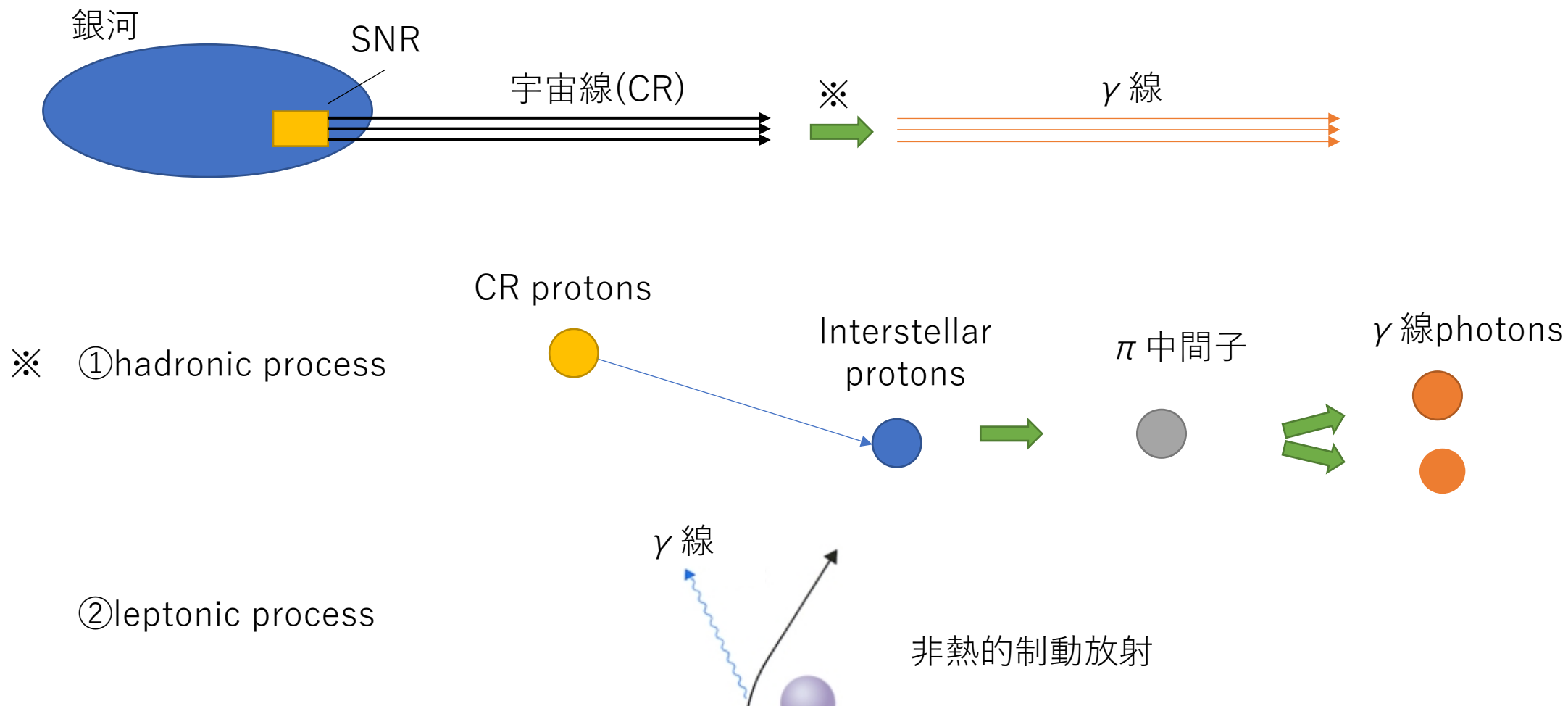
Discovery of molecular and atomic clouds associated with the gamma-ray supernova remnant Kesteven 79

M. Kuriki, H. Sano, N. Kuno, M. Seta, Y. Yamane, T. Inaba, T. Nagaya, S. Yoshiike, K. Okawa, D. Tsutsumi, Y. Hattori, M. Kohno, S. Fujita, A. Nishimura, A. Ohama, M. Matsuo, Y. Tsuda, K. Torii, T. Minamidani, T. Umemoto, G. Rowell, A. Bamba, K. Tachihara, Y. Fukui

Abstract

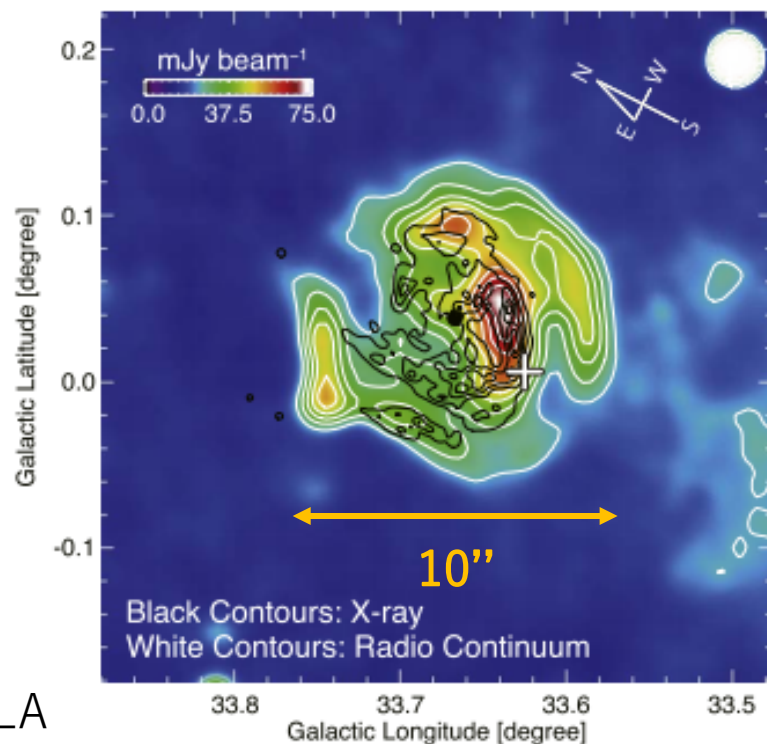
- 野辺山45m望遠鏡(20")を用いてKesteven79(超新星残骸)を12CO(J=1-0)で観測
- Kesteven79と相互作用する分子と原子を発見し、それらの空間分布がX線、電波のshellと似ている
- 電波、X線のピーク付近ではCO3-2/1-0が0.8以上と高い
⇒超新星爆発によって暖められた
- SNR(超新星残骸)にまでのkinematic distanceを5.5kpc、SNRの半径が8pcと決めた。
- 宇宙線に含まれる陽子の10%がSNR由来である。
- ガンマ線がハドロン由来であるとする、1GeV以上の陽子のエネルギーはトータルで、推定 5×10^{48} ergである

Introduction



Kesteven 79

- (l,b)~(33.° 6, 0.° 1)
- 超新星残骸
- 電波連続輝線のshellの中にX線の emission
- dynamical ageが推定 2.7×10^4 yr (距離を7Kpcと仮定)
- 分子雲が付随



先行研究

- 視線速度105km/sの濃い分子雲がKes79と空間的に一致
 - 速度範囲20km/sにわたるような幅広い分子雲輝線を確認
- ⇒分子雲とshockとの影響か
⇒しかし、証拠が少ない



より多くの量のSNR周辺の以下のような星間物質のデータが必要

- (1)shockによって励起されたOH masers
- (2)SNRの衝撃波によるshellを拡張させる星間物質
- (3)より大きなshockによる高温ガス

また、分子雲とガンマ線の空間分布も一致
⇒宇宙線の起源を理解するのに重要



本研究の目的

SNRにおけるCR protonのエネルギーを決定するためにKes79に付随する星間分子雲や原子ガスを特定する
観測：12CO(J=1-0) 野辺山45m望遠鏡 FOREST
アーカイブデータ：X線,H I ,21cm連続輝線

Result

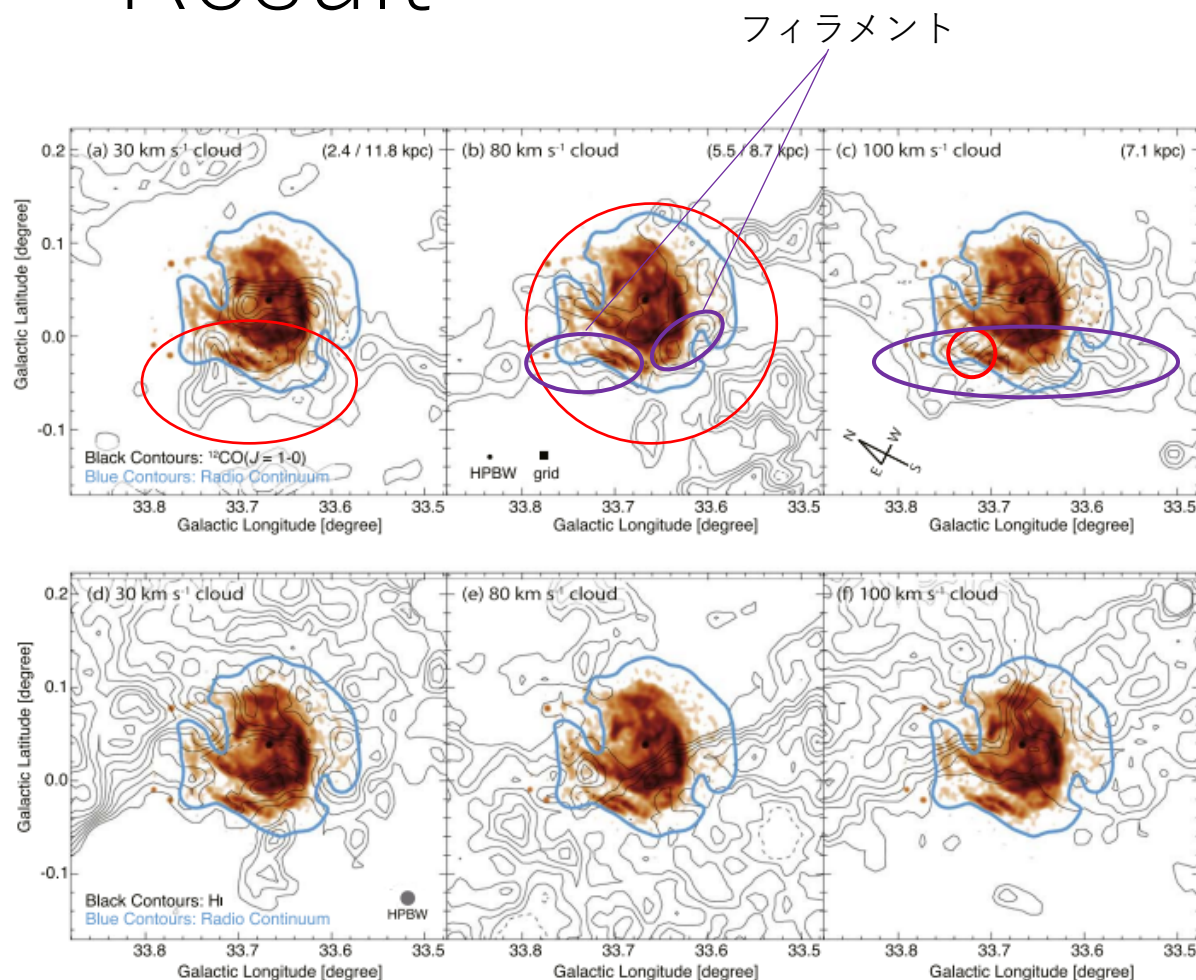


Figure 2. Integrated intensity distributions of $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ ((a)–(c), black contours) and H I ((d)–(f), black contours) superposed with the X-ray image as shown in Figure 1. The velocity range is $V_{\text{LSR}} = 30.5\text{--}39.5 \text{ km s}^{-1}$ for (a) and (d); $V_{\text{LSR}} = 82.5\text{--}86.5 \text{ km s}^{-1}$ for (b) and (e); and $V_{\text{LSR}} = 99.5\text{--}112.5 \text{ km s}^{-1}$ for (c) and (f). The contour levels are every 3 K km s^{-1} from 10 K km s^{-1} for (a); every 4 K km s^{-1} from 18 K km s^{-1} for (b); every 10 K km s^{-1} from 60 K km s^{-1} for (c); every 30 K km s^{-1} from 840 K km s^{-1} for (d); every 20 K km s^{-1} from 380 K km s^{-1} for (e); and every 40 K km s^{-1} from 690 K km s^{-1} for (f). The blue contours indicate the boundary of the radio continuum. The contour level is 25 mJy beam^{-1} ($>45\sigma$). The kinematic distances corresponding to the velocity range are indicated in the top right of each panel.

12COに関して(a),(b),(c)

- 30km/s
クラウドの運動学的距離はnear sideで2.4kpc、far sideで11.8kpc

- 80km/s
X線shellの南部では、COと逆相関の関係
X線のdouble-shell-like structures
クラウドの運動学的距離はnear sideで5.5kpc、far sideで8.7kpc

- 100km/s
この速度のクラウドがKes79に付随していると考えられてきた
クラウドの運動学的距離は7.1kpc
強度が30,80km/sに比べて3,4倍
⇒ 30,80km/sのクラウドのほうが広がっている

H I に関して(d),(e),(f)

- 30km/s
H I のshell構造がX線shellと一致
- 80km/s
南部、北東ではX線フィラメントの分布と一致
- 100km/s
H I は北西部のX線shellとのみ一致
CO分布をすべてカバー

COとH I のshell構造の広がり

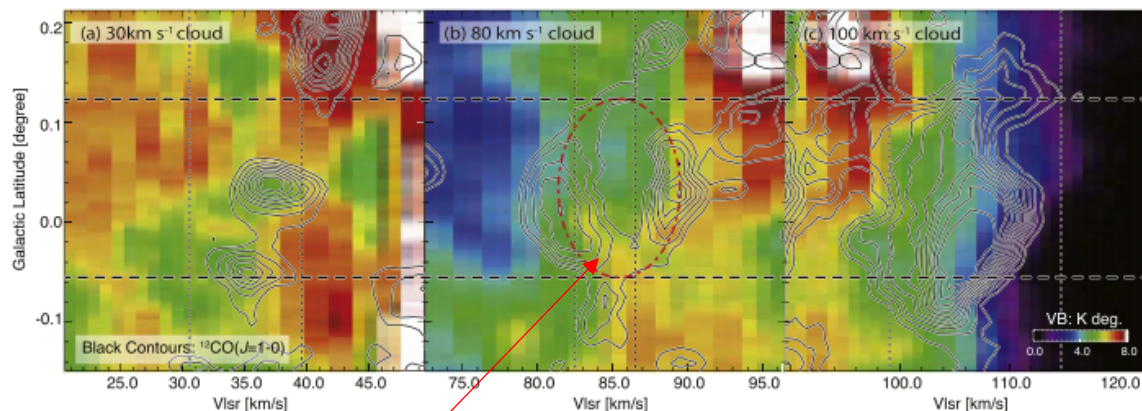


Figure 3. Velocity-galactic latitude diagrams of H I superposed on the $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ contours in (a) the 30 km s^{-1} cloud, (b) the 80 km s^{-1} cloud, and (c) the 100 km s^{-1} cloud. The integrated range of Galactic longitude is from 33.64 to 33.71 . The CO contour levels are every 0.06 K degree from 0.1 K degree for (a) and (c); and every 0.05 K degree from 0.22 K degree for (b). The vertical and horizontal dashed lines indicate the integrated velocity range and the size of the radio-continuum shell, respectively.

CO 3-2/1-0 Ratio Map $R_{3-2/1-0} \sim 0.6$

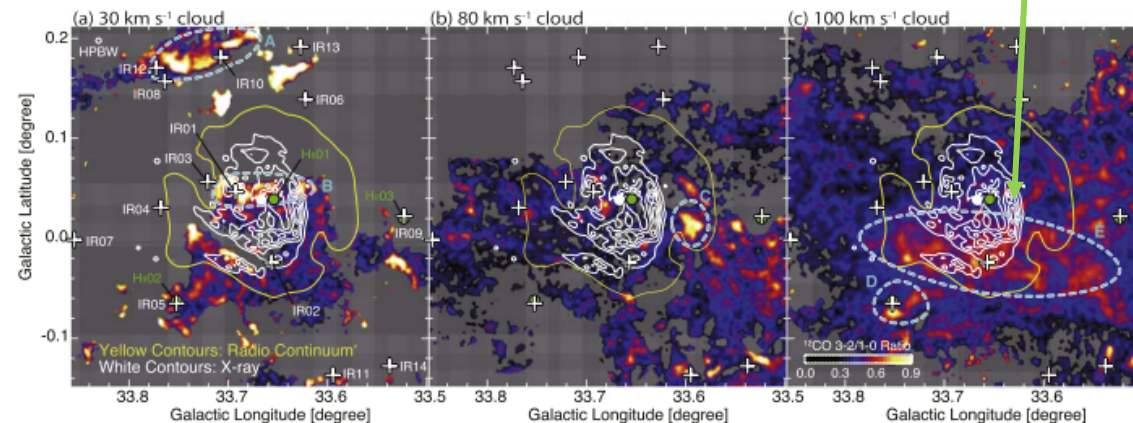


Figure 4. Spatial distribution of the line intensity ratio between $^{12}\text{CO}(J=3-2)$ and $^{12}\text{CO}(J=1-0)$. The velocity range is $V_{\text{LSR}} = 30.5\text{--}39.5\text{ km s}^{-1}$ for (a); $V_{\text{LSR}} = 82.5\text{--}86.5\text{ km s}^{-1}$ for (b); and $V_{\text{LSR}} = 99.5\text{--}112.5\text{ km s}^{-1}$ for (c). The superposed contours indicate the X-rays (white) and radio continuum (yellow). The contour levels of the X-rays and radio continuum are the same as those in Figures 1 and 2, respectively. The IRAS point sources and H II regions are indicated by the crosses and circles (see also Table 1). The regions bright in the intensity ratio of CO $J=3-2/1-0$ are enclosed by dashed lines.

- $30\sim 100\text{ km/s}$ にわたって共通の構造はない

- Cavity構造

⇒ 電波連続輝線の境界線と一致

これが**ガスの広がり**を表す証拠か
(4 km/s)

- $R_{3-2/1-0} > 0.6$ の場所をA-Eとそれぞれ定義
- $R_{3-2/1-0} > 0.8$ はA,B,Cのみ
B,Cは電波shellの中にある
- A,B,D,EはH II領域とIRAS point source(赤外線)を含む
⇒ stellar heatingの存在

Large Velocity Gradient(LVG)解析

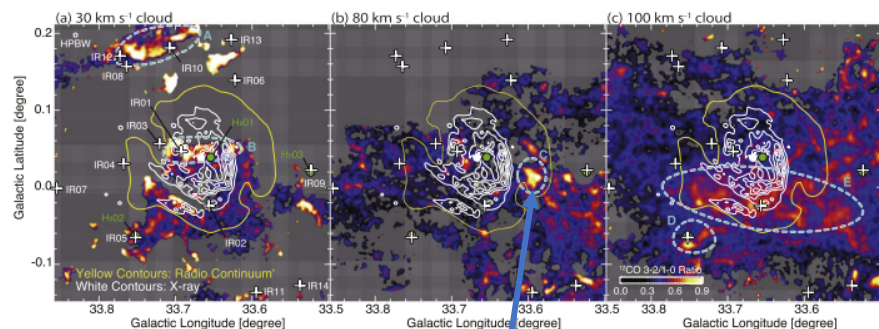


Figure 4. Spatial distribution of the line intensity ratio between $^{12}\text{CO}(J=3-2)$ and $^{12}\text{CO}(J=1-0)$. The velocity range is $V_{\text{LSR}} = 30.5\text{--}39.5 \text{ km s}^{-1}$ for (a); $V_{\text{LSR}} = 82.5\text{--}86.5 \text{ km s}^{-1}$ for (b); and $V_{\text{LSR}} = 99.5\text{--}112.5 \text{ km s}^{-1}$ for (c). The superposed contours indicate the X-rays (white) and radio continuum (yellow). The contour levels of the X-rays and radio continuum are the same as those in Figures 1 and 2, respectively. The IRAS point sources and H II regions are indicated by the crosses and circles (see also Table 1). The regions bright in the intensity ratio of $\text{CO } J=3-2/1-0$ are enclosed by dashed lines.

周囲に温めるものが無いのに
R3-2/1-0が高いcloudCについて解析

$$\frac{dv}{dr} = \frac{1.2 \text{ km/s}}{1.2 \text{ pc}} = 1 \text{ km/s} \cdot \text{pc}$$

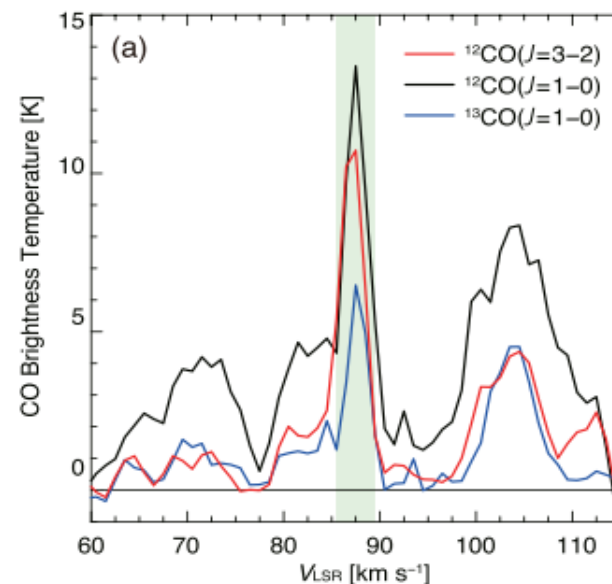
dv : CO輝線の半値幅

dr : cloudCの半径

Kinematic distance=5.5kpc

$[^{12}\text{CO}/\text{H}_2] = 5 \times 10^{-5}$

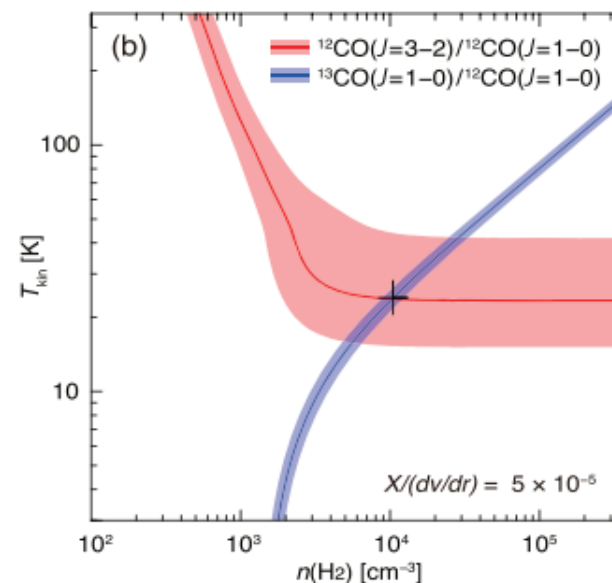
$[^{12}\text{CO}]/[^{13}\text{CO}] = 75$



図(a)より

$R3-2/1-0 \sim 0.84$

$^{12}\text{CO } J=1-0 / ^{13}\text{CO } J=1-0 \sim 0.45$



図(b)より

$T_{\text{kin}} \sim 24 \text{ K} (16\text{--}42 \text{ K})$

$n(\text{H}_2) \sim 10,000 \text{ cm}^{-3}$
(6000-30,000 cm^{-3})

Figure 5. (a) CO spectra toward cloud C. The black, red, and blue spectra represent the $^{12}\text{CO}(J=1-0)$, $^{12}\text{CO}(J=3-2)$, and $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ emission lines, respectively. (b) LVG results on the number density $n(\text{H}_2)$ and kinematic temperature T_{kin} plane toward cloud C. The red and blue solid lines indicate the intensity ratios of $^{12}\text{CO}(J=3-2)/^{12}\text{CO}(J=1-0)$ and $^{13}\text{CO}(J=1-0)/^{12}\text{CO}(J=1-0)$, respectively. The cross represents the best-fit values of $n(\text{H}_2)$ and T_{kin} (for details, see the text).

Discussion① Kes79に付随するcloudは何か？

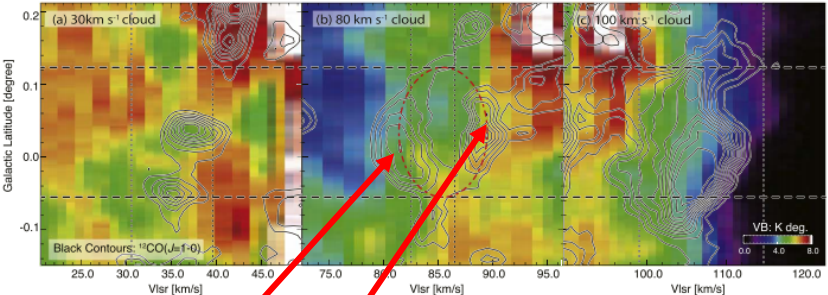


Figure 3. Velocity-galactic latitude diagrams of H I superposed on the $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ contours in (a) the 30 km s^{-1} cloud, (b) the 80 km s^{-1} cloud, and (c) the 100 km s^{-1} cloud. The integrated range of Galactic longitude is from $33^\circ 64'$ to $33^\circ 71'$. The CO contour levels are every 0.06 K degree for (a) and (c), and every 0.05 K degree from 0.22 K degree for (b). The vertical and horizontal dashed lines indicate the integrated velocity range and the size of the radio-continuum shell, respectively.

81.5と89.5km/sでピーク
⇒ $85.5 \pm 4\text{ km/s}$
4 km/sでガスが広がっている

典型的な、SNRに付随するガスの拡張
速度は $7\sim 13\text{ km/s}$
⇒ 非常に近い値

CO 3-2/1-0 Ratio Mapについて

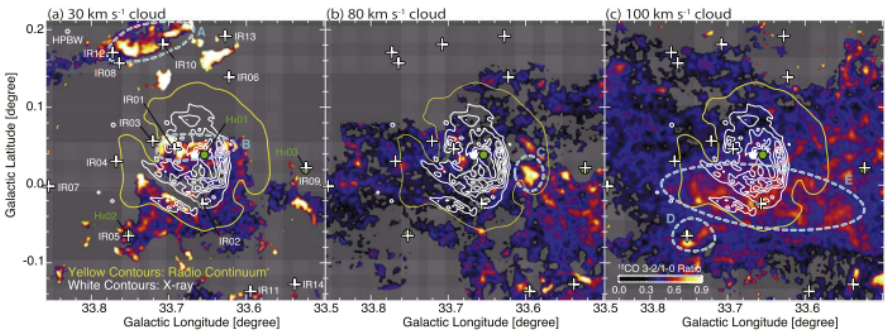


Figure 4. Spatial distribution of the line intensity ratio between $^{12}\text{CO}(J=3-2)$ and $^{12}\text{CO}(J=1-0)$. The velocity range is $V_{\text{LSR}} = 30.5\text{--}39.5\text{ km s}^{-1}$ for (a), $V_{\text{LSR}} = 82.5\text{--}86.5\text{ km s}^{-1}$ for (b), and $V_{\text{LSR}} = 99.5\text{--}112.5\text{ km s}^{-1}$ for (c). The superposed contours indicate the X-rays (white) and radio continuum (yellow). The contour levels of the X-rays and radio continuum are the same as those in Figures 1 and 2, respectively. The IRAS point sources and H II regions are indicated by the crosses and circles (see also Table 1). The regions bright in the intensity ratio of CO $J=3-2/1-0$ are enclosed by dashed lines.

A,B,D,Eの近くにはIRAS pointやH II領域が存在

⇒ 外部から温められている

じゃあなぜCはRatioが高い？

⇒ T_{kin} が 24 K であるから、Shock heatingが起きた

Table 1 Properties of IRAS Point Sources and H II Regions around Kes 79									
No.	Source Name	l (deg)	b (deg)	F_{12} (Jy)	F_{25} (Jy)	F_{60} (Jy)	F_{100} (Jy)	Regions	References
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
IR01	IRAS 18501+0038	33.69	0.05	1.5	1.4	50.5	419	B	(1)
IR02	IRAS 18502+0034	33.66	-0.02	2.5	20.4	158	419	E	(1)
IR03	IRAS 18501+0039	33.72	0.06	2.7	3.0	50.5	295	B	(1)
IR04	IRAS 18503+0041	33.77	0.03	2.7	1.8	37.6	162	...	(1)
IR05	IRAS 18506+0038	33.75	-0.07	2.1	10.2	82.0	122	D	(1)
IR06	IRAS 18496+0037	33.62	0.14	4.4	2.6	21.0	192	...	(1)
IR07	MSXSC G033.8580-00.0042	33.86	-0.00	...	...	...	...	...	(2)
IR08	IRAS 18498+0045B	33.76	0.16	5.3	3.4	16.4	162	A	(1)
IR09	IRAS 18498+0028	33.52	0.02	4.1	11.3	72.9	176	...	(1)
IR10	IRAS 18496+0042	33.71	0.18	1.7	3.4	26.3	192	A	(1)
IR11	[GE91] GGD 30 IRS 8	33.59	-0.14	...	...	...	...	...	(3)
IR12	IRAS 18498+0045A	33.77	0.17	2.1	3.4	16.4	141	A	(1)
IR13	IRAS 18494+0038	33.63	0.19	2.9	3.8	50.8	192	...	(1)
IR14	IRAS 18504+0025	33.54	-0.13	2.6	5.9	98.1	305	...	(1)
H II01	[KC97c] G033.7+00.0	33.65	0.04	...	...	...	...	B	(4)
H II02	HRDS G033.753-0.063	33.75	-0.06	...	...	...	...	D	(5)
H II03	MSX6C G033.5237+00.0198	33.52	0.02	...	...	...	...	...	(6)

Note. Column (1): numbers in Figure 4. Column (2): names of infrared point sources (IR01-IR14) and H II regions (H II01-H II03) around Kes 79. Columns (3)-(4): source positions in Galactic coordinates. Columns (5)-(8): fluxes of 12, 25, 60, and $100\text{ }\mu\text{m}$. Column (9): region name defined in Section 3.3. Column (10): references: (1) Beichman et al. (1988), (2) Price et al. (2001), (3) Gomez de Castro & Eiroa (1991), (4) Kuchar & Clark (1997), (5) Anderson et al. (2012), (6) Egan et al. (2003).

Discussion① Kes79に付随するcloudは何か？

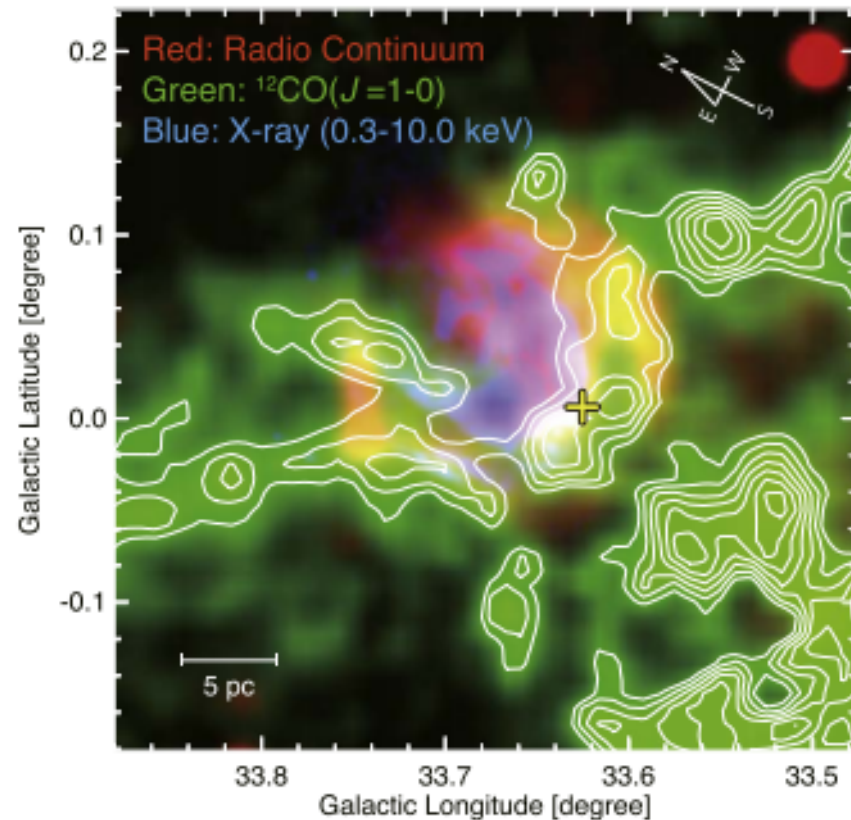


Figure 6. RGB image of the SNR Kes 79. The red, green, and blue colors represent the intensity maps of the radio continuum, $^{12}\text{CO}(J=1-0)$, and X-rays. The superposed contours indicate $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ integrated intensity. The contour levels are every 3 K km s^{-1} from 20 K km s^{-1} . The integration velocity range of CO is $V_{\text{LSR}} = 82.5\text{--}86.5 \text{ km s}^{-1}$. The position of the GeV gamma-ray peak is indicated by the yellow cross (Auchettl et al. 2014).

- 電波連続輝線のshellが南西の二つのCOピークと完全に一致

⇒ shock-cloud interactionの兆候

- cavity wallがX線の空間分布と一致

また、CIEプラズマがradio shellの外部に向かって広がり、NEIプラズマが内部に集中していることが分かっている

- ⇒ (1) shockに面したCIEプラズマは高密度ガスのwallとの相互作用で出来た
(2) shock-cloud interactionによってradio shell内の超新星のejectaを温め、それがNEIプラズマとして観測された

結論： Kes79に付随するcloudの速度は80km/s

Discussion② Kes 79の距離と年齢

- ・ 距離について

Galactic rotation curve model (Brand & Blitz)
を適用すると

Kinematic distance : $5.5 \pm 0.3 \text{ kpc}$ (near side)
 $8.7 \pm 0.3 \text{ kpc}$ (far side)

Kes79に対する吸収柱密度は $1.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$

- ・ near sideを仮定すると

星間ガスの速度分布は 2-81.5 km/s

$N_p(\text{H2} + \text{H I}) \sim 3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$

- ・ far sideを仮定すると

星間ガスの速度分布は 2-110 km/s

$N_p(\text{H2} + \text{H I}) \sim 6 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$

よって **near side** の可能性が高い

- ・ Dynamical ageについて

$$t_{age} = \frac{2R_{sh}}{5V_{sh}}$$

R_{sh} : SNRの半径

V_{sh} : shock velocity

$R_{sh} = 8 \text{ pc}$

$V_{sh} = 380 \pm 20 \text{ km/s}$

より

$T_{age} = 8300 \pm 500 \text{ yr}$

Discussion③ Total CR Protons Energy

$$W_{pp}^{tot} \sim t_{pp \rightarrow \pi_0} \times L_\gamma$$

W_{pp}^{tot} : 全CR Protonsエネルギー

$t_{pp \rightarrow \pi_0}$: 放射冷却時間

L_γ : ガンマ線光度

より $W_{pp}^{tot} \sim 5 \times 10^{48} \text{erg}$

これは超新星爆発エネルギーの半分相当する

Table 2
Comparison of Physical Parameters in the γ -Ray SNRs

	RX J1713.7–3946 ^a	Vela Jr. ^b	HESS J1731–347 ^c	Kes 79 ^d	W44 ^e
Age (years)	1600	2400	4000	8300 $\pm$ 500	20,000
Distance (kpc)	1	0.75	5.2	5.5	3
Diameter (pc)	17.4	11.8	22	16	25
Molecular proton mass ($10^4 M_\odot$)	0.9	0.1	5.1	1.7	40
Atomic proton mass ($10^4 M_\odot$)	1.1	2.5	1.3	0.2	6
Total proton mass ($10^4 M_\odot$)	2.0	2.6	6.4	1.9	46
$N_p(\text{H}_2)$ (cm^{-3})	60	4	64	310	180
$N_p(\text{H I})$ (cm^{-3})	70	96	16	50	20
$N_p(\text{H}_2 + \text{H I})$ (cm^{-3})	130	100	80	360	200
$N_p(\text{H}_2)/N_p(\text{H I})$	0.9	0.04	4	6	9
Total CR proton energy (10^{48}erg)	0.4 ^f	0.7	5	5	10

- ・ 全CR Protonsエネルギーと $N_p(\text{H}_2)/N_p(\text{H I})$ は時間に比例して大きくなる
- ⇒ 宇宙線の加速度は時間に比例
- ⇒ Shockが高密度分子雲にどのくらい伝搬するかは時間変化に影響する

今後より高分解能な観測を行うことによってより良い精度を実現するだろう

Summary

- 超新星残骸Kes79に付随する分子・原子雲は30,80,100km/sの三つの候補があることを見つけ、電波とX線のshellの空間分布が一致していることが分かった
- 80km/sのクラウドが4 km/sで広がり、それらはSNR shockと超新星爆発のprogenitorからの強い風によって生まれ、その中のcloudCは高いCO3-2/1-0を示し、shockとの相互作用によって T_{kin} が24Kであり、結局80km/sのクラウドがKes79に付随しているとした
- 吸収柱密度から運動学的距離が5.5kpc、dynamical ageが $8300 \pm 500 \text{ yr}$ であるとした
- 全体のCR protonエネルギーが $5 \times 10^{48} \text{ erg}$ であり、それが超新星爆発の全運動エネルギーの半分であることを計算し、それと $N_{\text{p}}(\text{H}_2)/N_{\text{p}}(\text{H I})$ が時間的に増加することが分かり、宇宙線の加速度やshockの伝搬が時間的に増加することが分かった