

TeV 域ガンマ線超新星残骸 G347.3-0.5 と相互作用する分子雲の発見

森 口 義 明

〈名古屋大学大学院理学研究科天体物理学研究室 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉

e-mail: mori@a.phys.nagoya-u.ac.jp

超新星残骸 (SNR) は、銀河系に満ちている宇宙線のうち 10^{15} eV 以下のエネルギーを担う成分についての主な加速現場であると考えられています。特にその主成分である陽子が SNR において加速されているかどうかという問題は、現在まで大きな興味をもたれてきました。私たちは一酸化炭素分子輝線を用いた星間分子雲観測を行い、太陽系から約 1 kpc の距離にあって TeV ガンマ線 SNR G347.3-0.5 と相互作用している分子ガスの存在を明らかにしました。これらの分子ガスは非熱的 X 線放射の空間分布と非常に良い相関を示し、約 200 太陽質量の分子雲が X 線および TeV ガンマ線のピークに付随していることは、SNR と分子雲の相互作用が陽子加速の源である可能性を示しています。このことから、私たちは加速された陽子の総エネルギーを約 10^{48} erg (加速効率 0.1% に相当) と推定し、陽子加速の問題における観測的な制約を与えました。

1. はじめに

1.1 超新星残骸と宇宙線の起源

超新星残骸 (SNR) は、超新星爆発によって形成された衝撃波の層が星間空間に膨張し、広がった殻状構造をもつようになった天体をいいます。SNR に関するさまざまな研究テーマの中で最も大きなものの一つは、宇宙線の起源にまつわる謎を解明することです。宇宙線とは、宇宙空間を飛び交っている高エネルギー粒子のことで、その正体は主に陽子や電子です。私たちの銀河系にはさまざまなエネルギーをもった宇宙線粒子が満ちているわけですが、粒子を高いエネルギーまで加速することはどこでも可能なわけではありません。ありふれた陽子や電子を、どこかで強く加速してやる機構が必要です。ただし、電荷をもった宇宙線は銀河磁場によって進路を曲げられてしまうため、宇宙線を直接観測してもそれが本来どこから来たものなのかはわかりません。天体から宇宙線

が出ていることを知るためには、あとで述べるように間接的な手段を用いるのですが、その場合は非常に微弱な放射になってしまいほとんど検出することができません。そのため、これらの宇宙線がどこで加速されているかが、宇宙線の存在が発見されて以来の大きな謎だったのです。

そして、宇宙線の加速に最も大きな貢献をしている天体が SNR だといわれています。この説は古く 1950 年代から、Iosif Shklovsky や早川幸男らによって提唱されていました。銀河内宇宙線の総エネルギーを維持するために必要なエネルギーを供給することが可能な天体現象は、銀河系内では超新星爆発による SNR しかありません。それに、SNR の衝撃波はとても効率の良い加速器でもあります。その仕組みは衝撃波面の磁場に跳ね飛ばされた粒子が何度も跳ね返る間に宇宙線として十分な高エネルギーを獲得するというもので¹⁾、これなら銀河宇宙線のエネルギースペクトルもうまく説明できるのです。

1.2 陽子加速と TeV ガンマ線 SNR

実際に加速された宇宙線の証拠を超新星残骸から発見できるかどうか、天文学者たちの興味のものでした。宇宙線は何種類かの異なる過程を経てガンマ線や X 線や電波を放射するので、これらを観測してデータを組み合わせると、モデルとの比較からその宇宙線が陽子なのか電子なのかが判断できます。電子については、SNR「SN1006」から実際にそれを示す非熱的 X 線が検出され²⁾、加速が起こっていることが予言されました。つづいて、SN1006 から電子起源の TeV (テラ・エレクトロンボルト) ガンマ線も検出され、SNR が粒子加速の現場であることが裏づけられました³⁾。しかし、宇宙線の主成分である陽子を起源とするガンマ線は、まだどの SNR からも検出されていませんでした。陽子は電子よりはるかに質量が大きく、電子に比べて磁場や光子との相互作用によるエネルギー損失がほとんどありません。つまり、電子と同じように加速されていても観測可能な電磁波を出しにくいのです。加速された陽子がガンマ線を放射するには、ターゲットに相当する物質との衝突によるパイ中間子の生成・崩壊を経なければなりません。例えば、SNR の周りに「壁」となる高密度領域がない限り、われわれには加速の証拠をその場で見ることはできません。

しかし最近、オーストラリアに建設されたチェレンコフ光望遠鏡 CANGAROO が、超新星残骸「G347.3-0.5」から初めて陽子起源と考えられるガンマ線を検出しました⁴⁾。これは大きな発見でしたが、二つ未解決の問題がありました。一つは、ガンマ線の観測では天体までの距離がわからないこと。二つ目は上で述べたとおり、もし陽子起源だとすると、そこに星間分子雲のような濃い物質が存在している必要があることです。これらについては、CANGAROO 望遠鏡は情報を与えてくれません。この問題を解決するための最も直接的な方法は、SNR の方向に高密度の分子ガスが存在するかどうかを実際に観測して確認することです。

2. G347.3-0.5 の CO 分子輝線観測

2.1 「なんてん」による銀河面サーベイ

そこで私たちは、南米チリのラスカンパナス天文台に設置された名古屋大学の「なんてん」電波望遠鏡を用いて G347.3-0.5 の方向を観測しました。「なんてん」によって一酸化炭素分子 (CO) が放射する回転遷移輝線を観測することで、濃く冷たい分子雲の分布を知ることができます。また、分子雲と観測者の相対速度から、天体までの距離も推定することができます。今回の観測は、「なんてん」による銀河面広域探査計画の一環として行われました。この計画は、銀河面を銀経方向に約 240 度 (180 度から 60 度)、銀緯方向に約 10 度から 20 度の範囲を 2~8 分角グリッドで観測したもので、現在ではすべての観測を終了し、総計 100 万点以上の観測データを得ています⁽⁵⁾ (ほか、PASJ Vol. 53, No. 6, 2001)。

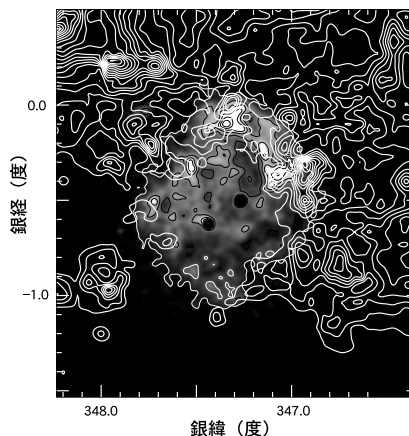


図 1 X 線衛星 ROSAT による超新星残骸 G347.3-0.5 の X 線強度分布 (グレイスケール; ROSAT アーカイブデータベース) と、なんてん望遠鏡による CO ($J=1-0$) 分子輝線の強度分布 (コントア) のマップを重ねたもの。CO の分布はそれぞれの観測点についてスペクトルを視線速度 -11 km s^{-1} から -3 km s^{-1} まで積分して得られたもので、これは SNR と主に相互作用している速度成分に相当する。最低コントアレベル、コントア間隔は共に 4 K km s^{-1} 。

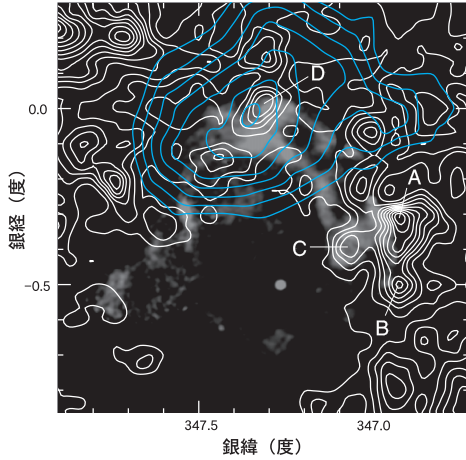


図2 図1と同じCO積分強度マップの拡大図を、X線衛星XMM-Newtonによって得られたX線強度分布(グレイスケール)⁸⁾に重ねたもの。COのコントアレベル(白線)は図1に同じ。分子雲の塊のピーク位置を図中にA, B, C, Dで示してある。また、CANGAROOによるTeVガンマ線の相対的強度分布を青線のコントアで示してある。TeVガンマ線のコントアは検出の有意性分布から計算したもので、TeVガンマ線の最低コントアレベル、コントア間隔はそれぞれ55%, 7%。

2.2 分子雲とSNRの付随

私たちはまず、この銀河面探査のベースデータ

(4分角グリッド)をG347.3-0.5の方向について見直し、分子雲の大局的な空間・速度分布を調べました。次いで、2分角グリッドでより感度の高い追観測を行いました。この結果、G347.3-0.5に分子雲が付随していることが明らかになりました。SNRの広がり(約1度角)程度のスケールで見ると、分子雲の全体的な分布は、銀経~347.3度、銀緯~-0.5度の周りが抜けており穴のような構造をもっています(図1)。この構造が、ROSAT⁶⁾やASCA⁷⁾などのX線衛星によって得られたSNRのX線像を囲むように存在しています。また、より微細な構造(数分角程度のスケール)で見ても、X線とCOの空間分布は非常に良い相関を示すことがわかりました。CO輝線の強度ピークの位置は、XMM-Newton衛星によって得られた像⁸⁾におけるX線ピークと一致しています(図2)。図1は、視線速度にして -11 km s^{-1} から -3 km s^{-1} の範囲の分子ガス分布を示したものです。この速度を一般的な銀河回転モデル⁹⁾を仮定して太陽からの距離に換算すると、0.5 kpcから1.6 kpcに相当します。CO輝線強度分布で見える穴は、X線強度の弱い南東の方向を除いて、SNRのX線像の周りを囲むように存在しています。図2

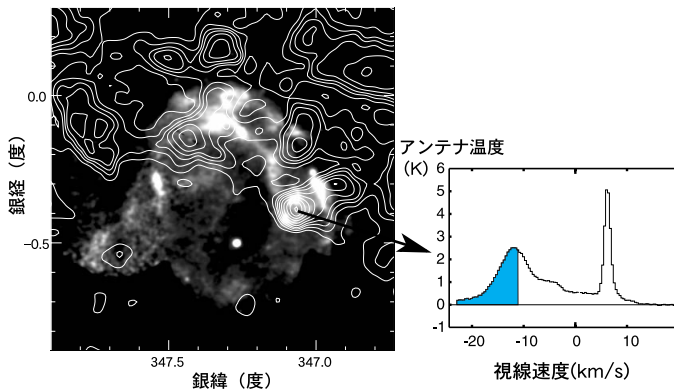


図3 (左図) SNRに付随する分子ガスのうち高速度成分、またはウィング成分(コントア)をXMM-NewtonによるX線像(グレイスケール)に重ねたもの。CO強度分布はそれぞれの観測点についてスペクトルを視線速度 -14 km s^{-1} から -11 km s^{-1} まで積分して得られたもので、コントアレベルは下から2, 4, 6, 8, 11, 15, 20, 25, 30, 35 K km s^{-1} 。(右図) 高速度成分が有意にみられるピークC付近(銀経~347.05度、銀緯~-0.40度)の領域のスペクトルを平均したもの。

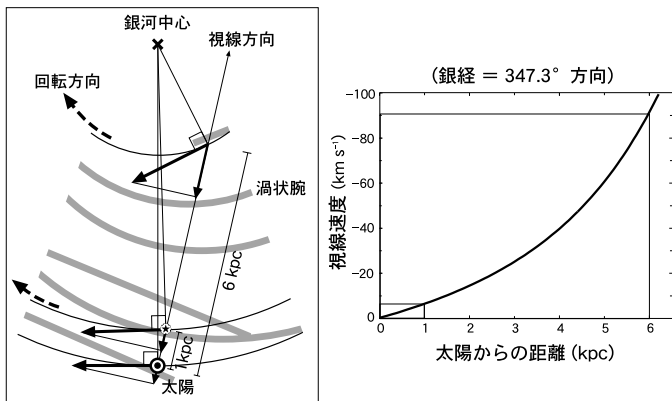


図 4 (左図) 銀河面を上から見た模式図. 銀河回転モデルによる銀河腕の位置¹⁴⁾を灰色の太線で示してある. 点線矢印は銀河回転の方向. G347.3-0.5 が 1 kpc にある場合の位置, 6 kpc にある場合の位置, 太陽の位置, それぞれについて, 銀河系が一樣に回転していると仮定した場合の回転速度とそれを観測者から見たときの視線方向成分を実線矢印で示してある. 銀河中心を中心にとった同心円を実線(細)で示し, その上に太陽の位置を二重丸で, G347.3-0.5 の距離を 1 kpc とした場合の位置を星印で, それぞれ示す.
(右図) G347.3-0.5 の方向 (銀経=347.3 度) で, 太陽からの距離と視線速度の関係. ある視線速度に対して距離は通常二つの解 (近い距離と遠い距離) をもつが, 今回の場合は SNR が遠い距離 (10~15 kpc) にある可能性は非常に低いため, ここでは近い距離の場合だけを示してある.

は, 図 1 と同じ CO の分布を XMM 衛星の X 線像, および CANGAROO の TeV ガンマ線分布と重ねたものですが, X 線の強度分布の中でも特に強いいくつかのピークが, A~D で示した CO のピークに一致しています. さらに, TeV ガンマ線の分布は CO 強度のピークの一つ「D」の位置にちょうど一致しています. このような付随は, 視線速度 0 km s^{-1} から -11 km s^{-1} 内の他の速度帯でほかにもいくつか見られました. これら四つの CO ピークがすべて X 線ピークの方か, またはそれらに隣接して存在するという事は, 分子雲が SNR の衝撃波に衝突してその表面から強い X 線が放射されていることを意味していると考えられます. これに似た CO と X 線の付随の様子は, 他の SNR でも見られることがあります¹⁰⁾. 図 3 は, 視線速度 -14 km s^{-1} から -11 km s^{-1} の範囲の分子ガス分布を示したものです. この範囲では, CO ピーク C の方向で局所的に分子ガスの速度が $4\sim 5 \text{ km s}^{-1}$ ほどシフトしている様子が見られました. 図 3 でピーク C の方向の CO スペクトルにおいて, 青で示した部分は速度がシフトして

いる成分です. この速度シフトは, 少なくとも 20 km s^{-1} に達しています. これに似た幅広い CO 輝線プロファイルの例は IC443¹¹⁾ や W28¹²⁾ といった他の SNR でも見られ, SNR と周辺分子雲の相互作用の明らかな証拠とみなされています. ここで加速された分子ガスの運動量は約 1,000 太陽質量 km^{-1} 程度と見積もられ, 表 1 で与えられる物理量から計算した値と一致します.

3. 考察

3.1 距離と年齢

今回の新しい分子ガス同定の結果は, 大きな意味があります. まず, SNR の距離の見直しです. これまでは, 決定的ではないものの約 6 kpc の距離にあるというのが通説でした¹³⁾. しかし, なんてんのデータで SNR と空間的相関のある分子雲のうちで加速されていない成分の平均速度を -6 km s^{-1} とすると, 力学的距離は約 1 kpc となります (図 4(右)参照). 図 4(左)は, 距離が 1 kpc の場合と 6 kpc の場合それぞれについて, 銀河面上での位置と視線速度の関係を模式的に示したもので

表1 G347.3-0.5の物理量

パラメーター	距離=1 kpc	距離=6 kpc
半径 [30 分角] (pc)	8.7	52
歴史的記録	西暦 393 年	—
年齢 (年)	1600 年	>10000 年
進化段階	自由膨張	断熱膨張
周辺密度 (cm ⁻³)	0.01	<0.003
衝撃波速度 (km ⁻¹)	5,500	3,200
加速粒子の総エネルギー (erg)	~10 ⁴⁸	~10 ⁵⁰

歴史的記録は¹⁵⁾によって提唱されたもの。距離 6 kpc の場合における周辺密度、衝撃波速度、衝撃波温度などの推定については、年齢 20000 年を仮定した。

す。

この距離を仮定すると、表 1 に示したように、6 kpc の場合に比べて SNR の基本的物理パラメーターが大きく変わることになります。距離 1 kpc の場合、SNR の年齢はこれまでの推定よりはるかに若く 1000 年のオーダーと考えられます。これに対応する歴史的な超新星としては、中国の古代文献に記録されている西暦 393 年の超新星爆発¹⁵⁾が該当します。また、SNR によって掃き集められた物質の総質量の上限値 (X 線の観測¹³⁾から計算したものがイジェクター (超新星の親星からの噴出物) の質量よりも小さくなることから、G347.3-0.5 は爆発後の初期速度を保ったままで膨張している (自由膨張期) と考えられます。以前の 6 kpc という推定距離は、コロンビア 1.2 m 望遠鏡による空間分解能 30 分角の CO データ¹⁶⁾をもとに、-90 km s⁻¹ 付近にある分子雲との付随によって主張された値ですが、今回の結果はそれと明確な対照をなすものです。今回の CO データも -90 km s⁻¹ で同じ分子雲を確認しましたが、なんてんの分解能で見た場合には空間分布の相関が良くないため、付随していない可能性が高いと考えられます。また、銀経 347.3 度の方向で通常よりも星間物質の柱密度が小さいことから、

X 線の吸収量によっても大きな距離が主張されてきました¹³⁾。確かに、この方向には距離 3 kpc にスーパーシェル GS347.3+0.0-21⁹⁾があり、それによって形成されたと考えられる星間物質の少ない穴があります。とはいえ、なんてんの CO データと Parkes の HI データ¹⁷⁾は、視線速度 6 km s⁻¹ 付近の太陽系近傍分子ガスと原子ガスだけでも X 線の吸収を説明するのに十分な柱密度に達することを示しています。

3.2 ガンマ線の起源

2.2 で述べたように、私たちは特に X 線分布との空間的な一致から G347.3-0.5 が距離 1 kpc の分子雲に付随している可能性が高いと考えました。図 2 で示したように、CANGAROO の TeV ガンマ線分布は、CO のピーク D の位置とちょうど一致しています。ガンマ線の感度は最大強度の点から 0.5 度も離れれば有意に減少しますが、これまでのガンマ線の初期データは、それが点源ではなく多少広がった領域からきている可能性を示しています。このことから私たちは、SNR のシェルにおいて生成された宇宙線がピーク D 方向の分子雲と相互作用して TeV ガンマ線を放射しているのではないかという仮説を立てています。多波長のスペクトルデータのうち、数 TeV のエネルギー領域に見られる急な傾きは今のところ、衝撃波面内で加速された高エネルギー陽子によるパイ中間子崩壊によって説明されています⁴⁾。もしこのガンマ線解析結果が正しいければ、分子雲と SNR の相互作用によって陽子加速が起きていることが立証されるでしょう。さらに、この仮説が正しい場合、宇宙線陽子の加速は SNR 中の硬 X 線ピーク (銀経~347.3 度, 銀緯~0.0 度) 付近の限られた領域で起こっていることとなります。もしそうでなければ、分子雲の分布をカバーするようなもっと空間的に広がったガンマ線放射が観測されるはずだからです。ただし、TeV ガンマ線の観測データはまだ初期段階であり、この仮説の正否を問うにはより質の高いデータが必要です。

一方、EGRET ガンマ線衛星によって SNR の近く（銀経 ~ 348.0 度，銀緯 ~ -0.1 度）に検出されたガンマ線源 3 EG J1714-3857¹⁸⁾ は，もし 90 km s^{-1} にある分子雲との付随が正しいとすれば SNR には接触していないことになります。CO ピーク D の方向にある約 0.2 度四方の分子雲はサイズにして 3 pc 程度で，その質量を計算すると約 200 太陽質量になります。もし，この分子雲の塊だけが実際に宇宙線陽子にさらされていると仮定すると，加速された陽子のもつ総エネルギーは，以下の関係式⁴⁾を用いて約 10^{48} erg と推定されます。

$$(E/10^{48})(M_{\text{cloud}}/200)(l/3)^{-3}(d/l)^{-5}=1.35$$

ここで， E （単位は erg）は加速された陽子の総エネルギー， M_{cloud} （単位は太陽質量）はそれらと相互作用している分子雲の質量， l （単位は pc）は分子雲のサイズ， d （単位は kpc）は距離を表しており，パイ中間子崩壊による宇宙線陽子の生成率を与える表式です。この 10^{48} erg というエネルギーと，超新星爆発によって放出される総エネルギー（約 10^{51} erg ）から，宇宙線陽子の加速効率は約 0.1% と推定されました。ただし，これは SNR に付随する分子雲の一部（ピーク D の塊のみ）について求めた値であり，SNR 全体での加速効率ではありません。

3.3 SNR の周辺環境

X 線衛星「ASCA」や「Chandra」¹⁹⁾ によって観測された G347.3-0.5 の硬 X 線スペクトルは，ほぼ完全な非熱的放射によるものでした。相対論的電子による放射の標準的理論でこのスペクトルを説明するためには， $5,000 \text{ km s}^{-1}$ 以上という極端に大きな衝撃波速度を必要とします。これもまた，SNR が未だ自由膨張段階にあるという私たちの観点と一致しています。G347.3-0.5 の衝撃波速度が大きい理由として考えられることは，周辺環境の密度が非常に低く，イジェクターがほとんど減速を受けていないということです。つまり G347.3-0.5 は，おそらく最初からそこにあった低

密度（ $\sim 0.01 \text{ cm}^{-3}$ ）な空洞の中で超新星爆発が起こって生まれた若い SNR であると考えられます。低密度の空洞は，星風かもしくは別の星が先に起こした超新星爆発によって形成されたものでしょう。そして，密度が低いため減速せずに進行する衝撃波が周りの濃い分子雲に衝突しているというのが，現在の G347.3-0.5 の状況ではないかと想像できるのです。

これは SN1006 の場合と対照的です。SN1006 も TeV ガンマ線が検出されている若い SNR ですが，そのスペクトルは G347.3-0.5 の場合と違い，逆コンプトン散乱で説明されています。逆コンプトン散乱とは，高エネルギー電子が 2.7 K の宇宙背景放射の光子と衝突し，エネルギーの低い状態にある光子をガンマ線の領域まで叩き上げる過程のことです。SN1006 の場合は SNR の周辺に分子ガスが全く存在しないため，ガンマ線放射過程としてはパイ中間子崩壊よりも逆コンプトン散乱の方がもっともらしいのです。つまり，分子雲の存在の有無が二つの SNR におけるガンマ線放射の違いを生じさせているのではないかと考えられます。

おわりに

「なんてん」電波望遠鏡を用いて得られた新しい CO 分子輝線の観測結果から，G347.3-0.5 は今まで考えられていた遠距離の分子雲とは違い，より近い距離（1 kpc 付近）にある分子雲と強く相互作用していることが判明しました。この距離に相当する分子雲の分布において，CO のピークが TeV ガンマ線の分布と一致しており，これによって私たちは初めて宇宙線陽子の加速効率を観測的に推定することができました。

「なんてん」によってこれまでに得られた銀河面広域 CO サーベイのデータは，近い将来打ち上げられる予定のガンマ線衛星 GLAST などによって検出されるであろうさまざまな高エネルギーガンマ線源の解析において，非常に強力な道具にな

るものです。また、サブミリ波、HI、X線、ガンマ線などによる質の高い多波長観測のデータも期待されています。なかでも、より高いエネルギー域での撮像が行えるX線の観測装置は、シンクロトロン放射のカットオフを知ることによって宇宙線加速に大きな観測的制約を与えることができるため、大きな期待が寄せられています。

本稿は、名古屋大学大学院理学研究科の福井康雄教授らとの共著論文²⁰⁾を、天文月報用書き改めたものです。本稿執筆に当たり、福井教授、宇宙科学研究所の高橋忠幸教授、内山奏伸さん、平賀純子さん、名古屋大学の田原 譲教授、田村啓輔さん、大西利和さん、水野範和さん、その他論文共著者の方々に、そしてCANGAROOのデータをご提供いただいた宇宙線研究所の榎本良治助教授、さらに所属研究室のスタッフや大学院生の方々にさまざまなご指導、ご協力をいただきました。深く感謝いたします。また、なんてん望遠鏡の運営に当たり有形無形の支援をしてくださった方々、ラスカンパナス天文台のスタッフの方々にも、この場を借りて御礼申し上げます。なんてん望遠鏡は名古屋大学とカーネギー財団の合意に基づいて運営され、この研究は文部科学省による科学研究資金援助の一部を受けて行われました。

参考文献

- 1) Fermi E., 1949, Phys. Rev. 75, 1169
- 2) Koyama K., et al., 1995, Nature 378, 255
- 3) Tanimori Y., et al., 2001, in Proc. 27th int. Cosmic Ray Conf. (Hamburg) Vol. 6, ed. Simon M., Lorentz E., Pahl M. (Copernicus E. V., Katlenberg-Lindau, Germany), 2465
- 4) Enomoto R., et al., 2002, Nature 416, 823
- 5) Matsunaga K., et al. 2001, PASJ 53, 1003
- 6) Pfeffermann E., Aschenbach B., 1996, in MPE report 263, Roentgen from the Universe, ed. Zimmermann H. H., Trumper J., Yorke H. (Max-Planck-Institut fuer Extraterrestrische physik, Garching), 267
- 7) Koyama K., et al., 1997, PASJ 49, L7
- 8) Hiraga J., et al., 2004, submitted
- 9) Brand J., Blitz L., 1993, A&A 275, 67

- 10) Moriguchi Y., Yamaguchi N., Onishi T., Mizuno A., Fukui Y., 2001, PASJ 53, 1025
- 11) White G. J., Rainey R., Hayashi S. S., Kaifu N., 1987, A&A 173, 337
- 12) Arikawa Y., Tatematsu K., Sekimoto Y., Takahashi T., 1999, PASJ 51, 7
- 13) Slane P., et al., 1999, ApJ 525, 357
- 14) Russeil D., 2003, A&A 397, 133
- 15) Wang Z.-R., Qu Q.-Y., Chen Y., 1997, A&A 318, L59
- 16) Bronfman L., Alvarez H., Cohen R. S., Thaddeus P., 1989, ApJS 71, 481
- 17) Cleary M. N., Heiles C., Haslam C. G., 1979, A&AS 36, 95
- 18) Hartman R. C., et al., 1999, ApJS 123, 79
- 19) Uchiyama Y., Aharonian F. A., Takahashi T., 2003, A&A 400, 567
- 20) Fukui Y., et al., 2003, PASJ 55, 61

Molecular Gas Interacting with the TeV Gamma-Ray SNR G347.3-0.5

Yoshiaki MORIGUCHI

Department of Physics and Astrophysics, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: Supernova remnants (SNR) are believed to be major sites of acceleration of Galactic cosmic-rays whose energy is $\sim 10^{15}$ erg. In particular, it has been a big issue whether supernova remnants emitting TeV-gamma rays are sites of proton acceleration or not. We present new CO observations of molecular gas at 1 kpc distance interacting with the TeV gamma-ray SNR G347.3-0.5. Dense molecular gas toward the TeV-gamma SNR is a good predictor to verify the existence of cosmic-ray protons. One of the molecular clumps of ~ 200 solar mass coincides with the gamma-ray peak, providing strong evidence for proton acceleration. We have estimated the total energy of accelerated protons to be about 10^{48} erg, which corresponds to an acceleration efficiency of about 0.001, posing an observational constraint on the proton acceleration.