

## 論文の内容の要旨

# 論文題目 Theoretical Study on the Radial Profile of Pulsar Wind Nebulae

(パルサー星雲放射の空間構造に関する理論的研究)

氏名 石崎 渉

パルサーはその自転の回転エネルギーを相対論的な電子・陽電子プラズマの風に転換して放出している。この風は、パルサー風と呼ばれる。パルサー風は、周囲の星間物質や超新星残骸と相互作用することで、衝撃波構造を形成する。衝撃波でエントロピーを得たパルサー風の電子・陽電子は、シンクロトロン放射および逆コンプトン散乱によって、電波からガンマ線にわたる非常に広い周波数帯の光子を放出する。このようにして輝いている、パルサーの周囲に広がる天体をパルサー星雲という。

パルサー星雲の X 線放射は、パルサー星雲の中に存在する電子・陽電子の中でも最もエネルギーの高い粒子の集団が放っている。パルサー星雲の標準的な次元モデルを構築した Kennel & Coroniti らのモデル(以降 KC モデル)によれば、このような X 線を放出する粒子は、放射冷却によって急速にエネルギーを失ってしまうため、X 線の放射領域は中心のパルサーの近くに集中する。つまり、星雲の X 線の放射領域は、低周波数帯(電波や可視光)のものよりも小さくなることが想定される。このような放射領域の大きさの違いは、パルサー星雲のひとつであるかに星雲で実際に観測されている。このような観測事実に支えられて、KC モデルはパルサー星雲の標準的なモデルとして広く受け入れられてきた。

しかし、3C 58 や G21.5-0.9 といったパルサー星雲において、X 線の放射領域が電波の放射領域と同程度に広がっていることが明らかになった。これは KC モデルに欠陥があることを示唆するが、KC モデルの問題点が何であるのかを定量的に調査した研究はなく、モデルの何を改善すべきかが曖昧であった。KC モデルのような空間次元の定常モデルから計算できる主な観測量は、星雲全体を積分した放射スペクトルと、表面輝度(および光子指数)の半径方向分布である。本論文では、これら二つの観測量を同時に説明できるようなモデルを

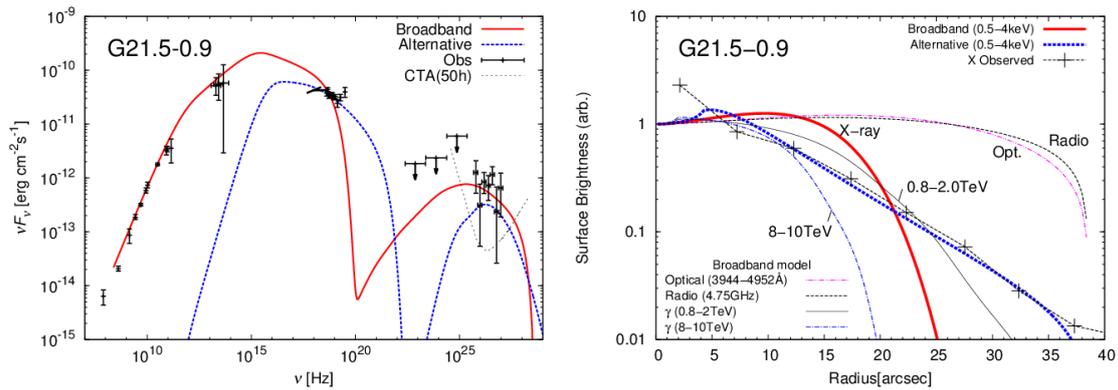


図1 KCモデルに基づいた1次元モデルによるG21.5-0.9の計算結果（左：星雲全体を積分した放射スペクトル、右：表面輝度分布）

星雲全体を積分したスペクトルを説明するモデル(赤線)では、表面輝度分布が観測されるほど広がらないことがわかる。

構築することを目的とし、研究を行った。

はじめに、我々はKCモデルをかき星雲、3C 58、G21.5-0.9の3つのパルサー星雲に適用することで、KCモデルの検証を行った。我々は、KCモデルのパラメータ依存性を詳細に調べた。その結果、3C 58とG21.5-0.9において、星雲全体を積分した放射スペクトルを再現するようなパラメータのもとでは、X線の放射領域が観測されたものよりも小さくなってしまったことがわかった(図1参照、G21.5-0.9の結果について掲載)。さらに我々は、星雲全体を積分したスペクトルの可視光・赤外線・電波の観測結果を再現しないが、X線の放射領域の広がりおよび星雲全体のスペクトルのX線およびガンマ線の観測結果を再現するようなパラメータがKCモデルの中にあることを示した。この場合、星雲内部の流れ場が非常に高速になってしまい、星雲の年齢に対応する移流時間(星雲内に注入された粒子が星雲の縁まで届くのにかかる時間)が、極端に短くなってしまったことがわかった。このように、我々の詳細な解析によって、確かにKCモデルはパルサー星雲の放射スペクトルと表面輝度分布を同時に再現できないということが明らかになった。KCモデルの問題点は、星雲全体の放射スペクトルを説明するために必要な磁場強度が、星雲のX線の広がりをも説明するような磁場強度よりも強いことが問題であることがわかった。磁場強度は星雲の放射スペクトルによって値が概ね決まってしまうため、星雲のX線の広がりをも説明するモデルを作るためには、粒子をより効率的に輸送できるようにモデルを改善するという方針を取らねばならない。

KCモデルの不完全性が明らかになったので、次に我々はKCモデルの改善を試みた。KCモデルの主な仮定は、定常状態・球対称・方位角方向のみに揃った磁場形状の3点である。まず我々は、パルサーの回転進化・周囲の超新星残骸の進化の効果を取り入れて、球対称・非定常な電磁流体力学の方程式を解くことで、KCモデルの定常の仮定がどれだけ正しいかを確かめた。さらに、放射冷却を含めて星雲内の非熱的粒子のエネルギースペクトルを計

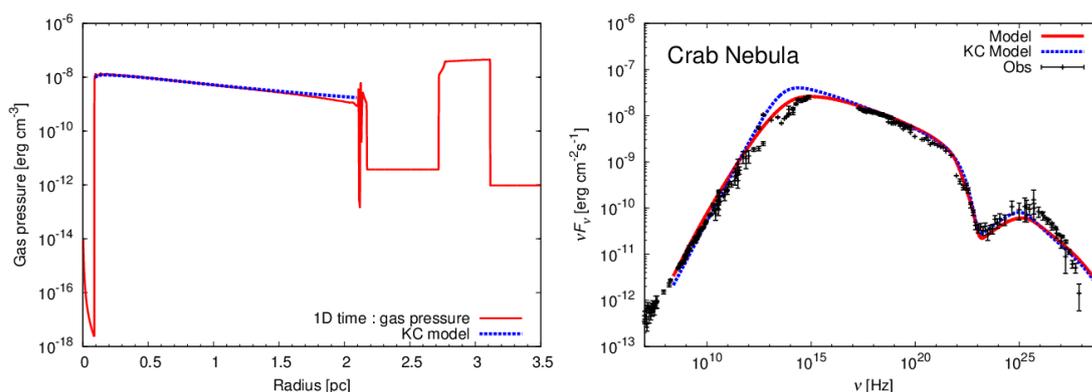


図 2 時間発展モデル(赤)と KC モデル(青)の比較。左は、星雲内部の圧力分布、右は、星雲全体を積分した放射スペクトル。このように両者は非常によく一致する。

算し、星雲からの放射を計算した。その結果、KC モデルの定常状態の仮定は、流体力学的な構造のみならず放射モデルとしても、非常に良い近似であることがわかった (図 2)。

そこで、次に我々は磁場形状に対する仮定を拡張することを考えた。パルサー星雲の内部には、乱れた状態になっている磁場が存在することがいくつかの研究で示唆されているため、我々はこのような磁場によって粒子が空間的に拡散する効果をモデルに取り込むことを考えた。過去に、このようなアイデアのもと、星雲の表面輝度分布を計算した研究がいくつかあったが、(1) 星雲全体を積分したスペクトルを計算していない、(2) X 線の拡がりを説明するために流体の移流の効果よりも拡散が効率的になるような拡散係数を用いている、という 2 点の問題があった。(1)については、我々が KC モデルの問題点を洗い出した際にわかったように、星雲全体のスペクトルを説明する磁場強度と X 線の拡がりを説明する磁場強度が異なることが問題であったので、この両方を計算していないことは本質的な不備であるといえる。(2)は、拡散による粒子の”流れ”が持ち出すエネルギーや運動量が、星雲の流れのエネルギー・運動量に対して無視できない程度であるとき、流体の構造に対して拡散の効果を考慮しなくてよいのか、という問題である。これらの視点を考慮して、我々は拡散過程およびその流体構造への反作用を考慮したパルサー星雲のモデルを定式化した。さらに、これを一次元定常の場合に実際に計算した。その結果、拡散過程の反作用が流体構造を変えらることを発見した。また、拡散の反作用を考慮した場合としていない場合で、星雲全体の放射スペクトルおよび表面輝度分布を計算した結果が異なることも示した。このモデルを、3C 58 および G21.5-0.9 に適用した結果、星雲全体の放射スペクトルと X 線の表面輝度分布を同時に再現することができた (図 3、G21.5-0.9 の結果について掲載)。

以上の研究から得られた我々の結論は以下の通りである。3C 58 および G21.5-0.9 において、X 線の拡がりが電波の拡がりと同程度であるということは、KC モデルに欠陥があることを示している。この観測事実は、粒子の拡散過程を考慮することでよく説明できるため、

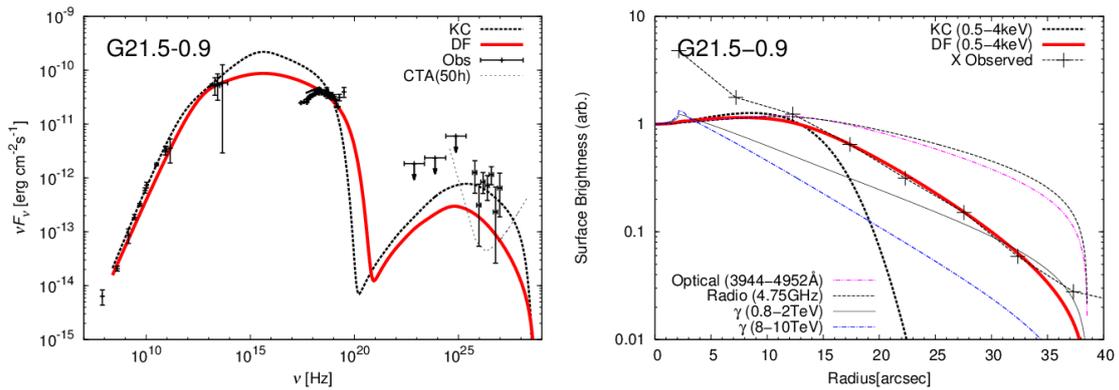


図3 拡散モデル(赤)とKCモデル(黒点線)の比較。左は、星雲全体を積分した放射スペクトル、右は、表面輝度分布。拡散モデルでは、星雲全体のスペクトルとX線の表面輝度を同時に再現できていることがわかる。なお拡散モデルの計算結果は、星雲の外に逃げた粒子からのガンマ線は計上していない。

拡散過程はパルサー星雲の空間構造モデルを考える際には必要不可欠な過程であるのだろう。一方で、パルサー星雲の時間発展の効果は、X線の広がり的问题においては本質的ではない。

ただし、時間発展の効果は、年老いたパルサー星雲の計算の際には重要になってくる。なぜならば、年老いたパルサー星雲においては、周囲の超新星残骸との力学的な相互作用が無視できなくなってくるためである。時間発展を考慮したモデルは、調べるべき課題が多くある。今後も様々なパラメータのもとで計算を行い、モデルの性質を調べていく必要がある。また、我々の拡散モデルにおいて得られた拡散係数の起源については、今回の研究では明らかにできなかった。これは星雲内の乱れた磁場の起源に関係することであるため、星雲内に乱流がある場合のモデル化などによって明らかになることであろう。乱流の効果をより正しく取り入れたモデルの構築は今後の課題である。さらに、我々の拡散モデルは、パルサー星雲の外部に逃げ出した粒子からのガンマ線放射を予言する。これは、今後のガンマ線観測によって検証されることが期待される。例えば、現在建設中の **Cherenkov Telescope Array** のような次世代のガンマ線望遠鏡による観測成果を用いて、星雲外への粒子の逃げ出しのメカニズムをより正確に解明していくことは重要な課題である。