

氏 名 川越至桜

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1122 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Improved Supernova Model and Neutrino Oscillation

論文審査委員 主 査 教授 富阪 幸治
教授 安藤 裕康
准教授 川村 静児
准教授 梅田 秀之（東京大学）
准教授 羽澄 昌史（高エネルギー
加速器研究機構）

論文内容の要旨

There are a lot of unresolved problems concerning to the mechanism of core-collapsed supernova explosions and supernova neutrinos. Though the explosions succeed in nature, the shock wave stalls and optical supernovae do not occur in most numerical supernova simulations. How the core-collapsed supernovae explode is one of the biggest mysteries in astrophysics. Since 99 % of the gravitational energy of the collapsed core is released as neutrinos, it is expected that the neutrinos are important keys to solve how supernova explosions succeed. The neutrino oscillation was discovered in various neutrino experiments, for example Super Kamiokande (SK) and Sudbury Neutrino Observatory (SNO). However, it is still very difficult to determine three neutrino oscillation parameters of the mass difference between 1-3 mass eigenstates, Δm_{13}^2 , the 1-3 mixing angle, θ_{13} , and the CP violating phase, δ . It is one of the most important research topics of particle physics, nuclear physics and astrophysics to determine these parameter values.

The purpose of this thesis is to constrain the neutrino oscillation parameters theoretically from the supernova neutrinos by studying the neutrino matter effect on the neutrino oscillation which is called the MSW (Mikheyev-Sminov-Wolfenstein) effect. We examine the influence of the shock wave on the neutrinos in the MSW effect, and the influence on the dependence of direction in 2-Dimensional model. The supernova neutrinos are generated in the supernova core and propagate through the envelope. It is pointed out that shock wave propagation has strong influences on the supernova neutrino oscillation through changing density profile.

We studied in this thesis how the influence of the shock wave appears in the neutrino spectrum using density profile of adiabatic explosion model of a core-collapse supernova which is calculated in an implicit Lagrangian code for general relativistic spherical hydrodynamics. We found that the influence of the shock wave appears from low-energy side and moves toward high-energy side according to the shock propagation. In addition, we found that this manner of the neutrino signal depends remarkably on the neutrino oscillation parameters.

We calculated the expected event rate of neutrino detection at Super-Kamiokande. The time evolution of the event rate was calculated for various θ_{13} values. The observed event rate of anti-electron type neutrino depends on the mixing angle θ_{13} in the case of the inverted mass hierarchy, while the event rate of electron type neutrino depends on θ_{13} in the case of the normal mass hierarchy. When $\sin^2 2\theta_{13}$ is larger than 1×10^{-3} , the influence of the shock wave appears after 3 seconds in the observation of neutrinos. Therefore, observing the time evolution of the event rate would constrain the mixing parameter θ_{13} , and eventually helps understanding the propagation of the shock wave inside the star if $\sin^2 2\theta_{13}$ is larger than 1×10^{-3} .

We studied how non-spherical symmetric supernovae (Type-Ic supernovae) affect the neutrino spectrum. In order to clarify the difference of the neutrino spectrum which depends on the direction, we calculated the neutrino spectra in two typical directions of the equator and the pole, and compared them with each other. Moreover, we predicted the event rates of the supernova neutrinos to be observed in the Super-Kamiokande by assuming a supernova at the center of Milky Way. We found that the survival probabilities and neutrino spectra are different from one another depending on the direction from the axis for asymmetric Type-Ic supernova explosion. The event rate of the polar direction decreases when the shock wave is propagating the H-resonance ($\sim 10^3$ g/cm³). If we obtain the inclination from axis of the supernova by optical observation, we can find the asymmetric diverse of core explosion from the neutrino observation, and the explosion mechanism in detail.

From these theoretical studies it is expected to obtain detailed information of supernova neutrinos in future supernova events. If information of the mass hierarchy and mixing angle are understood, we can examine by using the neutrino where the shock wave in the star is. In addition, if the non-spherical supernova explodes and the angle from the polar axis of the supernova will be determined from the optical observation, we can examine by using event rate how the asymmetry of the core explosion is. Moreover, it would provide many feed back on the construction of theoretical models of supernovae to tie up with clarification of explosion mechanism.

論文の審査結果の要旨

コア崩壊型超新星の爆発機構は20世紀から引き続く天体物理学の未解明問題の一つである。本研究は、超新星爆発時に放射されたニュートリノが超新星内の物質と相互作用することによりフレーバーが変化する現象、ニュートリノ振動を用いることによって、ニュートリノ振動のパラメータに制限を課し、ニュートリノ天文学の立場から超新星爆発現象を解明することをねらったものである。

ニュートリノ振動はフレーバーと質量の固有状態が異なることから生じるが、本論文では超新星爆発時の物質中でのニュートリノ振動を検討した。3つのニュートリノの質量の固有状態間の遷移が起りやすい2つの密度領域(H共鳴、L共鳴)が知られているが、そこを超新星爆発による衝撃波が伝搬している間はこの遷移が顕著に発生する。この共鳴密度はニュートリノのエネルギーに依存しているため、超新星外へ放出された時のニュートリノのスペクトルには超新星内部の構造が刻印されることになる。

出願者は、

1. 1次元球対称の断熱の超新星爆発モデルを数値流体力学的に計算し得られた密度分布に対してニュートリノ伝搬の方程式を積分することにより、地上の観測装置(スーパーカミオカンデ(SK)、Sudbury Neutrino Observatory(SNO))で期待されるニュートリノのエネルギーごと、爆発後時間ごとのイベントレイトを計算した。さらに
2. 強力な磁場の効果により磁場方向に偏って爆発する場合のIc型超新星について、共同研究者から得た密度分布進化を元に、ニュートリノ伝搬を積分することにより、強い衝撃波が早く伝搬する磁場方向とそうでない赤道方向のニュートリノ振動を比較し、特にこの異方に着目して同様の解析を行った。

その結果、

1. ニュートリノ振動パラメータの内、現在決められていない混合角 θ_{13} と自乗質量差 $\Delta m_{23}^2 \equiv m_3^2 - m_2^2$ の符号($\Delta m_{23}^2 > 0$:順質量階層、 $\Delta m_{23}^2 < 0$:逆質量階層)について、以下の事が分かった。(20MeVを境として)高エネルギーと低エネルギーの時間積分されたイベント数比 R が $\sin^2 2\theta_{13}$ のよい指標であること。すなわち逆質量階層の場合は、SKで測定される $\bar{\nu}_e$ (反電子ニュートリノ)の、順質量階層の場合は、SNOでの ν_e (電子ニュートリノ)の比の測定から $\sin^2 2\theta_{13}$ が決定できること。

2. 衝撃波の効果は、さらに高エネルギーと低エネルギーの時間変化率の比の時間変化 \hat{R} を測定することによって明らかにできること。例えば $\sin^2 2\theta_{13} = 10^{-3}$ の場合は、爆発後4~8秒の間続く \hat{R} の凹みとして衝撃波の存在が測定されること。
3. 非等方爆発の事実は、(a)磁場と垂直方向ではイベントレイトの時間的に単調な減少のみが観測されるが、(b)磁場方向には第2ピークが見られることで区別されることを見いだした。

出願者は、数値計算で得られた爆発モデルとそこでのニュートリノ伝搬を一貫して取り扱い、衝撃波の伝搬をモデル的に取り扱った先行研究の衝撃波効果の評価が過剰であることを明らかにし、現実的な測定可能性を提案した。

出願者の博士論文に示された以上の結果は、出願者の理論モデル化、数値計算、その解釈のために必要な広範かつ高度な背景知識等が備わっていることを示している。論文は超新星爆発メカニズムの研究にニュートリノ天文学が適用できることを示したもので、独自の視点を加えるものであると判定された。これにより審査委員会は、全員一致で本論文が博士論文として十分な価値を有し、合格であると判定した。