

| | | | |
|---------|---|---------|--------|
| 氏名・(本籍) | みなと 湊 | ふと 太 | し 志 |
| 学位の種類 | 博士(理学) | | |
| 学位記番号 | 理博第2481号 | | |
| 学位授与年月日 | 平成21年3月25日 | | |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第1項該当 | | |
| 研究科, 専攻 | 東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻 | | |
| 学位論文題目 | Fission and weak processes of neutron-rich nuclei at finite temperatures relevant to r-process nucleosynthesis (r-process 元素合成における中性子過剰核の核分裂と弱い相互作用プロセスに対する有限温度効果) | | |
| 論文審査委員 | (主査) 准教授 萩野 浩一 教授 小林 俊雄, 山口 昌弘 准教授 大槻 勤, 篠塚 勉 | | |

論文目次

| | |
|--|-----------|
| 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Background | 1 |
| 1.2 Nucleosynthesis | 2 |
| 1.2.1 From hydrogen to Iron | 2 |
| 1.2.2 Supernova Explosion | 3 |
| 1.2.3 p-process | 4 |
| 1.2.4 S-process | 4 |
| 1.2.5 R-process | 4 |
| 1.3 Problems in R-process and Motivation of this study | 6 |
| 2 Skyrme-Hartree-Fock method | 15 |
| 2.1 Skyrme Interaction | 15 |
| 2.2 Skyrme-Hartree-Fock equation | 17 |
| 2.2.1 Rearrangement Energy | 19 |
| 2.2.2 Spherical Nuclei | 20 |
| 2.2.3 Axially Deformed Nuclei | 21 |
| 2.3 Finite Temperature Skyrme-Hartree-Fock + BCS | 23 |
| 2.3.1 Review of previous applications of finite temperature Skyrme-HF+BCS method | 23 |
| 2.3.2 Formalism of finite temperature HF+BCS method | 24 |
| 2.4 Finite Temperature Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov | 30 |
| 2.4.1 Finite Temperature Independent Quasi-Particle | 31 |

| | |
|---|------------|
| 2.4.2 Reduction to HF+BCS | 33 |
| 2.4.3 How to Solve HFB equation | 33 |
| 2.4.4 Gap parameter | 34 |
| 2.5 Tensor Force | 34 |
| 2.6 Constraint Hartree-Fock | 35 |
| 2.7 Computational details | 37 |
| 3 Fission of Neutron-Rich Nuclei | 39 |
| 3.1 Fission Barrier in Neutron-Proton Isospin Plane | 40 |
| 3.1.1 Formalisms | 40 |
| 3.1.2 Results | 42 |
| 3.2 Fission of Neutron-Rich Nuclei at Finite Temperature | 48 |
| 4 Nuclear Collective Vibration | 59 |
| 4.1 Random Phase Approximation at Finite Temperature (FTRPA) | 60 |
| 4.2 Quasi-Particle RPA at Finite Temperature (FTQRPA) | 65 |
| 4.3 Temperature Dependence of Weak Processes | 68 |
| 4.4 Reduction from FTQRPA to FTRPA and QRPA | 71 |
| 5 β-decay rate and Neutrino-Nucleus Reactions | 73 |
| 5.1 Temperature dependence of IAR and GTR | 73 |
| 5.2 β -decay Half-Lives and Neutrino Cross Section | 74 |
| 5.3 Tensor Force Effect | 87 |
| 6 Summary | 89 |
| ACKNOWLEDGMENTS | 92 |
| Appendix | |
| A. Nuclear Statistical Equilibrium | 93 |
| B. Hartree-Fock | 95 |
| C. Numerov Method | 97 |
| D. Hamiltonian in quasi-particle representation | 98 |
| E. Langer's ImF method | 101 |
| F. Commutation relations | 105 |
| G. Finite Temperature Hartree-Fock-Bogoliubov | 107 |
| H. Energy Correction for odd-odd nucleus | 109 |
| I. τ operator | 111 |
| J. Bohr-Wheeler Formula | 112 |
| K. pnRPA at Finite Temperature | 114 |
| L. Continuum RPA | 117 |
| M. Strength function | 123 |
| N. Sum-rule | 125 |

論 文 内 容 要 旨

At the early stage of the universe, there were only hydrogens, heliums, and a little amount of light nuclei. There are, however, now as many as ninety kinds of elements in the nature. To trace the history of these elements in the universe is the study of nucleosynthesis. It has been considered that elements in the solar-system originates from mainly three contributions, that is to say r-process, s-process, and p-process.

However, we do not know exactly how much these three processes contribute individually to the solar system abundance because one always faces to the problem of model dependences. The model dependences arise from two origins. One of them is the site of nucleosynthesis. The actual sites of r-and s-process are still an open question. Another model ambiguity comes from nuclear physics. Since neutron-rich nuclei relevant to the r-process are difficult to investigate experimentally at present, most of nuclear physics inputs have been evaluated from theoretical works. The droplet, macroscopic, or semi-classical models have been used to describe neutron-rich nuclei so far. However, these models do not sufficiently take into account the shell effects and pairing. Actually, it has been reported that r-process calculation with microscopic-HFB mass formulae which include the shell effect and pairing correctly reproduces solar-system abundance better than the former results. This is clearly due to the improvement of the shell effects and pairing in neutron-rich nuclei. However, there are still underestimates the abundance in r-process simulations compared to that in the solar-system. One of the possible reasons is that they have used a macroscopic β -decay model and not taken into account fission properly. These two points are considered to be the keys for the further improvements of r-process simulations.

The aim of this thesis is to discuss the β -decay and fission, which play an important role in r-process. In order to take into account the shell effect and pairing, we adopt the Skyrme-Hartree-Fock-Bogoliubov for fission and the Skyrme-Hartree-Fock+BCS and QRPA for the β -decay. Particularly, we pay attention to the thermal effects in this thesis. Nuclei in r-process is known to be at finite temperature by the interaction with electrons or photons at r-process sites. In such environment, nuclei are excited to higher states. The thermal effects on the β -decay of neutron-rich nuclei have not been discussed sufficiently well.

We have calculated the β -decay rates of neutron-rich isotones with magic number $N=82$. We found that as the temperature increases, the β -decay rates of all the nuclei decrease. However we did not see any significant influences on the β -decay rates at standard r-process temperature, $T < 0.2$ MeV. We have calculated the systematical half-lives for neutron magic number $N=82$ isotones and compared with the results of FRDM+QRPA and ETFSI+QRPA. Our results for the β -decay half-lives are shorter than the other models for large atomic number and are longer for small mass number.

Another problem we discuss in this thesis is the fission from the excited states. When heavy neutron-rich nuclei are produced at r-process sites, the temperature is less than about $0.5 T_{\odot}$ K (~ 0.5 MeV). Such temperatures is too low to give a significant influence on nuclei. However, nuclei can be at a non-zero temperature due to neutron capture, neutron emission, and β -decay before the de-excitation. It is known that the pairing phase transition occurs in a nucleus at highly excited states (hot nucleus). Since the pairing correlation gives important influences on nuclear deformations, fission barrier heights also depend on the temperature. The study of hot nuclei fission has been done so far by macroscopic-microscopic and microscopic approaches. However the former approach uses the phenomenological fission barrier height depending on temperature while the latter approach adopts simplified constant pairing forces. Thus, in this thesis, we discuss the fission barrier

height of neutron-rich nuclei microscopically taking into account pairing correlations with a more realistic pairing interaction.

We have calculated ^{236}U and ^{258}Fm which are on the β -stability line, and ^{266}U and ^{286}Fm which are neutron-rich nuclei relevant to the r-process. As the temperature increases, the energy curves which determine the fission path become smooth and the barrier heights lower due to the disappearance of the shell effect. However we do not confirm significant influences on the barrier heights of the temperatures produced by neutron capture, neutron emission, or β -decay. We have also found the effect of pairing phase transition on the barrier height is small.

論文審査の結果の要旨

現在地球上に存在する 90 種類の元素は、ビッグバンで始まったとされる宇宙空間で合成された。鉄までの元素は星の中の核融合反応で合成されたが、鉄より重い元素は別のプロセスで合成されたと考えられている。そのうちの一つの有力なプロセスの一つとして、 r -プロセスがあげられる。これは、原子核が急速に中性子を吸収し、中性子過剰領域を通りながら質量数を増し、そののちにベータ崩壊を起こして重い元素を作るプロセスである。ウランやトリウムなどの元素はこのプロセスで合成されたことがほぼ確実視されている。しかしながら、 r -プロセス元素合成は、地球上に存在しない中性子過剰核が関与するため、シミュレーションに対するインプットの不定性も大きく、完全に理解されてはいない。 r -プロセス元素合成の研究では、原子核物理学が重要な役割を果たしているが、原子核物理学に起因するインプットの不定性として原子核の質量、中性子吸収断面積、 β 崩壊率、核分裂、などがあげられる。

本研究では、原子核物理からの不定性のうち、 β 崩壊率及び核分裂に対する有限温度効果の評価を行った。ここでいう有限温度効果には二つの側面がある。一つは、 r -プロセスが有限温度の環境下で起こること、もう一つは、 β 崩壊の後に核分裂が起こる場合 (β 遅延核分裂)、励起状態からの核分裂を考える必要があることである。後者は、しばしば有限温度のもとでの核分裂という描像で記述される。これらの有限温度の効果を見積もることは、 r -プロセス元素合成計算に対する原子核物理学からのインプットを小さくする上で重要なことである。また、中性子過剰核では束縛が弱くなるために殻効果、対相関、連続状態の効果が特に重要となり、より微視的な記述が必要となる。このため、本研究では核子の自由度をあらわに取り扱った平均場近似や乱雑位相近似を用いて有限温度の効果の評価した。

本研究によって、(1) $N=82$ アイソトーンでは、 r -プロセス環境温度 ($T < 0.2$ MeV) において β 崩壊及びニュートリノ・原子核反応に対する温度効果は無視できること、(2) これは殻補正法で得られた結果に比べて温度依存性は有意に小さく、従って中性子過剰核の β 崩壊を記述する際には微視的な記述が重要となること、(3) 中性子過剰核の核分裂を平均場近似で記述する際、通常用いられているように全四重極能率で拘束条件をつけても陽子や中性子のみを拘束しても結果はほとんど変わらないこと、(4) 対相関に関する相転移のために、安定原子核の核分裂障壁は有限温度では 0.5 MeV 程高くなる可能性があること、(5) 中性子過剰核では有限温度の効果が強くあらわれ、 r -プロセス環境下では ^{266}U や ^{286}Fm の核分裂障壁が 0.5 から 1 MeV 程度低くなる可能性があること、が示された。本研究では対称核分裂のみを取り扱っており、実際の r -プロセスの計算を行うためには非対称核分裂を取り入れる必要があるものの、これらの研究成果は r -プロセス元素合成計算に対する原子核物理からのインプットの不定性の一つである有限温度効果に対する知見を与えるものであり、今後この分野の研究に大きく寄与するものである。

審査論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。従って、湊太志 提出の博士論文は、博士 (理学) の学位論文として合格と認める。