

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540385

研究課題名（和文） ビッグバン元素合成におけるスタウ原子衝突による触媒核融合反応

研究課題名（英文） Catalyzed nuclear reactions by stau atomic collisions in big-bang nucleosynthesis

研究代表者

木野 康志 (KINO YASUSHI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：00272005

研究成果の概要（和文）：

超対称性粒子スタウは鉄原子より重く、寿命は1,000秒以上あると考えられている。原子分子の視点からは、スタウは重い電子として振舞い、スタウ原子分子を形成する。我々は、初めて、スタウ原子衝突中に起る原子核反応を量子力学的に完全に計算し、スタウ原子衝突によりビッグバン元素合成において最も深刻な問題であった「Li問題」を解決できる事を示した。我々はまた他のスタウ原子衝突によって引き起こされる原子核反応を調査し、未発見の粒子スタウの諸性質を予言した。

研究成果の概要（英文）：

A supersymmetric particle stau is heavier than an iron atom, and its lifetime is considered to be more than 1,000 s. From a viewpoint of atomic physics, negatively charged stau behaves like a heavy electron and forms stau atomic and molecular systems. We, for the first time, calculate the nuclear reactions during the stau atomic collision in a full quantum manner. The results show that the nuclear reactions induced by the stau atomic collision can solve the lithium-6 and lithium-7 problems which are most crucial problem in the big-bang nucleosynthesis. We also investigated other nuclear reactions induced by the stau atomic collisions and predicted properties of undiscovered particle stau.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：原子衝突、エキゾチック原子分子、ビッグバン元素合成

1. 研究開始当初の背景

超対称性理論によれば、スタウはタウ粒子の超対称性パートナーであり、電荷は+1, -1で、1,000秒以上の長寿命でタウ粒子とグラビティーノに崩壊し、100GeV以上（陽子の

100倍以上）の質量を持つ事が予想されている。2008年秋に稼働予定の欧州合同原子核研究機構(CERN)の大型ハドロン型加速器(LHC)においてその発見が期待されている。原子・分子の視点からは、負電荷のスタウは、反陽

子やミュオンのように重い電子とみなす事が出来る。スタウは原子核とクーロン相互作用で結合してエキゾチック原子分子を形成すると考えられ、その場合スタウ原子の軌道半径は数 fm 程度の大きさとなるためスタウ原子衝突の際、原子核同士が接触し原子核反応が起ることも可能である。

ビッグバン直後は十分高温であるためスタウも存在でき、また寿命が長いと元素合成時にも存在したと考えられる。ビッグバン元素合成時にスタウ原子が形成され、スタウ原子衝突がおこれば、スタウが原子核反応を触媒し、従来の元素合成のシナリオに影響を与える可能性がある。

特に、ビッグバン元素合成では、Li 同位体の生成量がビッグバン宇宙論に基づく計算と観測値で大きな食い違いがあり、問題となっていた。

2. 研究の目的

スタウは超対称性理論においてその存在が予言されているタウ粒子の超対称性パートナーであり、2009 年秋に再開された欧州合同原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン型加速器 (LHC) においてその発見が期待されている粒子の一つである。1,000 秒以上の長寿命と $100\text{GeV}/c^2$ 以上 (陽子の 100 倍以上) の質量を持つ事が予想されている。原子・分子の視点からは、負電荷のスタウ (以降 X と略す) はクーロン相互作用により原子核と結合してエキゾチック原子分子を形成する。即ち、スタウは反陽子やミュオンのように重い電子とみなす事が出来る。スタウは原子核とスタウ分子の大きさは数 fm 程度の大きさとなるため、スタウ分子内で容易に原子核反応が起り、これをスタウ触媒原子核反応とよぶ。スタウはビッグバン直後の高温状態で生成され、ビッグバンの数分間後に起った元素合成時まで存在したと考えられる。ビッグバン元素合成 (BBN) においてスタウ触媒原子核反応が起り、従来の BBN 理論は大きく修正される可能性がある。一方、CERN では、現在衝突エネルギーが当初の予定の約半分であり、ヒッグス粒子発見は困難であるため、当面の研究対象が超対称性粒子発見に絞られている。スタウ触媒原子核反応を考慮に入れた BBN シナリオと観測値から超対称性粒子の種々のパラメータを CERN の実験に先駆け予言する事は重要である。

3. 研究の方法

理論計算は、申請者らが量子力学的少数多体系の精密計算のために開発した「ガウス関数展開法 (GEM)、レビュー: E. Hiyama, Y. Kino, M. Kamimura, Prog. Part. Nucl. Phys, **51**, 223 (2003)」を用いる。この方法は、反陽子、ミュオン、陽電子等を含む様々なエキゾチック原子分子の束縛状態、共鳴状態、散

乱状態の精密計算に適応され、これまで大きな成果を得てきた。この計算方法は構成粒子に依存する近似を用いていないため汎用性が高く本研究課題に最適である。

スタウ原子衝突の場合、クーロン相互作用の他に核間の相互作用を考慮する必要があり、原子核反応断面積や原子核のエネルギー準位から核間の有効相互作用を計算した。量子力学的散乱問題は、入射チャンネル、反応チャンネルの開チャンネルの他に散乱の中間状態を表現する閉チャンネルを導入した。この閉チャンネルは L2 型の基底関数で全ハミルトニアンを対角化した際に得られる擬状態の和で表現した。この事によりチャンネル間の波動関数の重なりが抑制され、効率的にかつ精密に計算できた。

4. 研究成果

① α 粒子とスタウが結合したスタウヘリウム原子と重陽子原子核の衝突により、リチウム-6 原子核が生成できる事を定量的に示した。リチウム-6 の生成量は BBN に基づく理論と観測値で 3 桁も異なっていたが、スタウ原子衝突により観測値を説明できる事を示した。また、反応を初期宇宙の観測涼との比較により、スタウ粒子の寿命とスタウヘリウム原子の BBN 当時の生成量に制限を与えた。

② スタウと陽子が結合してスタウ水素原子とベリリウム-7 原子核との衝突で、スタウベリリウム-8 の励起状態がフェッシュバック型共鳴状態として生成する事を示し、この共鳴状態を経てベリリウム-7 の量を減少させる事ができ、BBN 理論値と観測値の間の 3 倍あったもう一つの「Li 問題」を解決した。

③ ビッグバンから数百時間後に X と陽子によって生成される p X が次々に原子核反応を引き起こし、BBN のシナリオが大きく書き換えられる可能性がある事が簡単な近似計算により 2008 年夏に指摘された。我々は、精密な理論計算を行い、この効果は非常に小さい事を定量的に示した。

④ スタウと重陽子 2 つからなる 3 体系においてスタウ触媒核融合の反応率や反応後に核融合生成物である α 粒子がスタウに捕まる確率を計算し、重水素内でこのスタウ触媒核融合反応が進行しエネルギーを取り出せるか計算した。反応後に α 粒子を捕まえる確率が高く、ミュオン触媒核融合ほどは反応は進行しないことが分かった。

⑤ また、X と水素、ヘリウム同位体がつくる様々なエキゾチック原子・分子のエネルギーや分子構造を計算し、同位体効果や分子の安定性を明らかにした。また、本研究で用いた手法を反陽子、ミュオン、陽電子などを含む他のエキゾチック原子・分子の系にも応用し、ミュオニックヘリウムの超微細構造、陽電子原子の弱結合状態の構造を明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Low Temperature Formation of Positronium in Nonpolymer Organic Systems, V.P. Shantarovich, R.S. Yu, Y. Kino, Y. Hama, and V.W. Gustov, High Energy Chemistry, **45**, 342-348 (2011). (査読有)
- ② 超対称性粒子スタウが触媒する新規なビッグバン元素合成, 上村正康、木野康志、肥山詠美子、原子核研究 **54**, 3-15, (2010). (査読有)
- ③ Stau-catalyzed big-bang nucleosynthesis reactions, Masayasu Kamimura, Yasushi Kino, Emiko Hiyama, AIP Conference Proceedings, **1238**, 139-144 (2010). (査読有)
- ④ Stau-catalyzed Big-bang Nucleosynthesis and Nuclear Cluster Model, M. Kamimura, Y. Kino, H. Hiyama, International Journal of Modern Physics **24**, 2076-2083, (2009). (査読有)
- ⑤ Nuclear Reactions Induced by Stau Atomic Collisions in Big-bang Nucleosynthesis, Y. Kino, M. Kamimura, H. Hiyama, Journal of Physics Conference Series **194**, 072019-072019, (2009). (査読有)
- ⑥ Big-Bang Nucleosynthesis Reactions Catalyzed by a Long-Lived Negatively-Charged Leptonic Particle, M. Kamimura, Y. Kino, H. Hiyama, Progress of Theoretical Physics **121**, 1059-1098 (2009). (査読有)
- ⑦ Stau-Catalyzed Big-Bang Nucleosynthesis Studied with MCF-Calculational Method, M. Kamimura, Y. Kino, Proceedings of international conference on muon catalyzed fusion and related topics, 307-314, (2008). (査読有)
- ⑧ A Coupled Channel Study on a Binding Mechanism of Positronic Alkali Atoms, Y. Kubota, Y. Kino, New Journal of Physics **10**, 023038 (10pp) (2008). (査読有)

[学会発表] (計 17 件)

- ① 木野康志、反陽子ヘリウムと三体精密計算 日本物理学会第 67 回年次大会、関西大学、西宮市、2012 年 3 月 24 日～27 日.
- ② 木野康志、スタウ原子衝突におけるフェッシュバック共鳴状態、シンポジウム「第一原理計算科学の最前線」、東北大学、仙台市、2011 年 9 月 30 日.
- ③ 木野康志、上村正康、肥山詠美子、スタウ分子内核融合反応の計算、原子衝突研究協会

第 36 回年会、新潟大学、新潟市、2011 年 8 月 17 日～19 日.

④ 二瓶英和、木野康志、関根勉、陽電子寿命運動量相関法による二酸化炭素中でのポジトロニウム-分子反応の研究、原子衝突研究協会第 36 回年会、新潟大学、新潟市、2011 年 8 月 17 日～19 日.

⑤ 入澤歩、木野康志、関根勉、ミュオニックヘリウム原子の三体計算、原子衝突研究協会第 36 回年会、新潟大学、新潟市、2011 年 8 月 17 日～19 日.

⑥ 佐野陽祐、木野康志、関根勉、陽電子寿命測定によるガス中での陽電子減速過程の研究、原子衝突研究協会第 36 回年会、新潟大学、新潟市、2011 年 8 月 17 日～19 日.

⑦ 木野康志、上村正康、肥山詠美子、超対称性粒子スタウを含むエキゾチック原子分子の計算、日本物理学会第 66 回年次大会、新潟大学、新潟市、2011 年 3 月 25 日～28 日.

⑧ Y. Kino, M. Kamimura, E. Hiyama, Nuclear reactions induced by a heavy leptonic particle in the big-bang nucleosynthesis, International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces, Sendai, Japan, September 4-7, 2010.

⑨ 木野康志、上村正康、肥山詠美子、超対称性粒子スタウを含むエキゾチック原子分子、原子衝突研究協会第 35 回年会、2010 年 8 月 9 日～11 日、奈良女子大学、奈良市

⑩ 木野康志、上村正康、肥山詠美子、エキゾチック原子・分子のエネルギーと分子構造の計算、少数粒子系物理の現状と今後の展望研究会、福岡国際会議場、福岡市、2010 年 8 月 19 日～21 日.

⑪ Y. Kino, M. Kamimura, E. Hiyama, Stau atomic collision and catalyzed big-bang nucleosynthesis, Advanced Science Research Symposium 2009, Tokai Japan, November 10-12, 2009.

⑫ 木野康志、陽電子アルカリ金属原子の構造と結合機構、京都大学原子炉実験所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」、京都大学原子炉実験所(大阪府)、2009 年 11 月 20 日～21 日.

⑬ 木野康志、上村正康、肥山詠美子、ビッグバン元素合成におけるスタウ触媒核融合反応 III、原子衝突研究協会第 34 回年会、首都大学東京国際交流会館、八王子市、2009 年 8 月 28 日～30 日.

⑭ 木野康志、上村正康、肥山詠美子、ビッグバン元素合成におけるスタウ触媒核融合反応 II、原子衝突研究協会第 33 回研究会、北海道大学低温科学研究所、札幌市、2008 年 8 月 5 日～7 日.

⑮Y. Kino, M. Kamimura, E. Hiyama, Nuclear reactions induced by stau atomic collisions in big-bang nucleosynthesis, 15th International Workshop on Low Energy Positron and Positronium Physics, Tronto, Canada, July 29-August 1, 2009.

⑯Y. Kino, M. Kamimura, E. Hiyama, Nuclear reactions induced by stau atomic collisions in big-bang nucleosynthesis, 26th International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Kalamazoo, Michigan, U.S.A., July 22-28, 2009.

⑰Y. Kino, M. Kamimura, E. Hiyama, Stau atomic collision and big-bang nucleosynthesis, Y. Kino, M. Kamimura, E. Hiyama, The 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, The University of Western Australia, Perth, Australia, November 23-28 2008.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木野 康志 (KINO YASUSHI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号 : 00272005

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :