

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400416

研究課題名(和文) 重い負電荷粒子スタウを含む新奇な原子・分子系の開拓

研究課題名(英文) Pioneering study on novel atomic and molecular systems with negatively charged massive particles

研究代表者

木野 康志 (Kino, Yasushi)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00272005

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：陽子よりも遥かに重い質量をもつ負電荷粒子(未知粒子であるため、以降X粒子とする)が超対称性理論により予言されている。このX粒子が電子と置きかわり、エキゾチック原子・分子を形成すると、通常の原子・分子にはない特異な性質を示すことが予想される。X粒子はビッグバン直後に生成したと考えられ、X粒子原子衝突にともなう原子核反応が、直後に起こるビッグバン元素合成反応に関与した可能性が議論されている。特に、リチウム同位体の存在度が観測値と理論値で大きく異なるリチウム問題の解決策となることが期待されている。本研究では、X粒子原子衝突を量子力学的散乱問題として厳密に計算し、X粒子の性質を検討した。

研究成果の概要(英文)：A negatively charged particle (X-particle) having a much heavier mass than a proton has been predicted by supersymmetry theory. Exotic atom and molecule can be formed, when one of electrons in an atom is replaced by the X-particle. The system is expected to exhibit unique properties which can not be found in typical atoms and molecules. X particles is considered to have generated just after the Big Bang, and nuclear reactions via X particle atomic collisions. In particular, it is expected to solve the lithium problem where calculated abundances of lithium isotopes are in disagreement with observed value. In this study, we performed precise calculations on exact quantum mechanical scattering problem for the X particle atomic collision, and discussed the properties of the X-particle.

研究分野：原子・分子理論

キーワード：エキゾチック原子・分子 少数多体系 原子衝突 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 (SUSY) のなかのあるモデルによると、もし最も軽い超対称性粒子がグラビティーノ(グラビトンの SUGY パートナー、ダークマターの候補)であれば、次に軽い超対称性粒子はスタウ(stau, scalar tau, スピンゼロの素粒子)である。スタウはタウ粒子の SUGY パートナーであり、電荷は-1 で電弱相互作用し、1000 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。グラビティーノはダークマターの有力な候補とされ、素粒子論、宇宙論研究において重要な位置を占めるが、直接生成する事が困難であるため、一旦スタウを生成しその崩壊により得る事が期待されている。スタウの発見は、LHC(Large Hadron Collider)の重要な課題の一つであり、現在これに関する研究が盛んに行われている。

原子、分子の視点からは、負電荷のスタウ(以降適宜 X 粒子 X と略す)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。電子のように原子核とクーロン相互作用で結合して原子・分子を形成するが、X 粒子を含む原子分子系は様々な電荷や質量をもつ原子核が重い電子(X 粒子)のまわりを回る、原子核と電子の立場が完全に逆転した「超エキゾチック原子分子」と言える。また、X 粒子自身は点電荷であるが、X 粒子原子の軌道半径は fm 程度の大きさとなるため原子核の荷電分布も考慮する必要があり、X 粒子分子内では核間の核力も取り入れる必要がある。このため、原子核反応をプローブとしてこのエキゾチック原子分子の構造や反応を調べる事ができる。

X 粒子原子衝突中または X 粒子分子内で原子核反応が起れば、X 粒子は束縛から外れ自由になりその寿命中に再び X 粒子原子分子を形成し、次々と原子核反応を引き起こす事ができる。この一連の反応はミュオン触媒核融合との類似性から「X 粒子触媒核融合」と呼ばれる。

現在のビッグバン宇宙論では、ビッグバン直後(最初の 3 分間)に起こる原子核反応により生成した軽い原子核の存在度が、原子核反応論に基づく計算と観測結果が見事に一致し、ビッグバン宇宙論の有力な証拠とされてきた。ところが、観測技術が進歩し、鉄を含まない古い星のリチウム同位体の存在度が理論計算値と大きく異なる問題が指摘され、ビッグバンモデルの根幹を揺るがす問題(リチウム問題)となっている。リチウム同位体のうち  ${}^6\text{Li}$  は計算値が観測量の 1000 分の 1 しかかなく、 ${}^7\text{Li}$  は観測量より 3 倍大きくなっている。

X 粒子はビッグバン直後に生成され、その後 3 分間の元素合成(BBN)期まで十分存在できるため、BBN で生成された軽い核が負電荷 X 粒子に捕まり、例えば、 ${}^4\text{HeX}$  などの超エキゾチック原子を作る。 ${}^4\text{HeX}$  に重陽子(d)が衝

突すると  ${}^4\text{He}$  をピックアップして  ${}^6\text{Li}$  を形成し飛び去る( ${}^4\text{HeX} + d \rightarrow {}^6\text{Li} + X$ , X 粒子触媒核融合)。ここで問題となる X 粒子原子と原子核の衝突( ${}^4\text{HeX} + d$ )は、X 粒子原子の束縛エネルギーが 400 keV であるのに対し、衝突エネルギー(BBN 時の温度:  $T=10^9$  K)が 10 keV 程度であるため、実質は低エネルギーの原子衝突である。原子核反応はクーロン 3 体衝突中のトンネル過程である。このため反応断面積等の正確な計算のためには、原子衝突理論に基づく量子力学的少数多体系の厳密な取扱が必要である。著者は、これまでに素粒子物理学、原子核物理学、天体物理学の研究者と協力して、原子衝突理論の有効性を示してきた[1-4]。

[1] Stau-catalyzed  ${}^6\text{Li}$  production in big-bang nucleosynthesis, K Hamaguchi, T Hatsuda, M Kamimura, Y Kino, TT Yanagida, Physics Letters B 650 (4), 268-274

[2] Nuclear reactions induced by stau atomic collisions in big-bang nucleosynthesis Y Kino, M Kamimura, E Hiyama, Journal of Physics: Conference Series 194 (7), 072019

[3] Stau-catalyzed big-bang nucleosynthesis and nuclear cluster model, M Kamimura, Y Kino, E Hiyama, International Journal of Modern Physics A 24 (11), 2076-2083

[4] Big Bang Nucleosynthesis Reactions Catalyzed by a Long Lived Negatively Charged Leptonic Particle, M Kamimura, Y Kino, E Hiyama, Progress of Theoretical Physics 121 (5), 1059-1098

## 2. 研究の目的

X 粒子に働く相互作用は、遅いグラビティーノへの崩壊以外はクーロン相互作用のみである。従って、X 粒子は原子・分子の視点では、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。X 粒子を含む原子・分子系は、様々な電荷や質量をもつ原子核が重い電子(X 粒子)のまわりを回る、原子核と電子の立場が完全に逆転した原子分子系である。また、X 粒子はボーズ粒子であるため、多 X 粒子系では電子と異なる統計となる。更に興味深いことには、X 粒子自身は点電荷であるが、X 粒子原子の軌道半径は数十から数 fm 程度の大きさとなるため、X 粒子分子内では原子核同士が有限の確率で接触し原子核反応が起る。このため、原子核反応により、このエキゾチック原子分子の構造や反応を調べる事ができる。また、X 粒子と原子核系の換算質量はほぼ原子核の質量に等しいため、X 粒子原子のエネルギーは原子核の質量に比例し、サイズは質量に反比例し大きな同位体効果が見られる。以上のように、X 粒子を含む原子分子系はこれまでの常識を遥かに超える「超エキゾチック原子分子」であるといえる。原子・分子物理学や物理化学の分野の目的の一つは、突き詰めればクーロン多体系の作り出す多様性の発見である。X 粒子

原子・分子は、これまで発現しなかった側面をもち、X粒子原子・分子の研究によりクーロン多体系の理解がより深まる事が期待される。また、様々な研究分野でプローブとして用いられている陽電子は、電子の反粒子で正電荷を持つため、軽い原子核と見ることができる。重い負電荷粒子の形成するエキゾチック原子分子の研究と関連が深く、陽電子原子の研究は相補的な役割を果たす。また、陽電子原子の理論計算は、実験との比較が可能となりつつあり、現在のところ実験的検証が不可能なX粒子のような粒子の代わりとなる。

### 3. 研究の方法

理論計算は、申請者らが独自に開発した「ガウス関数展開法(GEM)[5]」を用いる。この方法では、系を構成する粒子の質量に依存する近似を用いず、運動学的に正しい境界条件を与えるヤコビ座標系を複数組導入する。このため、波動関数は基底関数の個数に対して収束性がよく、量子少数多体系を精密に計算できる。X粒子原子分子の束縛状態の波動関数、エネルギー準位を精密に計算し、X粒子原子分子がどのような形で観測に掛かるかを予言するとともに、原子分子系との違いや特異性を明らかにする。従来用いられてきた原子分子の構造や反応を記述する理論が、重いスピンゼロの負電荷粒子に対してどのようになるか調べる。

この方法 GEM 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用され、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。 $(n+1)$  粒子系の場合、系の物理的特徴を記述するのに適した  $m$  組のヤコビ座標系を導入し、全系の波動関数をヤコビ座標で記述されるチャンネル波動関数の和で表す。粒子間の相対座標を陽に含むことにより粒子間相関が正確に取込まれ、ヤコビ座標により正しい散乱の境界条件を課す事ができる。各部分波動関数は、 $L^2$  積分可能な有限個のガウス型基底関数で展開し、全角運動量  $J$  を構成するように各座標の部分波を選択する。ここで、各座標に対して部分波を無限個用意すれば、一組のヤコビ座標系のみで十分であるが、現実的には不可能であり、一般的に収束も遅い。部分波の数を制限する代わりに必要なヤコビ座標の組合せを用意し、これらの座標系で表現される部分波動関数の和で全波動関数を表現する。我々のこれまでの研究から、これにより少ない部分波で、波動関数およびエネルギー固有値を、高精度に再現する事が示されている。束縛状態の場合は、この基底関数系でハミルトニアン行列およびノルム行列を対角化（一般化固有値問題）し、

レイリー・リッツの変分法によりエネルギー固有値と波動関数を得る。ここで、 $\nu$  は振動量子数で、エネルギー固有値の低い方から  $\nu$  番目の固有値を表す。ガウスレンジパラメータは等比数列により与える。ハミルトニアン行列やノルム行列要素の計算でチャンネル間の座標の組替えが生じるが、ガウス関数を用いる事により全ての行列要素が解析的に取扱う事ができ、高精度の計算が可能である。[5] Gaussian expansion method for few-body systems, E Hiyama, Y Kino, M Kamimura, Progress in Particle and Nuclear Physics 51 (1), 223-307

### 4. 研究成果

ビッグバン宇宙論に基づく元素合成が直面するリチウム問題について、天体原子核反応の専門家 (Motohiko Kusakabe, KS Kim, Myung-Ki Cheoun, Toshitaka Kajino, Grant J. Mathews) と協力して、ビッグバン直後に生成したと考えられる重い質量をもつ負電荷粒子が生成するエキゾチック原子・分子反応にともなう原子核反応を精査し、リチウムの  ${}^7\text{Be}$  原子核が電子を一つ持つ  ${}^7\text{Be}^{3+}$  イオンが X 粒子の置換反応により生成した X 粒子  ${}^7\text{Be}$  原子が陽子との衝突の過程で  ${}^8\text{BX}$  粒子原子の励起状態を形成する。この状態は Feshbach 型の共鳴状態であり、共鳴エネルギーと幅は、X 粒子質量に依存する。同様に X 粒子原子衝突にともなう原子核反応の断面積も X 粒子の質量に依存する。さらに、X 粒子の寿命やビッグバンでの生成量などにより、ビッグバン直後の原子核反応が変化し、同位体存在量に影響を受ける。 ${}^7\text{Be}^{3+}$  イオンの存在度、ガンマ線により対生成した陽電子による電子との対消滅反応、クーロン散乱など様々な効果を評価し、X 粒子原子衝突を含むビッグバン元素合成の計算をおこなった。図 1 に、X 粒子原子衝突の計算で得られた原子核反応率をもとに、ビッグバン元素合成をシミュレートした結果の一例を示す。ここでは、X 粒子は未知粒子であるため、その質量、寿命、ビッグバン直後の生成量などの値を変化させ、計算をおこなった。図 1 の例は、X 粒子の質量を 1 TeV とした場合である。図 1 上では、各同位体存在度の陽子に対する比のビッグバンからの時間変化を温度変化によって示す。温度は、 $10^9$  K を 1 とする単位で、いわゆる最初の 3 分間では、 $10^9$  K の温度があり、原子核反応が最も進行した図 1 下は、リチウム同位体存在度の計算値と観測値の比を X 粒子の寿命と、ビッグバンでの生成量のバリオン生成量との比についての等高線を示す。リチウム同位体存在度の観測量を再現する範囲で、未知粒子である X 粒子の寿命等の物理的性質を予言することができた。この結果は、超対称性理論に対して制限を与えることになり、重要な意味がある。

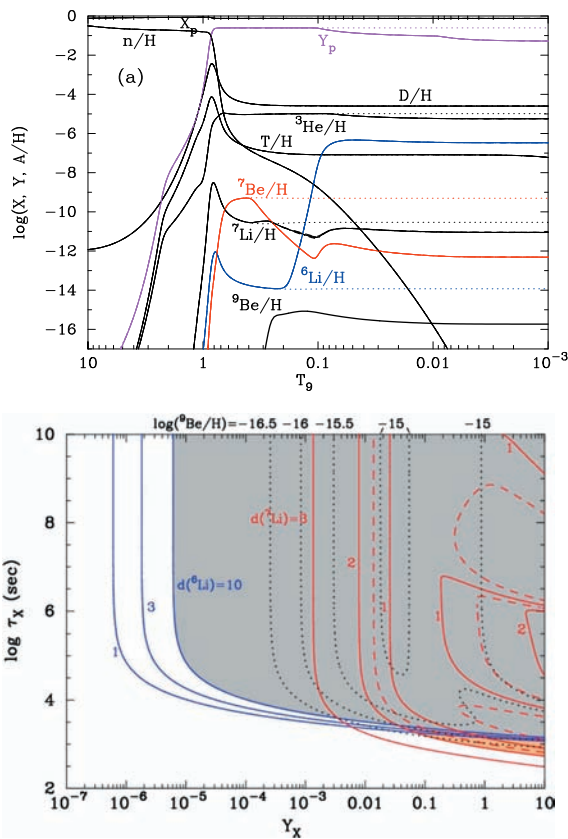


図1 X粒子原子衝突の計算で得られた原子核反応率をもとに、ビッグバン元素合成をシミュレートした結果の例。X粒子の質量を1 TeV/c<sup>2</sup>として計算。上の図は、ビッグバン直後に合成された各同位体の陽子に対する存在度の温度(10<sup>9</sup> Kを1とする)依存性の計算値。X粒子とバリオンの存在量の比  $Y_x = n_x/n_B = 0.05$ , X粒子寿命  $\tau_x = \infty$ とした場合。下の図は、リチウム同位体存在度の計算値と観測地値の比のX粒子寿命と存在量のバリオンとの比の依存性。この図から、未知の超対称性粒子であるX粒子の性質の取りうる値が読み取れる。温度は、ビッグバンからの時間経過とともに減少するため、温度が1のときが最初の3分間に相当する。

今回の研究で、X粒子粒子が宇宙初期において、高い生成率と長い寿命を持つ事が判明した。X粒子粒子は、宇宙初期においてX粒子原子・分子を形成した可能性がある。X粒子粒子を含む原子や分子、さらにはX粒子原子を複数取り込んだX粒子原子の計算を行った。図2にX粒子水素分子同位体の束縛エネルギーのX粒子質量依存性を示す。原子の束縛エネルギーは質量に比例するため、この依存性を取り除くようX粒子質量を除いた「換算エネルギー」を示す。X粒子質量が増

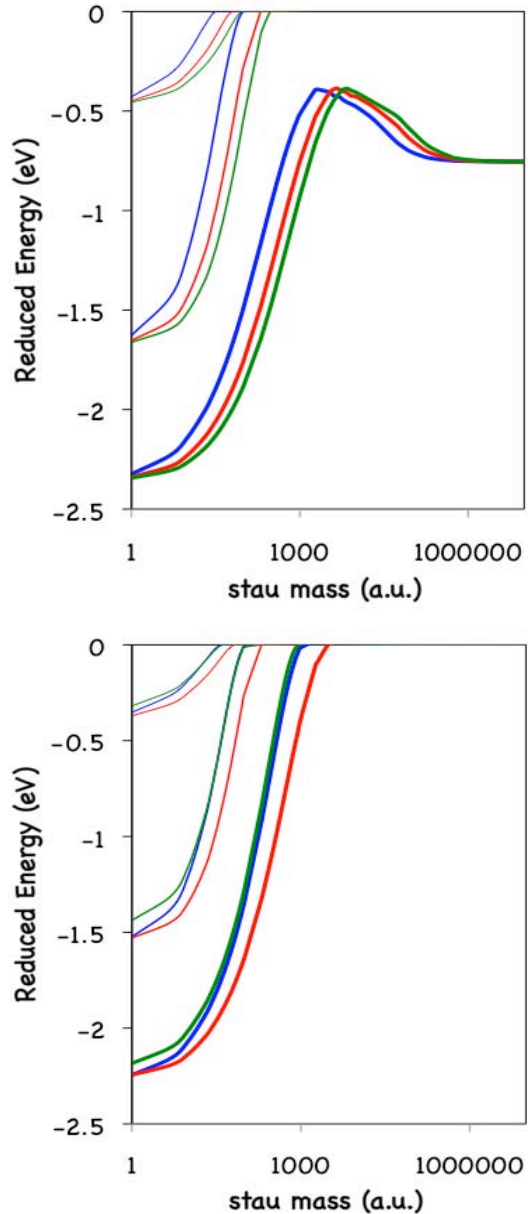


図2 スタウ水素分子(全角運動量0)の換算エネルギーのスタウ質量依存性。換算エネルギーはエネルギーをスタウ質量で除した量である。上の図は、2つの原子核が同じ水素同位体(pp, dd, tt)の場合、下の図は違う同位体(pd, dt, pt)の場合。横軸は原子単位系(電子質量、換算プランク定数、電子電荷をそれぞれ1とする。質量無限大の水素原子原子核がつくる水素原子の束縛エネルギーが1/2、ボーア半径が1となる。)でのスタウ質量。基底状態と2つの振動励起状態を示す。質量が大きくなるにしたがって、励起状態がなくなり、基底状態のみになる。非対称な系では、1000 a.u.以上になると、水素同位体間のエネルギー差が分子の束縛エネルギーより大きくなり、基底状態も原子とイオンに解離する。質量が1 a.u.のとき、

すに従って、量子効果による原子核間の零点振動が激しくなり、励起状態の数が減少している。また、非対称な系の場合、X粒子質量が大きくなると、X粒子原子の束縛エネルギー

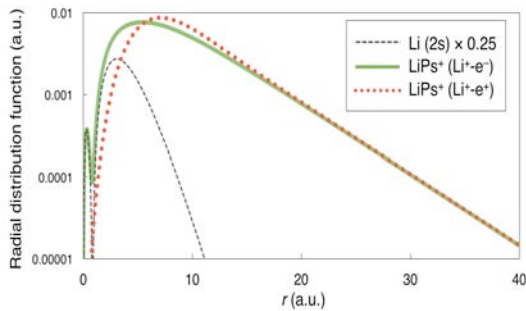


図3 陽電子リチウム原子内の電子と陽電子の同型分布関数。電子の分布関数はリチウムの原子半径以下では価電子の分布と相似している。一方、陽電子の分布は原子核との斥力相互作用により、原子半径以下では、急速に減少し、原子半径の外側 (10 a.u.) 近辺にピークを持っている。距離が 20 a.u.より大きくなると、電子と陽電子の分布は完全に一致しており、減衰の大きさは、ポジトロニウムと陽イオン間の束縛エネルギーから計算できる価と一致している。

一の同位体依存性が大きくなる。質量が大きくなり分子の束縛エネルギーより同位体間の差が大きくなると、非対称な系の分子は、解離して分子状態を持たなくなる。図には、基底状態と2つの振動励起状態を示したが、X粒子の質量の増加とともに、零点振動が強くなり、順次励起状態は消滅する。

陽電子は正電荷をもつため、原子核の正電荷と反発する。また、質量が原子核と比べてはるかに小さいため、同じ電荷をもつ陽子と比べ大きな量子効果が現れる。この関係は、X粒子粒子と原子核の間にも同様に成り立ち、この場合原子核に大きな量子効果が現れる。X粒子粒子は、まだ未発見であるが、原子・分子物理学分野において、陽電子は理論・実験ともに多くの研究がある。しかし、陽電子原子については、理論計算のみである。最近、高エネルギー分解能をもつ、陽電子やポジトロニウムの低速ビームが実用になり、陽電子原子生成が最も重要な課題の一つとなっている。陽電子原子生成の解明は、X粒子原子・分子生成の解明につながる。また陽電子では実験による検証が可能になりつつある。本研究ではX粒子原子の精密計算で用いた計算コードを使い、陽電子原子の構造や束縛機構を解明した。図3に陽電子リチウム原子の価電子と陽電子の動径分布関数を示す。ポジトロニウムよりイオン化エネルギーが小さいリチウム原子の価電子は、陽電子と結合しポジトロニウムを形成する。電氣的に中性のポジトロニウムは、リチウムイオンから離れて弱く結合する。原子核からの距離が 20 a.u.以上では、電子と陽電子の分布関数が重なり、ポジトロニウムを形成し、長いテール (ポジトロニウムハロー) を形成していることが分かる。また、近距離では、電子はリチウム原子の価電子分布と同じ振る舞いをしてい

陽電子の結合は、ポジトロニウムの分極では結合できない。このため陽子とポジトロニウムの基底状態間に共鳴状態がない。また、リチウムイオンの芯分極は、遠く離れた中性のポジトロニウムには発生しない。陽電子がリチウム原子と結合できるのは、電子波動関数の一部が原子核に引きつけられ、核近傍で水素原子の場合より強い引力を原子核から受けているためである事が分かった。さらに、陽電子原子では特異的に相対論効果が顕著になることを発見した。

## 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 14 件)
- 木野康志、山下琢磨、陽電子が拓く物質の科学 第2回 陽電子・原子間相互作用と陽電子原子, しようつつ, **13** (2016) 37 (10 pp) (査読有)
- 山下琢磨、木野康志、相対論効果を含む陽電子アルカリ原子の弱束縛状態の高精度計算, 陽電子科学, **6** (2016) 35 (10 pp) (査読有)
- 佐野陽祐、木野康志、岡壽崇、関根勉、陽電子消滅時刻運動量同時測定法による Ar ガス中での Ps 熱化過程, 放射化学, **33** (2016) 48 (4 pp) (査読無)
- Yasushi Kino, Three-body calculation of exotic molecules with negatively charged massive particle, Journal of Physics: Conference Series, **635** (2015) 072089 (1 p) (査読有)
- Yosuke Sano, Yasushi Kino, Toshitaka Oka Tsutomu Sekine, Ps slowing down process below the Ps break-up energy in Ar gas, Journal of Physics: Conference Series, **635** (2015) 052088 (1 p) (査読有)
- Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Relativistic effects in positronic alkali atoms, Journal of Physics: Conference Series, **635** (2015) 052086 (1 p) (査読有)
- Yosuke Sano, Yasushi Kino, Toshitaka Oka Tsutomu Sekine, Kinetic energy of Ps formed by Ore mechanism in Ar gas, Journal of Physics: Conference Series, **618** (2015) 012010 (5pp) (査読有)
- Takuma Yamashita, Yasushi Kino, High-precision calculation of loosely bound states of LiPs+ and NaPs+, Journal of Physics: Conference Series, **618** (2015) 012009 (6pp) (査読有)
- Motohiko Kusakabe, K. S. Kim, Myung-Ki Cheoun, Toshitaka Kajino, Yasushi Kino, Grant J. Mathews, Revised Big Bang Nucleosynthesis with Long-lived, Negatively Charged Massive Particles: Updated Recombination Rates, Primordial <sup>9</sup>Be Nucleosynthesis, and Impact of New 6Li Limits, The Astrophysical Journal Supplement Series, **214** (2014) 5 (35pp) (査読有)
- Yosuke Sano, Yasushi Kino, Toshitaka Oka, Tsutomu Sekine, Energy Loss of Positrons below the Excitation Threshold in Ar Gas, JJAP Conf. Proc., **2** (2014) 011004 (6pp) (査読有)
- Takuma Yamashita, Ayumi Irisawa, Yasushi Kino, Estimation of Relativistic Effects on Loosely Bound States of Positronic Alkali Atoms, JJAP Conf. Proc., **2** (2014) 011005 (7pp) (査読有)
- Motohiko Kusakabe, K. S. Kim, Myung-Ki Cheoun, Toshitaka Kajino, Yasushi Kino, Grant J. Mathews, New effects of a long-lived negatively charged massive particle on big bang nucleosynthesis, AIP Conference Proceedings, **1594** (2014) 29-34 (査読有)
- Toshitaka Oka, Yosuke Sano, Yasushi Kino, Tsutomu Sekine, Optimisation of the thickness of the moderator for positron annihilation process study in Ar gas, The European Physical Journal D, **68** (2014) 156 (4pp) (査読有)
- M. Kusakabe, K. S. Kim, M.-K. Cheoun, T. Kajino, Y. Kino, <sup>7</sup>Be charge exchange between <sup>7</sup>Be<sup>3+</sup> ion and exotic long-lived negatively charged massive particle in big bang nucleosynthesis, Phys. Rev. D **88**, (2013), 063514 (11pp) [Erratum: Physical Review D **88**, (2013), 089904], (査読有)
- 〔学会発表〕 (計 30 件)

山下琢磨, 木野康志, 『電子・陽電子と貴ガス原子間有効相互作用の研究』日本物理学会第71回年次大会, 仙台, 宮城, 2016/3/16-22 (oral)

Yasushi Kino, Energy levels and structures of exotic molecules with negatively charged particles, 12<sup>th</sup> International conference on low energy antiproton physics, Kanazawa, Japan, March 6-11, 2016 (oral)

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Systematic study of resonance states of positronic hydrogen-like atoms, 12<sup>th</sup> International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP), Kanazawa, Japan, March 6-11, 2016 (poster)

Yasushi Kino, High precision calculation of exotic atom/molecule including massive negatively charged particles, RIKEN symposium Frontier of the muon science applications, Wako, Japan, February 16-17, 2016 (poster)

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Calculation of bound states of exotic alkali hydride cations, RIKEN symposium Frontier of the muon science applications, Wako, Japan, February 16-17, 2016 (poster)

山下琢磨, 木野康志, アルカリ様原子と陽電子の共鳴状態の理論計算による分析, 京都大学原子炉実験所専門研究会, 熊取, 大阪, 2015/11/26-27 (oral)

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, “Weakly binding system of positronic alkali atom: relativistic effects and resonance states,” RIKEN seminar, Wako, Japan, 2015/11/20 (oral)

山下琢磨, 木野康志, 陽電子アルカリ原子の共鳴状態の構造とその発現機構, 原子衝突学会第40回年会, 首都大学東京 南大沢キャンパス, 2015/9/28-30 (poster) \*\*優秀ポスター賞受賞

山下琢磨, 木野康志, 陽電子やミュオンを含むアルカリ原子の構造, 日本放射化学会2015年会・第59回日本放射化学討論会, 東北大学, 仙台, 2015/9/25-27 (poster)

佐野陽祐, 岡 壽崇, 木野康志, 関根勉, 電場存在下での陽電子寿命測定のための陽電子線源の開発, 日本放射化学会2015年会・第59回日本放射化学討論会, 東北大学, 仙台, 2015/9/25-27 (poster) \*\*発表奨励賞受賞

山下琢磨, 木野康志, 陽電子やミュオンを含むアルカリ原子の構造, 日本放射化学会2015年会・第59回日本放射化学討論会, 東北大学, 仙台, 2015/9/25-27 (poster)

山下琢磨, 木野康志, 『陽電子アルカリ原子の束縛・共鳴状態の発現機構』日本物理学会秋季大会, 吹田, 大阪, 2015/9/16-19 (oral)

Yasushi Kino, Takuma Yamashita, Optical model for the positronium formation cross section in positron neon scattering, XVIII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics, Lisboa, Portugal, July 17-20, 2015 (poster)

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, “Calculation of resonance states of positronic alkali atoms,” The XVIII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics (POSMOL), Lisboa, Portugal, 2015/7/17-20 (poster)

Yosuke Sano, Yasushi Kino, Toshitaka Oka, Tsutomu Sekine, Ps slowing down process below the Ps break-up energy in Ar gas, XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Toledo, Spain, July 22-28, 2015, \*\*\*Europhysics Journal (EPJ) Poster Prize

Yasushi Kino, Three-body calculation of exotic molecules with negatively charged massive particle, XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions, Toledo, Spain, July 22-28, 2015 (poster)

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, “Relativistic effects in positronic alkali atoms,” The XXIX International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (ICPEAC), Toledo, Spain, 2015/7/22-28 (poster)

佐野陽祐, 木野康志, 岡 壽崇, 関根勉, 『AMOC法による Ps-Ar 運動量移行断面積の測定』, 第52回アイソトープ・放射線研究発表会, 文京区, 東京, 2015/7/8-10 (oral) \*\*優秀発表賞受賞

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, “Relativistic

effects in positronic atoms,” Positron and Positronium Seminar for Students, Sendai, Japan, 2015/5/22-23 (oral)

山下琢磨, 木野康志, 『陽電子アルカリ原子の共鳴状態の計算』日本物理学会第70回年次大会, 新宿区, 東京, 2015/3/21-24 (oral)

佐野陽祐, 木野康志, 岡 壽崇, 関根勉, 『陽電子消滅時刻・運動量同時測定による Ps-Ar 運動量移行の研究』日本物理学会第70回年次大会, 新宿区, 東京, 2015/3/21-24 (oral)

山下琢磨, 木野康志, 『ポジトロニウムを含む三体系の構造』, 京都大学原子炉実験所専門研究会, 熊取, 大阪, 2014/11/28-29 (oral)

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, “High-precision calculation of loosely bound states of LiPs<sup>+</sup> and NaPs<sup>+</sup>,” 11th International Workshop on Positron and Positronium Chemistry (PPC-11), Goa, India, 2014/11/9-14 (oral)

山下琢磨, 木野康志, 『陽電子アルカリ原子弱束縛状態の高精度計算』日本物理学会秋季大会, 春日, 愛知, 2014/9/7-10 (oral) \*\*優秀発表賞受賞

Yosuke Sano, Yasushi Kino, Toshitaka Oka, Tsutomu Sekine, AMOC measurement of positron annihilation in Ar gas, The 2nd Japan-China Joint Workshop on Positron Science, December 20-23, 2013, Tsukuba, Japan (oral)

Takuma Yamashita, Yasushi Kino, Effective potential energy for a positronic sodium atom and relativistic corrections, T. Yamashita, Y. Kino, The 2nd Japan-China Joint Workshop on Positron Science, December 20-23, 2013, Tsukuba, Japan (poster)

Yasushi Kino, Takuma Yamashita, Relativistic correction on loosely bound states of positronic alkali atoms, The XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics, July 19-21, 2013 (poster)

Yosuke Sano, Yasushi Kino, Toshitaka Oka, Tsutomu Sekine, AMOC study of positron slowing down processes in Ar gas, The XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics, July 19-21, 2013 (poster)

Toshitaka Oka, Yosuke Sano, Yasushi Kino, Tsutomu Sekine, Optimization of the Thickness of the Moderator for Positron Annihilation Process Study in Argon Gas, The XVII International Workshop on Low-Energy Positron and Positronium Physics, July 19-21, 2013 (poster)

木野康志, 第1回東北用電子科学ワークショップ「陽電子原子の弱結合状態の計算」, 2013年6月4-5日, 仙台市 (招待講演)

〔図書〕(計 1件)

放射化学の辞典, 朝倉書店, (2015), 日本放射化学会編 (木野康志: p.47 対消滅, 反物質, pp.146-147 エキゾチックアトム)

〔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 なし

## 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 なし

### (3)連携研究者 なし