学位論文題名

反陽子 p と He 原子との反応過程の理論的研究

学位論文内容の要旨

序)1991年に液体He原子中に打ち込まれた反陽子pの一部がただちに対消滅することなく, 長い時間に渡って(準)安定に存在していることが実験的に初めて発見された(図1). 反物質が物質中において長い寿命を持つということは,これまでの常識では考えられないことである. 反陽子が物質中に存在すると,近傍の原子をイオン化し,そのクーロン場に束縛される. その後,短時間の内に速いオージェ遷移によって原子内に残っている電子を次々に放出しながら脱励起し,最終的に原子核に吸収され対消滅するものと考えられてきた. しかし,かつてCondoはHe原子に捕獲された反陽子のうち, 非常に大きな角運動量の軌道を占めるものはオージェ遷移が起こり難く,輻射遷移によってのみ脱励起が可能であるとの仮説を立てた. この仮説を基にRussel1が理論計算を行い, 少なくとも古典的円軌道のとき角運動量が31以上であればオージェ遷移は輻射遷移よりも起こり難いことを示した.

本研究の目的) 観測された陽子・反陽子対消滅の時間スペクトルの長寿命成分が, Condoがいうように,反陽子原子pHe+の準安定状態の存在によるものである可能性が最も高いが,しかし実験的にはそれを裏付けるような証拠(輻射遷移で放出される光子等)は未だ観測されていない. Russellの計算はたしかに先駆的ではあったが,計算手法は定性的にも不十分なものであり,また計算を行った状態が限られているために理論的に時間スペクトルが再現できるかどうかを試みることもできない.そこで本研究では, 考えられる反陽子とHe原子との様々な反応過程の中から基本的な素過程(捕獲,輻射遷移,オージェ遷移)に関してab initio計算によって定性的,定量的な知見を得, それらによって観測された時間スペクトルが再現できるかどうかを検証する.

捕獲過程)反陽子とHe原子との衝突は電子状態(He,He*)は原子基底の2準位近似により記述し、反陽子とHe原子核との相対運動は古典的に記述する半古典近似(衝突径数法)を用いて扱い、He*に束縛された反陽子が占める軌道の主量子数と角運動量についてその分布を調べた。反陽子とHe原子との距離がある程度近付くと反陽子と電子の反発力のために電子エネルギーがHe*イオンのそれよりも高くなり、一方の電子がただちに放出され反陽子が捕獲される。放出される電子の運動エネルギーは極く小さく、反陽子が失うエネルギーの大きさはHe原子自身のイオン化エネルギーにほぼ等しい。捕獲された反陽子の主量子数Nは35あるいはL+1以上に分布可能であるが、最も寿命が長くなると思われるN=L+1の古典的円軌道に分布できるのはL=36~43の場合である。捕獲された反陽子の分布の全体像は図2のようになる。

 pHe^+ の構造とエネルギー準位) 反陽子の質量に注目すると pHe^+ には1電子の異核2原子分子 (HHe^{2+})として考えることができる。この系のエネルギーと波動関数は断熱近似を用い,電子状態と核の運動を分離して求めた。電子状態は各 $1(=0\sim5)$ につき10個のスレーター型関数を用いて展開した。 各粒子の電荷の関係から核間距離が0と ∞ の極限で電子エネルギーはそれぞれH(1s) と $He^+(1s)$ のエネルギーに等しい。電子と反陽子との相関は核間距離がRe0.56a0付近で最も大きくなり,電子は反陽子を避けようとしてその軌道は著しく歪む。反陽子とHe0開子核との間のポテンシャルがクーロン引力であるために,反陽子の振動・回転励起状態は無限個存在し,そのエネルギー準位の構造と波動関数は分子よりも原子のそれに類似している。また,振動状態と回転状態とを分離することはできない。

輻射遷移確率)反陽子との相関のために電子の軌道は歪み電子の電荷分布に偏りが生じるが,これによって電子に誘起される電気双極子モーメントは反陽子の双極子モーメントとは反対方向を向いているために, pHe^+ としての遷移モーメントは減少し,輻射遷移の確率は小さくなる。 N=38, L=37から終状態 N=37, L=36への輻射遷移確率は電子の双極子モーメントを考慮しないときに比べておよそ30%程度に抑制される。角運動量Lが30以上の各状態では輻射遷移について少なくとも 1μ sec以上の寿命を持つ。(図3)

オージェ遷移確率)反陽子が励起状態にあるpHe⁺のすべてのエネルギー準位はpaイオンの状態に対して自動イオン化状態になっている。ただし、 水素型paイオンの主量子数が39以上ではエネルギーがHe⁺ (1s)よりも高くなり、オージェ遷移の終状態とは成り得ない。オージェ遷移は束縛状態と連続状態との配置間相互作用(CI)として表されるために、断熱近似によって得られた反陽子の振動・回転波動関数を基にCI計算を行い、束縛状態と連続状態との結合の強さを直接評価した。オージェ遷移確率の大きさは終状態での電子および反陽子の角運動量変化Δ1の大きさに著しく依存している。 Δ1=3の場合にはオージェ遷移は輻射遷移に比べて圧倒的に速く、このような状態は準安定には成り得ない。 Δ1=4で輻射遷移と同程度の確率となり、Δ125の場合にはオージェ遷移はほとんど起こらないと考えてよい。(図4)

時間スペクトル)衝突によって生成されたplle*での反陽子の状態の初期分布,各準位の輻射遷移確率とオージェ遷移確率とを用いて対消滅に対するシュミレーション計算を行った。本研究では直接考慮はしなかったが,生成後のplle*とHe原子との衝突による効果を初期分布における角運動量を制限するパラメータLmaxとして導入した。Lmax=37~39のときに実験から得られた長寿命plle*の寿命(3~4µsec)と,全消滅数における長寿命成分の割合(3%)とを再現した(図5)。また,どの様な実験条件においても時間スペクトルに現れる長寿命成分の定性的な特徴,長寿命成分は単一の指数関数的に減少するのではなく2つの傾きを持つこともLmaxに関わらず再現している。これらから観測された長寿命反陽子は間違いなく反陽子原子plle*の準安定状態において何回かの輻射遷移を起こしたものであることが確認された。本研究ではさらにレーザーによる誘導遷移に対する応答も調べた。準安定状態から速いオージェ遷移の状態へ誘導遷移されると時間スペクトルに鋭いピークが現れる(図6)。このピークの存在そのものは実験的にplle*の準安定状態の存在を確かめる格好の分光方法であり,その高さと減衰曲線を理論値と比較することにより,分布数とオージェ遷移確率とを直接確かめることが可能である。

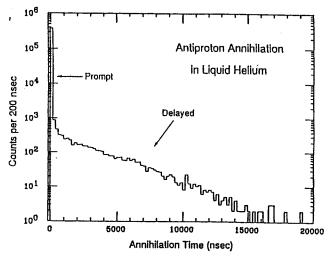


図1 液体lie中での対消滅の時間スペクトル.

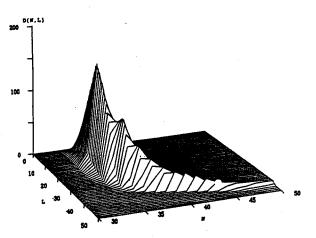


図2 捕獲された反陽子の量子数N,Lの分布.

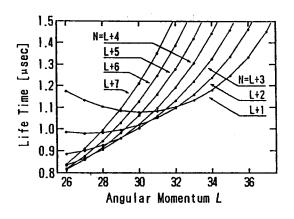


図3 準位N,Lの輻射遷移に対する寿命.

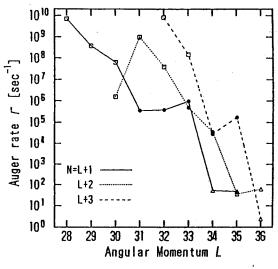


図4 オージェ遷移確率. □:Δ1=3,●:Δ1=4,△:Δ1=5

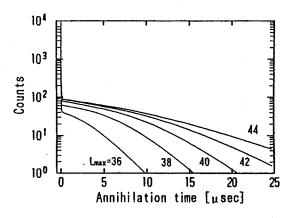


図5 理論計算による対消滅時間スペクトルの遅延成分

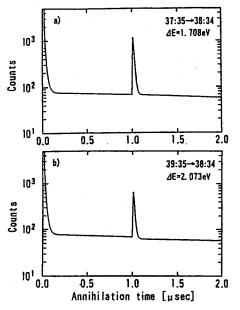


図6 誘導遷移に対する時間スペクトルの応答.

学位論文審査の要旨

主 教 授 佐々木 不可止 副 査 教 授 小 中 重 弘 副 査 授 博 教 川崎 昌 副 杳 謙 師 野 몸 盂 司

学位論文題名

反陽子pとHe原子との反応過程の理論的研究

液体 He 中に打ち込まれた反陽子 pの一部がただちに対消滅することなく、これまでの常識に反して長い時間に渡って準安定に存在(ほぼ 3 μ sec の寿命)することが 1991 年実験的に発見された。かって、負電荷中間子 $\{\pi^-,K^-\}$ が液体 He 中で当時の理論的予測より 2 桁も長い $0.2\sim0.3n$ sec の寿命を持つことを説明するため、Condo は He 原子に捕獲された負電荷中間子のうち、非常に大きな角運動量の軌道を占めるものはオージェ遷移が起こり難く、輻射遷移によって脱励起するとの仮説を立てた。この仮説を基に Russell は理論計算を行い、角運動量が 31 以上であればオージェ遷移は輻射遷移よりも起こり難く、条件によっては μ sec オーダーの準安定状態が有り得ることを示した。

この度観測された陽子・反陽子対消滅の長寿命成分が、Condoの仮説、即ち反陽子原子pHe+の準安定状態の存在によるものである可能性が高いが、実験的にそれを直接裏付ける証拠は未だ観測されていない。もしも長寿命成分の存在がCondoの仮説に依るものとすれば観測された時間スペクトルがこの仮説に基づいた理論計算によって再現できるか否かを検証することが望まれる。更にそのためには反陽子のHe原子による減速・捕獲から対消滅に至るまでのすべての素過程について検討する必要がある。Russellの計算はこの点に於いて先駆的ではあったが定量性に欠け、また計算を行った素過程・状態が限定されているため時間スペクトルの再現を試みることはできない。

申請者は当論文に於いて対消滅に至るまでの反陽子とHe原子との反応過程を基本的な素過程に分け、各

素過程について非経験的計算を行って時間スペクトルを生成し、観測された時間スペクトルが再現できるか否かを検討した。その内容は以下のとおりである。

反陽子とHe原子との衝突による 捕獲過程については電子状態をHeとHe+に対応する2準位近似により記述し、反陽子とHe原子核との相対運動は半古典近似の衝突径数法を用いて扱った。反陽子の捕獲に伴って電子が放出され pHe+系が生成する。捕獲された反陽子の軌道の主量子数と角運動量について最も寿命が長くなると思われる N=L+1 (L=36~43) の軌道を含め、その分布を得た。

pHe+系は異核2原子分子として考え、この系のエネルギーと波動関数を断熱近似によって電子状態と核の運動を分離して求めた。通常の2原子分子と異なり、反陽子とHe原子核との間にはクーロン引力が働くため、反陽子の振動・回転励起状態は無限個存在し、そのエネルギー準位の構造と波動関数は分子よりも原子のそれに類似する。

この多様な準位に在る pHe^+ 系について輻射遷移とそれに競合するオージェ遷移の各確率を配置間相互作用 (CI)法によって求めた。それによって得たデータと捕獲反陽子の初期分布を用いて対消滅に至るまでのシュミレーション計算を行った。その際、生成後の pHe^+ 系とHe原子との衝突による効果を考慮するパラメータ L_{max} を導入し、 $L_{max}=37\sim39$ と置けば実験から得られた長寿命成分の寿命 ($3\sim4~\mu$ sec)、全消滅数における長寿命成分の割合 (3%)、更に時間スペクトルに現れる長寿命成分の定性的な特徴を良く再現する事を示した。また、申請者は当論文においてレーザーによる誘導遷移に対する応答を調べ、その時間スペクトルに鋭いピークが出現することが実験的に pHe^+ 系の準安定状態の存在を確認する分光方法であることを提案した。

以上、申請者が国内外の研究者の注目を集めている最近の観測データに対して、原子・分子についての 非経験的理論を駆使し、その機構を解明したことはきわめて意義深いものであると認められる。また、主 論文の内容の一部は既に権威のある国外の学術雑誌に発表され、高い評価を得ている。

審査員一同は、主論文と参考論文(7編)の内容を検討し、以上の理由により申請者が博士(理学)の学位を得る に充分の資格があるものと認めた。