

Hidrojen Benzeri Mendelevyumun Yarı Ömürleri

The Lifetimes of Hydrogen-like Mendelevium

Güldem ÜRER^{1*}

Gönderme Tarihi: 12.03.2018

Düzeltilme Tarihi: 22.03.2018

Kabul Tarihi: 23.03.2018

Öz- Bu çalışmada hidrojen benzeri mendelevyumun (Md^{100+} , $Z=101$) yarı ömürleri tam relativistik çok konfigürasyonlu Dirac-Fock (MCDF), yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Hesaplama korelasyon etkilerinin yanısıra kuantum elektrodinamik etkiler (QED) de göz önüne alındı. Elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış tek teorik çalışma sonuçları ile karşılaştırıldı ve yorumlandı. 8g ve 9g seviyelerinin yarı ömürleri bu çalışmayla ilk defa sunuldu.

Anahtar Kelimeler- MCDF yöntemi, QED etkileri, Yarı ömür

Abstract - In this study, the lifetimes of hydrogen-like mendelevium, Md^{100+} ($Z=101$) have been investigated using the fully relativistic multi-configuration Dirac-Fock, MCDF method. The quantum electrodynamic effects have also considered besides correlation effects in the calculation. The obtained results have been compared to those of the only known previous study in the available literature and interpreted. The lifetimes of 8g and 9g levels have been presented with this study for the first times.

Keywords- MCDF method, QED effects, Lifetimes

I. GİRİŞ

Hidrojen benzeri yapılar, atomik yapıların en basit halidir. $+Ze$ yüklü çekirdek ve bu çekirdek etrafında dolanan tek bir elektrondan oluşur. Bu basit yapıları incelemek, atomik yapıların anlaşılmasını ve kullanılan yöntemlerin test edilmesini sağlar. Son yıllarda çokça iyonlaştırılmış atomların dalga boyu, salınıcı şiddeti, geçiş olasılığı ve yarı ömür gibi parametreleri, astrofiziksel spektrum ve atomik çarpışma çalışmaları, X-ışını lazerlerinin geliştirilmesi ve füzyon plazmalarının tanımlanması gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1]. Hidrojen benzeri çalışmalar da bu konuya dahildir ve günümüze kadar değişik atomik sistemler için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Genellikle gerçekleştirilen çalışma sonuçları NIST atomic database veri tabanında [2] yer almaktadır. Bunların arasında hidrojen benzeri aktinitleri ($Z=89-103$) ele alan çok az sayıda çalışma vardır. Johnson ve Soff [3] ve Yerokhin ve Shabaev'e [4] ait çalışmalarda $1s_{1/2}$, $2s_{1/2}$, ve $2p_{3/2,1/2}$ seviyelerinin enerjileri yer almaktadır. Hidrojen benzeri mendelevyumun (Md^{100+}) seviye yapısı ve geçiş verilerinin incelendiği tek teorik çalışma Jitrik ve Bunge'ye [5, 6 veya 7] aittir. Jitrik ve Bunge hidrojen benzeri atomları iki konfigürasyon takımı ile ele alarak seviye enerjileri, dalga boyları, salınıcı şiddetleri, geçiş olasılıkları ve yarı ömürleri gibi parametreleri hesapladılar.

Hidrojen benzeri mendelevyumun nl ($n=1-9$, $l=0-4$) seviyelerinin yarı ömürlerinin hesaplandığı bu çalışma, Md^{100+} 'nın seviye yapılarının ve bazı geçiş parametrelerinin MCDF yöntemiyle [8] hesaplandığı başka bir çalışmanın devamıdır. Seviye yapılarının ve geçiş parametrelerinin diğer çalışma sonuçlarıyla oldukça uyumlu hatta diğer çalışmalardan daha hassas sonuçlar verdiğinin görülmesi üzerine yukarıda bahsedilen seviyeler için yarı ömürler de hesaplandı. MCDF yöntemiyle gerçekleştirilen hesaplamalar, hidrojen, helyum ve lityum benzeri aktinit atomlarının konu alındığı geniş çaplı hesaplamaların bir parçasıdır [9-12].

Teorik bir çalışmanın deneysel verilerle desteklenmesi o çalışmanın güvenilirliğini arttırmaktadır. Md^{100+} iyonuyla ilgili çok az teorik çalışma varken, hiçbir deneysel çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma

^{1*} Sorumlu yazar iletişim: gurer@sakarya.edu.tr

Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, 54140 Türkiye

kapsamında sunulan verilerin, gelecekte yapılacak diğer teorik ve deneysel çalışmalar açısından oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

II. HESAPLAMA YÖNTEMİ

Bu kısımda çok konfigürasyonlu Dirac-Fock, MCDF, yönteminde kullanılan temel ifadeler verilmektedir. MCDF yöntemi ile ilgili geniş bilgi [8] ve [13] kaynaklarından edinilebilir. Bu yöntemde bir atom veya iyon atomik hal fonksiyonu (ASF, $\Psi_\alpha(PJM)$) ile temsil edilir, atomik hal fonksiyonu ise konfigürasyon hal fonksiyonlarının (CSF, $|\gamma_r, PJM\rangle$) lineer kombinasyonu ile elde edilir:

$$\Psi_\alpha(PJM) = \sum_r^{n_c} c_r(\alpha) |\gamma_r, PJM\rangle \quad (1)$$

Burada c_r , bir sütun vektörü olan konfigürasyon karışım katsayılarıdır. Enerji fonksiyoneliye c ; ışık hızı, \mathbf{u} ; elektronun momentum işlemcisi, α_j ve β_j (4×4)'lük Dirac matrisleri ve $V(r_j)$ çekirdek potansiyeli kullanılarak yazılan

$$H_{DC} = \sum_{j=1}^N \left(c \alpha_j \cdot \mathbf{p}_j + (\beta_j - 1)c^2 + V(r_j) \right) + \sum_{j < k}^N \frac{1}{r_{jk}} \quad (2)$$

şeklindeki Dirac-Coulomb hamiltonyeninden elde edilmektedir. (2) iadesinde yer alan c , ışık hızı; Nükleer yük dağılımı için ise iki bileşenli Fermi fonksiyonu kullanılır. Ayrıca korelasyonun yanı sıra tersinir foton etkileşimi ve öz-enerjiyle vakum polarizasyonun toplamı olan kuantum elektrodinamik (QED) katkıları birinci merteye (α^2 , α : ince yapı sabiti) düzeltmeler olarak hesaplamalara dahil edilir.

İki hal arasındaki geçişin karakterizasyonu, açığa çıkan fotonun toplam açısal momentumu ve paritesiyle ifade edilir. Geçişe eşlik eden fotonun paritesi $\pi = (-1)^k$ ise elektrik çoklu (Ek) geçişi, $\pi = (-1)^{k+1}$ ise magnetik çoklu (Mk) geçiş olarak tanımlanır. Burada k soğrulan ya da yayılan fotonun açısal momentumudur. Bir ışımali geçişte $S^{\pi k}$ çizgi şiddeti olmak üzere yayınlanma olasılığı

$$A^{\pi k}(\gamma' J', \gamma J) = 2C_k \left[\alpha(E_{\gamma' J'} - E_{\gamma J}) \right]^{2k+1} \frac{S^{\pi k}(\gamma' J', \gamma J)}{g_{J'}} \quad (3)$$

ile verilir. Buradaki C_k katsayıları açılımı $C_k = (2k+1)(k+1)/k((2k+1)!)^2$ şeklindedir. (3) denklemindeki $E_{\gamma' J'}$ ve $E_{\gamma J}$ sırasıyla üst ve alt seviyenin enerjileri ve $g_{J'} = 2J'+1$ üst seviyenin istatistiksel ağırlığıdır. Yayınlanma olasılığı ifadesinden yararlanarak bir seviyenin yarı ömrü

$$\tau_i = \frac{1}{\sum_j A_{ij}} \quad (4)$$

şeklinde tanımlanır.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Küçük ve orta Z 'li atomların hidrojen benzeri iyonları ile ilgili hesaplamalar yüksek duyarlılıkla gerçekleştirilmiştir. Büyük Z 'li atom ve iyonların hesaplamalarında bilgisayarların hafıza ve yakınsama problemleri gibi bazı kısıtlamalar mevcuttur. Gelişen bilgisayar donanımları ve programlar bu kısıtlamaların üstesinden gelmeye başlamıştır. Buna rağmen özellikle çoğu sentetik olan aktinidlerle ve iyonlarıyla ilgili teorik çalışmalar hala çok azdır. Bu atom ve iyonların radyoaktiviteleri ve çok kısa olan yarı ömürleri deneysel çalışmalarını da neredeyse imkânsız hale getirmektedir.

Hidrojen, helyum ve lityum benzeri aktinit atomları ile ilgili yapılan hesaplamalarda, Md^{100+} ($Z=101$) iyonunun atomik yapı hesaplamalarında ve geçiş parametrelerinde elde edilen yüksek doğruluk, yarı ömür hesaplamaları da gerçekleştirmeye sevk etti. Çok konfigürasyonlu Dirac-Fock (MCDF) yöntemiyle [8, 13] gerçekleştirilen hesaplamada nl ($n=1-9$, $l=0-4$) seviyelerinin yarı ömürleri de yüksek doğrulukla elde edildi. Hesaplama korelasyonun yanı sıra birinci merteye düzeltmeler olan tersinir foton etkileşimi (Breit düzeltmeleri) ve öz-enerji ve vakum polarizasyonundan oluşan kuantum elektrodinamik katkılar da dikkate alındı. MCDF yöntemiyle yarı ömürler Coulomb (hız) ve Babushkin (konum) ölçeklerinin her ikisiyle de hesaplanabilmektedir. Elde edilen sonuçlar mevcut kaynaklardaki yarı ömür verilerini içeren tek kaynak olan Jitrik ve Bunge'nin [7] çalışmasıyla ve her iki (Coulomb ve Babushkin) ölçek verileri birbiri ile karşılaştırıldı.

Tablo 1'de sırasıyla Md^{100+} iyonu için MCDF yönteminin her iki Coulomb ve Babushkin ölçeğinde ve Jitrik ve Bunge'nin [7] her iki konfigürasyon takımı (set 1 ve set 2) ile elde edilen yarı ömür (s) sonuçları sunuldu. Tabloda seviyeler uyarılma enerjilerinin büyüklük sırasına göre dizilmiştir.

Tablo incelendiğinde tüm seviyeler için oldukça iyi bir uyum görülmektedir. Bu uyum $n=9$ seviyeleri için de geçerlidir. Seviyelerin yarı ömürleri arasındaki uyumluluğu gözleyebilmek için Şekil 1'de MCDF yönteminin her iki ölçeğiyle Jitrik ve Bunge'nin [7] set 1'deki sonuçları, Şekil 2'de set 2'deki sonuçları ve son olarak Şekil 3'te MCDF hesabının iki ölçeği birbiri ile grafik halinde karşılaştırılmıştır.

Grafikler üzerinden yapılan değerlendirmede bu çalışma sonuçlarının hem set 1 ile (Lineer korelasyon katsayısı R^2 , Coulomb ölçeği için 0,9989; Babuskin ölçeği için 0,9997) hem de set 2 ile (R^2 Coulomb ölçeği için 0,9928; Babuskin ölçeği için 0,9944'dür) oldukça uyumlu olduğu görülür. Set 2'de daha fazla seviye ve daha büyük yörüngeler bulunduğu için uyum çok az miktar değişir. Fischer ve çalışma arkadaşlarının [14] ve diğer birçok teorisyenin de önerdiği gibi iki ölçeğin uyumu yapılan hesabın doğruluğunun bir kanıtıdır. İki ölçeğin birbirine oranının 1'e yakınlığı yapılan hesabın doğruluğunu gösterir. MCDF yönteminin iki ölçeği için yapılan karşılaştırmada R^2 , lineer korelasyon katsayısı hemen hemen 1 ($R^2=0,9991$) olarak elde edildi. İki ölçeğin sayısal oranı 1,0109059; iki ölçek arasındaki yüzde hata 1,0905891'dir. İki ölçeğin de diğer çalışma sonuçlarıyla yüksek uyumlulukta olması ve ölçekler oranının 1 olması MCDF hesabının daha güvenilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca Jitrik ve Bunge'nin [7] yarı ömürleri hesaplamada kullandıkları seviye enerjileri yeterince hassas değildir. nl_j seviyelerinin enerjileri $n(l+1)_j$; seviyelerininkine aynıdır. Örneğin $E(2s_{1/2})=E(2p_{1/2})=1035901070,60 \text{ cm}^{-1}$, $E(3p_{3/2})=E(3d_{3/2})=1267045360,80 \text{ cm}^{-1}$ ve $E(4d_{5/2})=E(4f_{5/2})=1328686355,50 \text{ cm}^{-1}$ vb. Seviye yapılarının belirlenmesindeki bu belirsizliğin yarı ömürlere de yansıdığı düşünülmektedir. Bu sebeple MCDF hesabı sonucu elde edilen yarı ömürlerin şimdiye kadar elde edilmiş en iyi sonuçlar olduğu düşünülmektedir. MCDF yöntemiyle gerçekleştirilen diğer hidrojen benzeri aktinit atomları [9-12] hesaplamalarındaki yüksek doğruluklar da bu çalışma sonuçlarının doğruluğunu desteklemektedir. Ayrıca bu çalışma ile $8g_{7/2,9/2}$ ve $9g_{7/2,9/2}$ seviyelerinin yarı ömürleri ilk defa sunulmaktadır.

Tablo 1. Hidrojen benzeri mendelevyumun (Md^{100+}) nl ($n=1-9$, $l=0-4$) seviyelerinin yarı ömürleri (s)

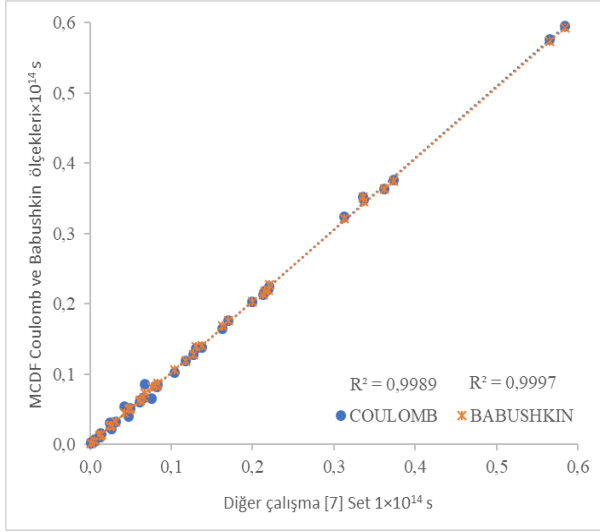
| Seviye | COULOMB | BABUSHKIN | SET 1 [7] | SET 2 [7] |
|-------------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 2p _{1/2} | 1,3528491E-17 | 1,4389519E-17 | 1,44562E-17 | 1,44562E-17 |
| 2s _{1/2} | 1,7619611E-15 | 1,7620497E-15 | 1,70579E-15 | 1,70579E-15 |
| 2p _{3/2} | 2,4175462E-17 | 1,8257805E-17 | 1,79970E-17 | 1,79970E-17 |
| 3p _{1/2} | 4,6340535E-17 | 5,5769476E-17 | 5,46998E-17 | 5,46998E-17 |
| 3s _{1/2} | 5,0940065E-16 | 5,1462107E-16 | 5,01036E-16 | 5,01036E-16 |
| 3p _{3/2} | 7,0114383E-17 | 5,7340757E-17 | 5,60488E-17 | 5,60488E-17 |
| 3d _{3/2} | 1,1726102E-16 | 1,2156648E-16 | 1,15161E-16 | 1,15162E-16 |
| 3d _{5/2} | 1,4223965E-16 | 1,4241482E-16 | 1,41839E-16 | 1,41839E-16 |
| 4p _{1/2} | 1,1130155E-16 | 1,3797265E-16 | 1,35062E-16 | 1,35062E-16 |
| 4s _{1/2} | 8,1950158E-16 | 8,3300468E-16 | 8,18178E-16 | 8,18178E-16 |
| 4d _{3/2} | 2,5888981E-16 | 2,6738515E-16 | 2,57940E-16 | 2,57945E-16 |
| 4p _{3/2} | 1,5973974E-16 | 1,3210384E-16 | 1,28779E-16 | 1,28779E-16 |
| 4f _{5/2} | 6,2785500E-16 | 6,2827487E-16 | 6,25007E-16 | 6,25007E-16 |
| 4d _{5/2} | 3,1683534E-16 | 3,2233192E-16 | 3,21196E-16 | 3,21196E-16 |

Tablo 1. Devam

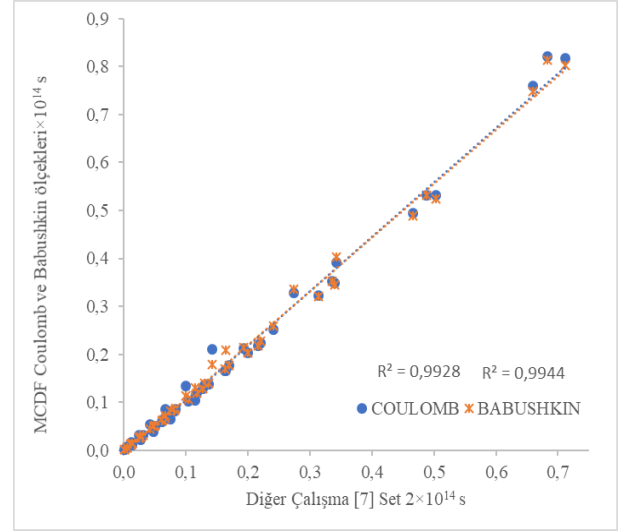
| Seviye | COULOMB | BABUSHKIN | SET 1 [7] | SET 2 [7] |
|-------------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 4f _{7/2} | 6,7148888E-16 | 6,7130173E-16 | 6,69508E-16 | 6,69508E-16 |
| 5p _{1/2} | 2,2002874E-16 | 2,7778712E-16 | 2,69767E-16 | 2,69767E-16 |
| 5s _{1/2} | 1,3848990E-15 | 1,4021936E-15 | 1,37728E-15 | 1,37728E-15 |
| 5d _{3/2} | 4,9110110E-16 | 5,0610302E-16 | 4,89196E-16 | 4,89213E-16 |
| 5p _{3/2} | 3,0997733E-16 | 2,5624772E-16 | 2,47990E-16 | 2,47990E-16 |
| 5f _{5/2} | 1,1922053E-15 | 1,1921802E-15 | 1,18217E-15 | 1,18217E-15 |
| 5d _{5/2} | 5,9667862E-16 | 6,1514400E-16 | 6,11104E-16 | 6,11104E-16 |
| 5g _{7/2} | 2,1365927E-15 | 2,1355491E-15 | 2,13249E-15 | |
| 5f _{7/2} | 1,2794358E-15 | 1,2783255E-15 | 1,27192E-15 | 1,27192E-15 |
| 5g _{9/2} | 2,2020977E-15 | 2,2009859E-15 | 2,19796E-15 | |
| 6p _{1/2} | 3,9347207E-16 | 4,9719816E-16 | 4,73267E-16 | 4,73267E-16 |
| 6s _{1/2} | 2,2450284E-15 | 2,2687958E-15 | 2,20827E-15 | 2,20827E-15 |
| 6d _{3/2} | 8,4899455E-16 | 8,6810889E-16 | 8,31208E-16 | 8,31261E-16 |
| 6p _{3/2} | 5,3442988E-16 | 4,4759451E-16 | 4,25528E-16 | 4,25528E-16 |
| 6f _{5/2} | 2,0347126E-15 | 2,0277091E-15 | 1,99843E-15 | 2,00485E-15 |
| 6d _{5/2} | 1,0236525E-15 | 1,0558385E-15 | 1,03883E-15 | 1,03884E-15 |
| 6g _{7/2} | 3,6387460E-15 | 3,6308004E-15 | 3,61623E-15 | |
| 6f _{7/2} | 2,1883456E-15 | 2,1776189E-15 | 2,15480E-15 | 2,16142E-15 |
| 6g _{9/2} | 3,7560967E-15 | 3,7478569E-15 | 3,73345E-15 | |
| 7p _{1/2} | 6,5459549E-16 | 8,2357184E-16 | 7,60077E-16 | 7,60077E-16 |
| 7s _{1/2} | 3,5157432E-15 | 3,5205440E-15 | 3,36002E-15 | 3,36002E-15 |
| 7d _{3/2} | 1,3646214E-15 | 1,3930376E-15 | 1,30630E-15 | 1,30644E-15 |
| 7p _{3/2} | 8,6361828E-16 | 7,2860739E-16 | 6,73264E-16 | 6,73264E-16 |
| 7f _{5/2} | 3,2346745E-15 | 3,2119018E-15 | 3,12442E-15 | 3,14595E-15 |
| 7d _{5/2} | 1,6483109E-15 | 1,6907558E-15 | 1,63177E-15 | 1,63179E-15 |
| 7g _{7/2} | 5,7654327E-15 | 5,7341377E-15 | 5,65515E-15 | |
| 7f _{7/2} | 3,4845666E-15 | 3,4512547E-15 | 3,37253E-15 | 3,39492E-15 |
| 7g _{9/2} | 5,9557232E-15 | 5,9229055E-15 | 5,84422E-15 | |
| 8p _{1/2} | 1,0348568E-15 | 1,3048112E-15 | | 1,14474E-15 |
| 8s _{1/2} | 5,3101429E-15 | 5,3155623E-15 | | 4,88493E-15 |
| 8d _{3/2} | 2,1169323E-15 | 2,1494908E-15 | | 1,93715E-15 |
| 8p _{3/2} | 1,3465597E-15 | 1,1379149E-15 | | 1,00309E-15 |
| 8f _{5/2} | 4,9380512E-15 | 4,8824260E-15 | | 4,65850E-15 |
| 8d _{5/2} | 2,5178082E-15 | 2,5991980E-15 | | 2,41741E-15 |
| 8g _{7/2} | 8,7487720E-15 | 8,6604815E-15 | | |
| 8f _{7/2} | 5,3186280E-15 | 5,2424890E-15 | | 5,02946E-15 |
| 8g _{9/2} | 9,0393323E-15 | 8,9452986E-15 | | |
| 9p _{1/2} | 1,6551672E-15 | 2,0805968E-15 | | 1,64182E-15 |
| 9s _{1/2} | 8,2106036E-15 | 8,1273648E-15 | | 6,83656E-15 |
| 9p _{3/2} | 2,1093590E-15 | 1,7902674E-15 | | 1,42689E-15 |
| 9d _{3/2} | 3,2790472E-15 | 3,3536931E-15 | | 2,74580E-15 |

Tablo 1. Devam

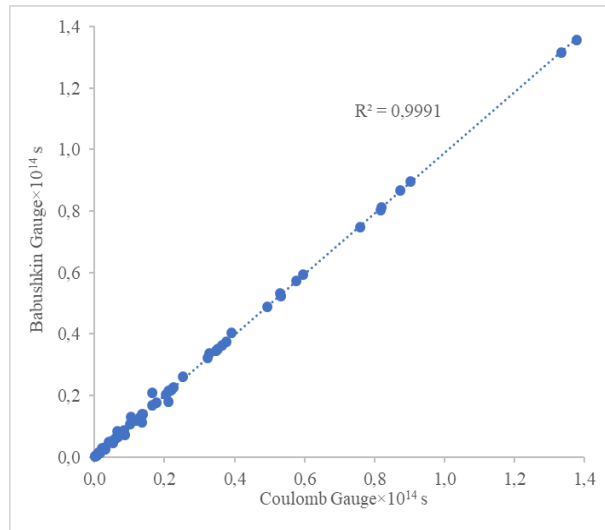
| Seviye | COULOMB | BABUSHKIN | SET 1 [7] | SET 2 [7] |
|-------------------|---------------|---------------|-----------|-------------|
| 9f _{5/2} | 7,5849746E-15 | 7,4849584E-15 | | 6,59562E-15 |
| 9d _{5/2} | 3,9106980E-15 | 4,0308353E-15 | | 3,42320E-15 |
| 9g _{7/2} | 1,3341924E-14 | 1,3144535E-14 | | |
| 9f _{7/2} | 8,1685628E-15 | 8,0213409E-15 | | 7,12215E-15 |
| 9g _{9/2} | 1,3780907E-14 | 1,3563127E-14 | | |



Şekil 1. Md¹⁰⁰⁺'nın yarı ömürleri için yapılan MCDF hesabının iki ölçeğinin diğer çalışmanın [7] set 1 sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 2. Md¹⁰⁰⁺'nın yarı ömürleri için yapılan MCDF hesabının iki ölçeğinin diğer çalışmanın [7] set 2 sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 3. Md¹⁰⁰⁺'nın yarı ömürleri için yapılan MCDF hesabının iki ölçeğinin birbirini ile karşılaştırılması

IV.SONUÇ

Bu çalışma ile hidrojen benzeri mendelevyumun (Md^{100+} , $Z=101$) tersinir foton etkileşimini, kuantum elektrodinamik katkıları ve korelasyonu dikkate alan MCDF yöntemiyle, yarı ömürleri yüksek hassasiyetle hesaplandı. Elde edilen sonuçlar mevcut kaynaklardaki tek teorik çalışma ile iyi uyumludur hatta MCDF sonuçlarının karşılaştırma değerlerinden daha hassas ve doğru olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışma ile 8g ve 9g seviyelerinin yarı ömürleri ilk kez sunuldu. Bu iyonla ilgili elde edilen MCDF sonuçlarının daha sonra yapılacak olan teorik ve deneysel çalışmalara faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Pal'chikov, V. G., "Relativistic transition probabilities and oscillator strengths in hydrogen like atoms," *Physica Scripta*, vol. 57, pp. 581–593, 1998.
- [2] NIST Atomic Database. [Online]. Available: <http://www.fisica.unam.mx/research/table/spectra/1el/>
- [3] Johnson, W. R. and Soff, G., "The lamb shift in hydrogen-like atoms, $1 \leq Z \leq 110$," *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, vol. 33, pp. 405–446, 1985.
- [4] Yerokhin, V. A. and Shabaev, V. M., "The lamb shift in hydrogen-like atoms, $1 \leq Z \leq 110$," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 44, pp. 033103 1–55, 2015.
- [5] Jitrik, O. and Bunge, C. F., "Transition probabilities for hydrogen-like atoms," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 33, no. 4, pp. 1059–1070, 2004.
- [6] Jitrik, O. and Bunge, C. F., "Salient features of electric and magnetic multipole transition probabilities of hydrogen-like systems," *Physica Scripta*, vol. 69, no. 4, pp. 196–202, 2004.
- [7] Atomic transition probabilities for hydrogen-like atoms [Online]. Available: <http://www.fisica.unam.mx/research/tables/spectra/1el/index.shtml>,
- [8] Dyllal, K. G., Grant, I. P., Johnson, C. T., Parpia, F. A., and Plummer, E. P., "GRASP: a general-purpose relativistic atomic structure program," *Computer Physics Communication*, vol. 55, pp. 425–456, 1989.
- [9] Ürer, G., "Energies and radiative transitions (E1, E2, and M1) for hydrogen-like thorium," *Canadian Journal of Physics*, vol. 94, pp. 1138–1141, 2016.
- [10] Ürer, G., "A study for hydrogen like lawrencium," *Canadian Journal of Physics*, (in review).
- [11] Ürer, G., "A structure calculation for hydrogen like nobelium," *Sakarya University Journal of Science* (in review).
- [12] Ürer, G., "The electric dipole transitions of hydrogenlike nobelium," *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* (in review).
- [13] Grant, I. P., *Relativistic quantum theory of atoms and molecules*, Springer, 2007.
- [14] Fischer, C. F., Brage T., and Jönsson, P., "Computational atomic structure-an MCHF approach," Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1977.