

---

# Zimno... zimniej... kwantowo! – ultrazimne mieszaniny jonu z atomami

## Cold... colder... quantum! - ultracold mixtures of ion with atoms

Agata Wojciechowska\*, Maks Walewski\*\*, Michał Tomza\*\*\*

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

---

**Abstrakt.** Chaos i nieprzewidywalność mikroświata od wielu lat spędzają fizykom sen z powiek. Okazuje się jednak, że wgląd w mechanikę kwantową i badanie jej praw są możliwe dzięki chłodzeniu atomów do bardzo niskich temperatur. Kluczowym narzędziem ultrazimnej fizyki, dającym możliwość kontrolowania efektywnych oddziaływań pomiędzy atomami, są rezonanse Feshbacha. Niedawno po raz pierwszy udało się zaobserwować rezonanse Feshbacha w ultrazimnej mieszaninie atomów z jonem. W tym artykule opowiemy, jak współpraca grup doświadczalnych i teoretycznych doprowadziła do pierwszej obserwacji rezonansów i kwantowej kontroli zderzeń pomiędzy jonem i atomem.

**Słowa kluczowe:** reżim ultrazimny, mieszanina atomów z jonem, rezonans Feshbacha

**Abstract.** Chaos and unpredictability of the micro-world have loomed large in physicists' minds for years. It turns out that the insight and exploration of quantum laws are possible thanks to cooling atoms to very low temperatures. Feshbach resonances are a crucial tool, enabling to control atoms' effective interactions. Recently Feshbach resonances between ion and atom were observed for the first time. In this paper, we show how the collaboration between experimentalists and theorists has led to the first observation of the resonances and the quantum control of collisions between ion and atom.

**Keywords:** ultracold regime, ion-atom mixture, Feshbach resonance

---

### 1. Co to znaczy zimno?

Zimne miejsca znane człowiekowi to na przykład Antarktyda, szczyty Himalajów zimą czy wewnątrz butli z ciekłym azotem. Jeszcze niższe temperatury znajdziemy na innych planetach, a przestrzeni kosmicznej (mikrofalowemu promieniowaniu tła) można przypisać temperaturę około 2,7 K. Zdarzają się tam także okolice nieco zimniejsze, ale żadna naturalna temperatura nie może się równać z zimnem otrzymanym przez człowieka. Laboratoria fizyczne to najzimniejsze miejsca w znanej nam części Wszechświata – osiągamy w nich temperatury około dziewięć rzędów wielkości niższe od występujących gdziekolwiek indziej! Rekordziści schłodzili kondensat Bosego-Einsteina na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej do 100 pK (1 pK =  $10^{-12}$  K) [1]. Czytelnik może się domyślać, że takie chłodzenie to niełatwe zadanie. A zatem jak to robimy i właściwie po co?

Metody chłodzenia i pułapkowania rozwijają się prędko od czasów skonstruowania pierwszych laserów. Pole elektromagnetyczne lasera umożliwia osiągnięcie

minimum potencjału, do którego dążyć będą atomy<sup>1</sup>. Tę zasadę wykorzystuje wiele technik pułapkowania, np. szczytce optyczne czy pułapki optyczne dipolowe. Jednak by móc umieścić pojedyncze atomy lub jony w pułapkach, trzeba je wstępnie schłodzić. Zazwyczaj na początku zanurza się próbkę w ciekłym helu, aby gaz wytracił energię podczas zderzeń. Następnie możemy użyć tzw. chłodzenia dopplerowskiego. W technice tej wywołuje się zderzenia chłodzonych atomów z pędzącymi w przeciwnym kierunku fotonami. Jeśli częstotliwość światła zostanie dobrana odpowiednio, to atom zaabsorbuje foton. Następnie w atomie następuje emisja spontaniczna, która nie wyróżnia kierunku w przestrzeni. Sumarycznie atom traci pęd ze względu na przeciwnie poruszający się foton. Ostatnim etapem chłodzenia jest najczęściej odparowanie. Analogicznie do mechanizmu parowania np. herbaty, w tej metodzie pozwalamy atomom o największej ener-

---

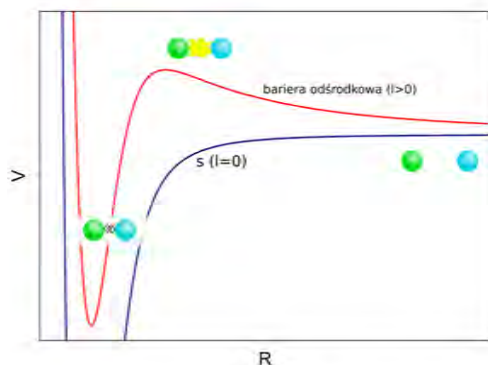
\*ORCID: 0000-0003-1926-9141

\*\*ORCID: 0000-0002-9616-6421

\*\*\*ORCID: 0000-0003-1792-8043

---

1. Zgodnie z twierdzeniem Earnshawa [2] minimum pola elektromagnetycznego nie może być statyczne, dlatego zazwyczaj wykorzystuje się pola zmienne w czasie.



Rys. 1. Modelowa zależność efektywnego potencjału oddziaływania między jonem i atomem od odległości między nimi; pokazano oddziaływanie w fali  $s$  ( $l = 0$ ) oraz w stanie o  $l > 0$  dla zobrazowania bariery centryfugalnej

gii uciec z pułapki, aby zmniejszyć średnią energię kinetyczną gazu.

Czytelnik mógł zauważyć, że posługujemy się tutaj pojęciem energii, a nie temperatury, która intuicyjnie definiuje zimno. Wiadomo, że te dwie wielkości są ze sobą ściśle związane, ale formalne zdefiniowanie „reżimu ultrazimnego” wymaga rozważania energii w układzie.

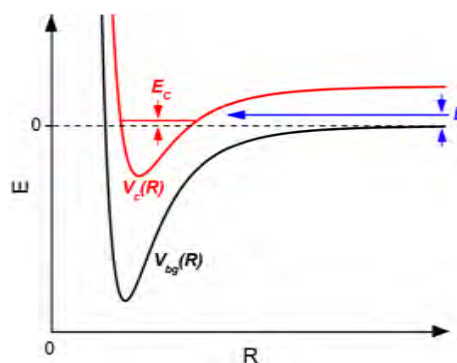
Efekty kwantowe najłatwiej dostrzec, gdy zderzające się obiekty mają zerowy moment pędu  $l$  związany ze względnym ruchem obrotowym atomów. Mówimy wtedy, że zderzenie odbywa się w najniższej fali parcjalnej – fali  $s$ . Efektywny potencjał oddziaływania w stanach o większych wartościach  $l$  zawiera barierę odśrodkową, która uniemożliwia zbliżenie się do siebie atomów o niskich energiach kinetycznych. Przykładowe potencjały oddziaływania jon-atom pokazane są na rys. 1. Przyjmujemy, że układ jest ultrazimny, jeśli energia zderzającej się pary jest niższa niż wysokość bariery odśrodkowej dla fali  $p$  ( $l = 1$ ).

Wysokość bariery odśrodkowej zależy od parametrów potencjału. Choć więc istnieją umowne granice, nie da się podać jednej, uniwersalnej wartości ultrazimnej temperatury. Oddziaływanie jon-atom jest dalekozasięgowe i z tego względu (oraz z uwagi na kwestie eksperymentalne) trudniej jest jon doprowadzić do ultrazimnego reżimu niż atom. Dopiero w niskich temperaturach da się badać efekty kwantowe i kontrolować wszystkie stopnie swobody układów. Dzięki temu możemy pracować nad informacją kwantową i budową komputerów kwantowych [3], dla których jony są jedną z najbardziej obiecujących platform. Ultrazimne gazy to również świetne narzędzie do symulowania zjawisk fizycznych, np. modelu sieci Bosego-Hubbarda i kwantowego magnetyzmu [4] czy reakcji chemicznych [5]. Jesteśmy też w stanie niezwykle dokładnie mierzyć wartości pól czy częstotliwości przejść atomowych [6], co ma bezpośrednie zastosowanie np. w systemie GPS czy do przewidywania trzęsień ziemi. Wiele z odkryć i zastosowań ujrzało

światło dzięki narzędziom umożliwiającym kontrolowanie efektywnych oddziaływań, tj. rezonansom Feshbacha.

## 2. Rezonanse Feshbacha

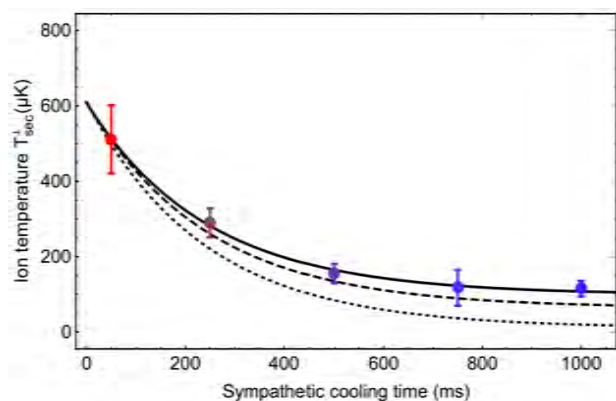
Pierwsza obserwacja rezonansów Feshbacha pomiędzy ultrazimnymi atomami (1998) [8] to jedno z przełomowych wydarzeń we współczesnej fizyce kwantowej. Do zrozumienia mechanizmu powstawania rezonansów wykorzystamy rys. 2, przedstawiający prosty model z dwoma stanami spinowymi atomów (tzw. kanałami). Wyobraźmy sobie dwa zderzające się atomy (lub atom zderzający się z jonem czy cząsteczką). Niech te obiekty mają (względną) energię kinetyczną  $E$ , a potencjał oddziaływania między nimi to  $V_{bg}(R)$ . Istnieje również kanał zamknięty, czyli energetycznie niedozwolony dla energii  $E$  – tak jak  $V_c(R)$  na rys. 2. Dla przykładu te dwa kanały mogą reprezentować stan singletowy i trypletowy układu sprzężone poprzez strukturę nadsubtelną. Rezonans Feshbacha zachodzi, gdy energia zderzenia jest równa energii stanu związanego w kanale zamkniętym. Gwałtownie wzrasta wtedy tzw. długość rozpraszania, czyli wielkość, która opisuje „siłę” oddziaływań. Dzięki zjawisku Zeemana, za pomocą pola magnetycznego możemy wprowadzać przesunięcie energetyczne między kanałami o różnych wartościach rzutu spinu na kierunek pola. Da się zatem dopasować energię zderzenia i energię stanu związanego, aby tym samym mieć kontrolę nad siłą oddziaływań pomiędzy obiektami kwantowymi!



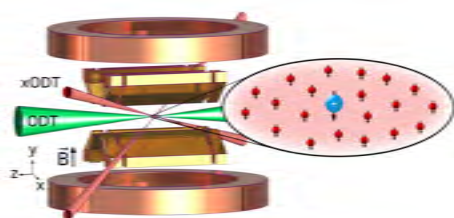
Rys. 2. Poglądowy rysunek wyjaśniający mechanizm powstawania rezonansów Feshbacha w prostym układzie dwukanałowym. Na wykresie zmian energii od odległości pomiędzy zderzającymi się ciałami przedstawiono potencjał oddziaływania w przygotowanym stanie kwantowym (czarny) oraz potencjał kanału zamkniętego (czerwony). Zaznaczono energię kinetyczną zderzających się atomów  $E$  oraz energię stanu związanego  $E_c$  [7]

## 3. Pierwsze obserwacje

W 2019 roku naukowcy z grupy Rene Gerritsmy z Uniwersytetu w Amsterdamie po raz pierwszy schłodzili układ składający się z jonu  $^{171}\text{Yb}^+$  zanurzonego w gazie atomów  $^6\text{Li}$  [9]. Kluczowym elementem chłodzenia jonu były zderzenia z gazem ultrazimnych atomów Li. Zależność temperatury jonu od czasu oddziaływania



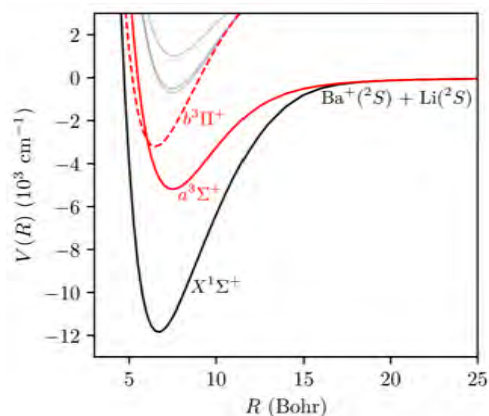
Rys. 3. Zależność temperatury jonu w układzie  $\text{Yb}^+ + \text{Li}$  od czasu oddziaływania z gazem atomów Li. Ciągła linia to dopasowanie zależności eksponencjalnej, a przerywana i kropkowana to przewidywania teoretyczne odpowiednio bez i z uwzględnieniem charakterystyki czasowej pułapki [9]



Rys. 4. Schemat układu doświadczalnego użytego przy pierwszej obserwacji rezonansów Feshbacha między jonem i atomem. Do pułapkowania jonu  $\text{Ba}^+$  użyto pułapki Paula. Następnie jon zanurzono w gazie ultrazimnych atomów Li wewnątrz dwóch pułapek optycznych dipolowych (ODT i xODT) [10]

przedstawiona jest na rys. 3. Energię zderzenia jon-atom udało się obniżyć do 9,9 mK, co w tym wypadku oznacza, że mieliśmy do czynienia ze zderzeniami w reżimie ultrazimnym. Niedługo później, w 2021 roku, w grupie Tobiasa Schaetzta z Uniwersytetu we Freiburgu po raz pierwszy zaobserwowano rezonanse Feshbacha w ultrazimnej mieszaninie atomów litu  ${}^6\text{Li}$  z jonem baru  ${}^{138}\text{Ba}^+$  [10]. Prace prowadzące do tego sukcesu zaczęły się jednak niemal 10 lat wcześniej [11].

Metody chłodzenia w układzie  $\text{Ba}^+ + \text{Li}$  były takie same jak w doświadczeniu z  $\text{Yb}^+$ . Pojedynczy jon schłodzony w pułapce Paula [12], następnie otoczono go chmurą około  $10^4$  ultrazimnych atomów schłodzonych w osobnym wieloetapowym procesie. Wybór pierwiastków miał duży wpływ na sukces chłodzenia. W pułapce Paula używa się pola o częstotliwości radiowej, ale wprowadza to tzw. mikroruch, który w pewnych fazach zderzenia może powodować ogrzanie się układu [13]. Okazuje się, że duża różnica mas zderzających się obiektów minimalizuje ten efekt, stąd wybór ciężkiego jonu  $\text{Yb}^+$  czy  $\text{Ba}^+$  i lekkich atomów Li. W przeciwieństwie do  $\text{Yb}^+$ , potencjały układu  $\text{Ba}^+ + \text{Li}$  (rys. 5) nie pozwalają na radiacyjny transfer ładunku, który również może powodować ogrzewanie. Wynika to z faktu, że stan, w którym bar jest zjonizowany a lit neutralny, to dla tej mieszaniny stan o najniższej możliwej energii.

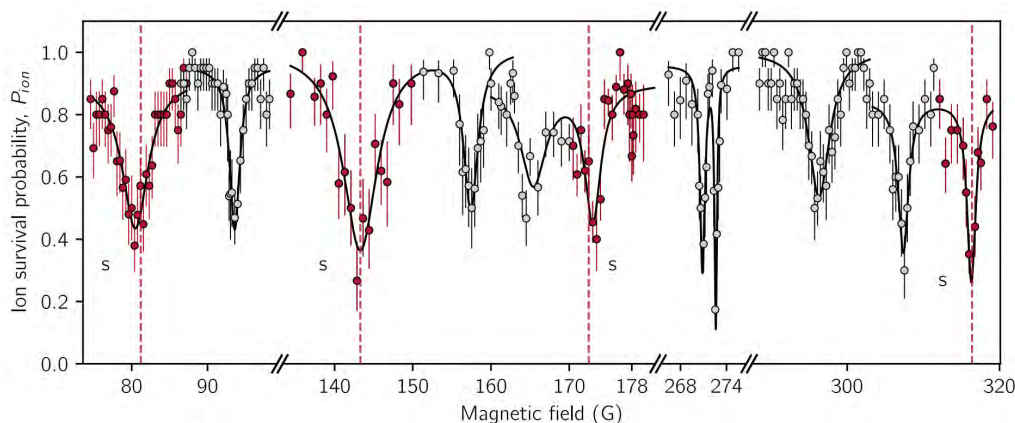


Rys. 5. Elektronowe potencjały oddziaływań mieszaniny  $\text{Ba}^+ + \text{Li}$ . Na wykresie pokazano dwa najniższe stany molekularne – singlet ( $X^1\Sigma^+$ ) i tryplet ( $a^3\Sigma^+$ ), które są w największym stopniu odpowiedzialne za rezonanse Feshbacha w tym układzie. Stan wzbudzony  $b^3\Pi^+$  odpowiada za sprzężenie spin-orbita drugiego rzędu [10]

Wybór konkretnych izotopów był podyktowany tym, że atomy  ${}^6\text{Li}$  są fermionami. Takie gazy chłodzi się łatwiej niż bozonowe, ponieważ zderzenia między identycznymi fermionami są tłumione ze względu na zakaz Pauliego. Potrafimy chłodzić zarówno fermionowy, jak i bozonowy izotop  $\text{Ba}^+$ , ale na początek wybrany został ten, który ma zerowy spin jądrowy.

Mając przygotowany układ, uruchamiamy pole magnetyczne i pozwalamy atomom oddziaływać z jonem przez kilkadziesiąt milisekund. Jeśli w danym polu magnetycznym zajdzie rezonans Feshbacha, zwiększa się przekrój czynny, a przy tym prawdopodobieństwo zderzeń trójciałowych. Wtedy, jeśli dwa atomy litu zderzą się z barem, możemy „stracić” jon. Przez stratę rozumiemy utworzenie zjonizowanej cząsteczki  $\text{BaLi}^+$  zgodnie z równaniem  $\text{Ba}^+ + \text{Li} + \text{Li} \rightarrow \text{BaLi}^+ + \text{Li}$  (wybicie jonu na stałe jest bardzo mało prawdopodobne, ponieważ energie zderzeń są dużo mniejsze niż głębokość pułapki). Co ciekawe, cząsteczka po pomiarze rozpada się znowu na jon i atom, więc cały czas eksperymentujemy na jednym i tym samym jonie. Prawdopodobieństwo przetrwania jonu w funkcji pola magnetycznego przedstawiono na rys. 6. Sprawdziiliśmy, że prawdopodobieństwo zajścia rezonansu skaluje się z kwadratem gęstości chmury atomowej. Takiego zachowania oczekujemy po trójciałowej rekombinacji, na której opieramy nasze rozumienie procesu.

Prace teoretyczne były kluczowe do potwierdzenia obserwacji rezonansów, wyjaśnienia wyników doświadczeń oraz pokierowania dalszymi badaniami. Przewidywanie pozycji rezonansów Feshbacha numerycznie polega na rozwiązaniu równania Schrödingera [14] i wydobyciu z macierzy  $S$  długości rozpraszania. Jeśli zmieniając założone w obliczeniach pole magnetyczne napotkamy nagłą zmianę tej wielkości, to znaleźliśmy rezonans Feshbacha. Aby rozwiązać równanie Schrödingera, musimy poradzić sobie z układem kilkunastu sprzężo-



Rys. 6. Prawdopodobieństwo przetrwania jonu  $Ba^+$  w funkcji pola magnetycznego. Strata jonu w eksperymencie wskazuje na zajście rezonansu Feshbacha [10] (autorzy tej pracy informują o zaobserwowaniu jedenastu zjawisk rezonansu)

nych równań różniczkowych odpowiadających różnym kanałom. Używając klastra obliczeniowego, wyliczyliśmy położenia rezonansów dla setek wartości długości rozpraszania. Dlaczego aż tyle? Potencjały elektronowe zostały wyliczone niezwykle dokładnymi metodami chemii kwantowej, ale nawet najlepsze dostępne obecnie sposoby zawodzą przy precyzyjnym przewidywaniu rezonansów. Trzeba zatem przeskalować potencjały o czynnik bardzo bliski jedności i dopasować singletową i trypletową długość rozpraszania w tych potencjałach tak, aby teoretycznie wyliczone rezonanse zgadzały się z otrzymanymi doświadczalnie.

Pierwsze dopasowanie, które z sukcesem przeprowadziliśmy, wykorzystuje cztery (z jedenastu) zaobserwowanych rezonansów. Klasyfikujemy je jako rezonanse w fali  $s$  (rys. 6), ponieważ zbiór czterech rezonansów w fali  $s$  minimalizuje  $\chi^2$ . Pozostaje zatem pytanie, co z resztą zaobserwowanych rezonansów. Patrząc jeszcze raz na krzywe energetyczne z rys. 5, dostrzeżemy elektronowy stan wzbudzony  $b^3\Pi$  (o rzucie elektronowego orbitalnego momentu pędu równym 1), który przecina atomową energię progową. To wskazuje, że w układzie  $Ba^+ + Li$  mogą istnieć rezonanse Feshbacha związane ze sprzężeniem ze stanami związanymi w tym potencjale (tzw. sprzężenie spin-orbita drugiego rzędu, które miesza spiny atomu i jonu z ich względnym obrotem). Aby uwzględnić te rezonanse, nie wystarczy nam wyłącznie fala  $s$ , ponieważ sprzężenie spin-orbita pozwala na zmianę momentu pędu  $l$  zderzającej się pary. Fala  $s$  będzie odpowiedzialna również za rezonanse w fali  $d$  i wszystkich innych parzystych  $l$ , więc obliczenia numeryczne trwają znacznie dłużej. Rozwiązywanie układu kilkuset sprzężonych równań różniczkowych jest niezwykle czasochłonne, więc używamy tu metody zwanej Asymptotic Bound-State Model. Wymaga ona jedynie znajomości stanów energetycznych mieszanki (a nie dynamiki układu, jak poprzednio).

Prace nad uwzględnieniem sprzężenia spin-orbita nadal trwają. Ponownie celem jest precyzyjne wyznaczenie potencjału elektronowego, tym razem  $^3\Pi$ . Zadanie nie należy do najprostszych ze względu na mnogość rezonansów i niejednoznaczność dopasowania. Jednak znajdując wartość siły sprzężenia spin-orbita, będziemy mogli dokładnie wyznaczać stany związane we wzbudzonym potencjale elektronowym, co nieczęsto się zdarza.

Schłodzenie układu jon-atom do ultraniskich temperatur i pierwsza obserwacja rezonansów Feshbacha między jonem i atomem to niewątpliwe sukcesy badań fundamentalnych. Wykorzystanie wyników takich badań często zajmuje dużo czasu, ale dziś fizyka i technologie kwantowe intensywnie się rozwijają, więc mamy nadzieję na szereg przydatnych zastosowań. Z pewnością obejmują one wdrażanie kontroli oddziaływań do symulacji kwantowych i eksperymentów w chemii kwantowej oraz udoskonalanie bramek logicznych do obliczeń kwantowych.

## Literatura

- [1] Gaaloul, N. *et al.* A space-based quantum gas laboratory at picokelvin energy scales 2022. <https://arxiv.org/abs/2201.06919>.
- [2] Earnshaw, S. On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* (1842).
- [3] Preskill, J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum* 2, 79 (2018).
- [4] Bloch, I., Dalibard, J. & Zwerger, W. Many-body physics with ultracold gases. *Reviews of Modern Physics* (2008).
- [5] Quemener, G. & Julienne, P. S. Ultracold molecules under control! *Chemical Reviews* (2012).
- [6] Safronova, M. S. *et al.* Search for new physics with atoms and molecules. *Reviews of Modern Physics* (2018).

- [7] Chin, C., Grimm, R., Julienne, P. & Tiesinga, E. Feshbach resonances in ultracold gases. *Reviews of Modern Physics* **82**, 1225 (2010).
- [8] Inouye, S. et al. Observation of Feshbach resonances in a Bose–Einstein condensate. *Nature* **392**, 151 (1998).
- [9] Feldker, T. et al. Buffer gas cooling of a trapped ion to the quantum regime. *Nature Physics* **16**, 413 (2020).
- [10] Weckesser, P. et al. Observation of Feshbach resonances between a single ion and ultracold atoms. *Nature* **600**, 429 (2021).
- [11] Tomza, M. et al. Cold hybrid ion-atom systems. *Reviews of Modern Physics* (2019).
- [12] Paul, W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles. *Reviews of Modern Physics* (1990).
- [13] Cetina, M., Grier, A. T. & Vuletić, V. Micromotion-Induced Limit to Atom-Ion Sympathetic Cooling in Paul Traps. *Physical Review Letters* (2012).
- [14] Noumerov, B. V. A Method of Extrapolation of Perturbations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (1924).