

大谷先生との出会いと研究

上智大学・理工学部

岡田 邦宏

自己紹介

1991年 電気通信大学 大谷研究室に配属(第一期生)
(なんと“ジャンケン”で配属が決まる)

1992年 修士課程進学 東大原子核研究所との共同研究へ参加

1994年 博士課程進学
研究テーマ“不安定原子核研究への展開を目的とした冷却 $^9\text{Be}^+$ イオンの
レーザー・マイクロ波二重共鳴分光法の開発”

現在、上智大学・理工学部・物質生命理工学科に所属

電通大・大谷研究室の印象

所属期間:1991年～1998年

- 研究室中心の生活(大学院以降)
 - 昼夜を問わず誰か居る(実験, 睡眠, 飲み会)
- オープンな研究室
 - とにかく人が集まる, 訪問研究者が多数
 - 他大学からの進学者も多かった(多彩なメンバー)
 - 来る者拒まず・去るもの追わず(大谷先生語録)
- 研究志向
 - 学生も研究者として扱われた(と思います)
 - 海外を含む色々な研究所・大学との交流・共同研究多数
私自身も修士から原子核研究所の研究に参加、
博士課程1年のとき、ドイツ・マインツ大へ3か月滞在

研究生活のはじまり

大谷先生、先輩・同期の学生と名大プラ研へ初めての出張

卒業研究：名大プラ研から運んだポールトラップの立ち上げ
(プラ研・梶田さんが製作)

“ CO^{2+} の準安定状態の寿命測定(1991年)”

実際にはクリプトンイオンのトラップ寿命の測定しかできなかった
実験装置はセラトロン, ピコアン, XYレコーダーなど
大谷先生の直接指導も、今思えばとても貴重な時間でした



Tokyo EBIT立ち上げの時期にもかかわらず…

修士課程進学後、原子核研究所との共同研究に参加

“イオントラップを用いた不安核イオンの超微細構造精密分光”

研究室のゼミで紹介された記事

パリティ Vol.04, No.06, 1989-06

NEWS“光でイオンを並べる”著:バーバラ・ゴス・レヴィ

- 光でイオンを並べる
- 陽電子顕微鏡
- 連星の進化論に新たな光

news

- 生体運動を担う分子機械の超微操作

光でイオンを並べる

Clouds of trapped cooled ions condense into crystals

バーバラ・ゴス・レヴィ

©1988 American Institute of Physics

桑田 真 訳

電場と磁場によって捕らえられたイオンが規則的な構造を形づくる様子が写真にとられ、明らかになった。その構造は数個のイオンが結晶状に一直線に並んだり、何千ものイオンが同心球殻上

出している。しかし、イオンを用いた最近の実験では粒子はすべて同じ質量と電荷をもっているために系の素性は、もっとはっきりとしている。さらに個々のイオンはアルミニウムの粒子に

光の周波数を高く感じる。すなわち、レーザー光がこれらのイオンの電子遷移周波数に共鳴することになり、イオンは光子を吸収する。このとき運動量は保存されるのでイオンは減速される。続いて起こる自然放射は空間的に的に起こるのでイオンの運動量は平均としては変わらない。この過程が繰り返されその結果イオンは10mK以下まで冷却される。これらのイオンは吸収した光を再放射するさいの蛍光を検出することによって影像化することができる。このレーザークーリングの

強く印象に残る...



イオントラップを使うとイオンを閉じ込めることができ、レーザーを使うと1つ1つの原子(イオン)を”観る”ことができるらしい...

➡ いつかこんな研究をやってみたい

大学院へ進学後, 東大原子核研究所へ派遣(片山・和田G)
不安定核イオンのレーザー冷却, 精密分光研究をはじめ

研究の過去・現在・未来

- 不安定核イオンの分光学的研究(理研・和田グループ)
 - ミラー核 ${}^7\text{Be}^+$, 中性子ハロー核 ${}^{11}\text{Be}^+$ の精密分光(磁化分布, 荷電半径の研究)
 - 不安定原子核の精密質量測定(多重反射型質量分析計)
- 星間化学への貢献を目的とした低温イオン-分子反応の研究(上智大)
 - $\text{NH}_3^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{H}$ の温度依存性測定
 - 低温におけるイオン-極性分子反応の測定
- イオンのクーロン結晶の生成とその応用(上智大)
 - 新奇なクーロン結晶の生成と観測(リング・円筒クーロン結晶)
 - CaH^+ の振動回転基底状態の生成・レーザー分光(NICT梶田氏)
 - Yb^+ 原子時計の開発(NICT志賀氏・学生派遣、MD計算)
- 太陽風多価イオンX線遷移の実験室観測(首都大・電通大・上智大)
 - 多価イオントラップ用キングドンイオントラップの開発

不安定核Be⁺イオンの分光学的研究

＜主な共同研究者＞

和田道治, 中村貴志, 高峰愛子, P. Schury, 園田 哲,, 山崎泰規, 金井保之, 小島隆夫, 吉田敦, 久保敏幸, 伊藤由太, 岡田邦宏^A, 大谷俊介^B, 片山一郎^C,

V.Lioubimov^D, H.Wollnik^E, H. A. Schuessler^D, S. Naimi

理研, 上智大^A, 電通大^B, 高エネ研^C, テキサス大^D, ギーセン大^E

核研時代を含めると25年ほど経過



現在は、理研RIBFにおけるSLOWRIの建設及び不安定原子核の精密質量測定が精力的に行われている

なぜ不安定核の研究が必要か？

不安定原子核(10000種以上)を対象とする核物理

- 従来の原子核理論を越えた究極の原子核理論の構築
- 新奇な原子核構造の理解

中性子ハローをもつ不安定核の発見 (^{11}Li , ^{11}Be , etc...)

- 天体核物理学への貢献

R-process における生成元素の存在比の研究 ex. $^8\text{Li}(a, n)^{11}\text{B}$

原子分光学的手法による

不安定同位体Beの核構造研究

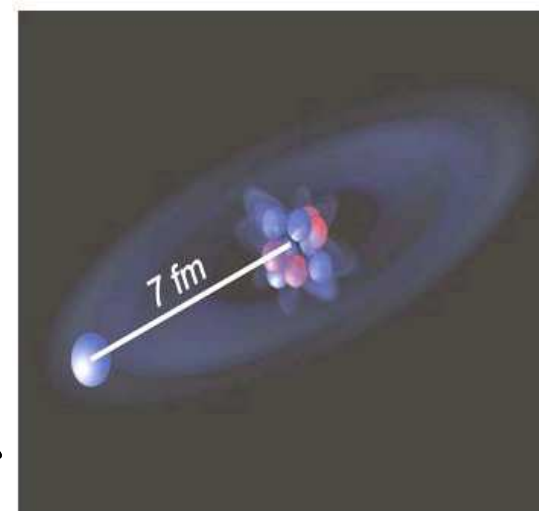
(1) ^{11}Be ($I = 1/2^+$), 半減期13.8秒

一中性子ハロー核の分光学的研究が可能(他の同位体に比べて超微細相互作用弱いと予測され、**大きなB-W効果**が期待される)

理論計算との比較による磁化分布導出
荷電半径との比較

(2) ^7Be ($I = 3/2^+$), 半減期53.29日

^7Li と**鏡核対**をなすため、核子の軌道角運動量、スピン角運動量の期待値を実験的に導出可能
しかし**磁気モーメント**が測定されていなかった



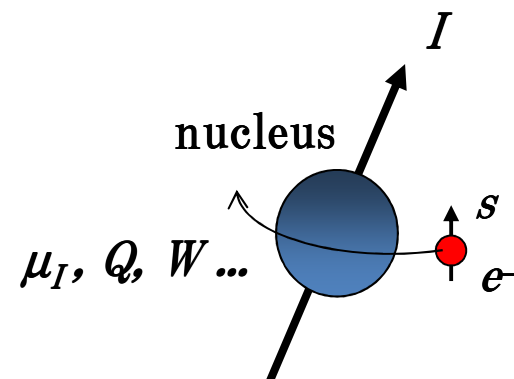
one-neutron halo
 ^{11}Be

Bohr-Weisskopf 効果(磁気超微細構造異常)

磁気超微細構造定数

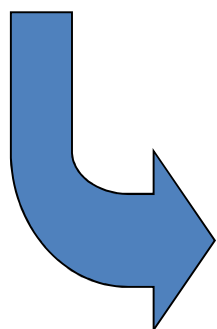
$$A = -\frac{\int \mathbf{M}_N(\mathbf{r}_n) \cdot \mathbf{B}_J(\mathbf{r}_n) d\mathbf{r}_n}{IJ} = A_{p.d.} (1 + \varepsilon)$$

$$A_{p.d.} = -\frac{\mu_I \cdot \overline{\mathbf{B}_J(0)}}{IJ} \quad \text{点核磁気モーメントをもつ
場合の相互作用定数}$$



超微細構造定数 A と核磁気モーメント μ_I を独立に高精度測定

$$\frac{A_{\text{exp1}}}{A_{\text{exp2}}} = \frac{A_{pd1}(1 + \varepsilon_1)}{A_{pd2}(1 + \varepsilon_2)} = \frac{\mu_{I_1} I_2 (1 + \varepsilon_1)}{\mu_{I_2} I_1 (1 + \varepsilon_2)} \quad \begin{array}{l} \text{電子の波動関数の影響を} \\ \text{キャンセルできる} \end{array}$$



Differential Hyperfine Anomaly

$$\Delta_{12} \equiv \frac{A_{\text{exp1}} \mu_{I_2} I_1}{A_{\text{exp2}} \mu_{I_1} I_2} - 1 \cong \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

実験値は全ての理論的補正を含む(理論の検証が可能)

実験装置

理化学研究所・仁科記念棟・RIPS

T. Nakamura et al. PRA(2007)

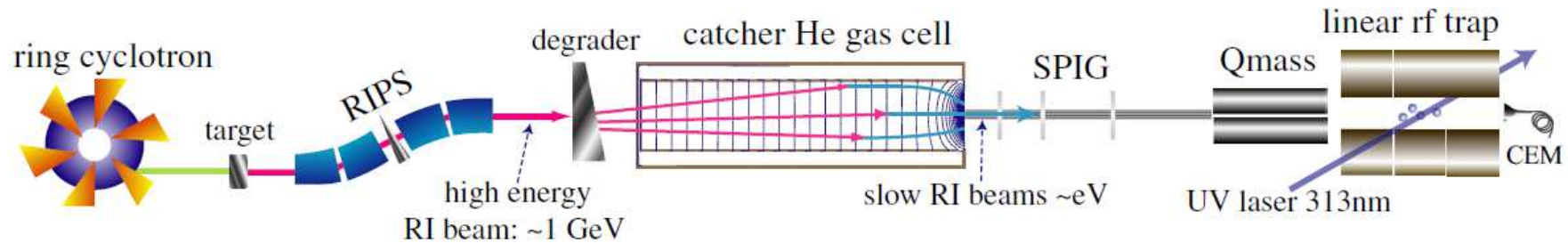
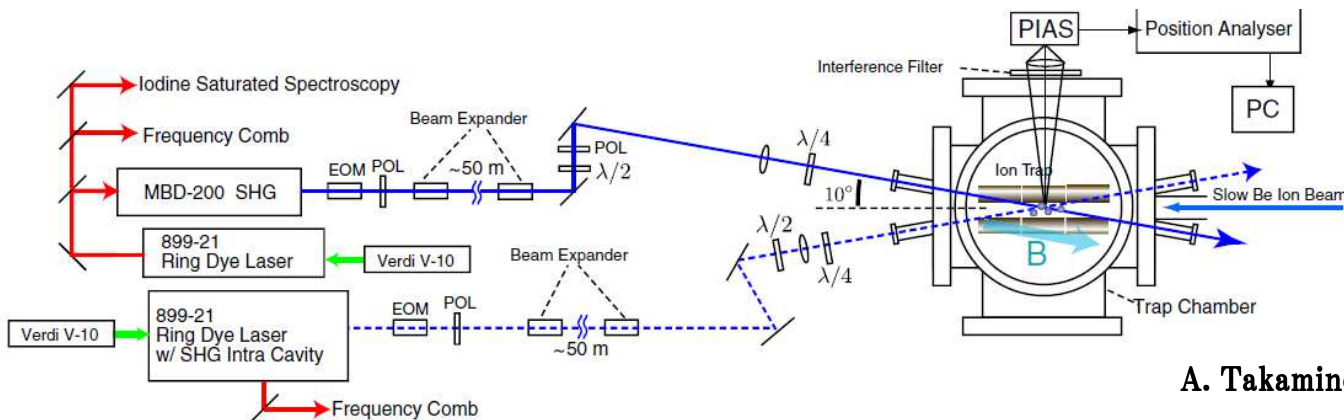


FIG. 1. (Color online) Schematic overview of the experimental apparatus.

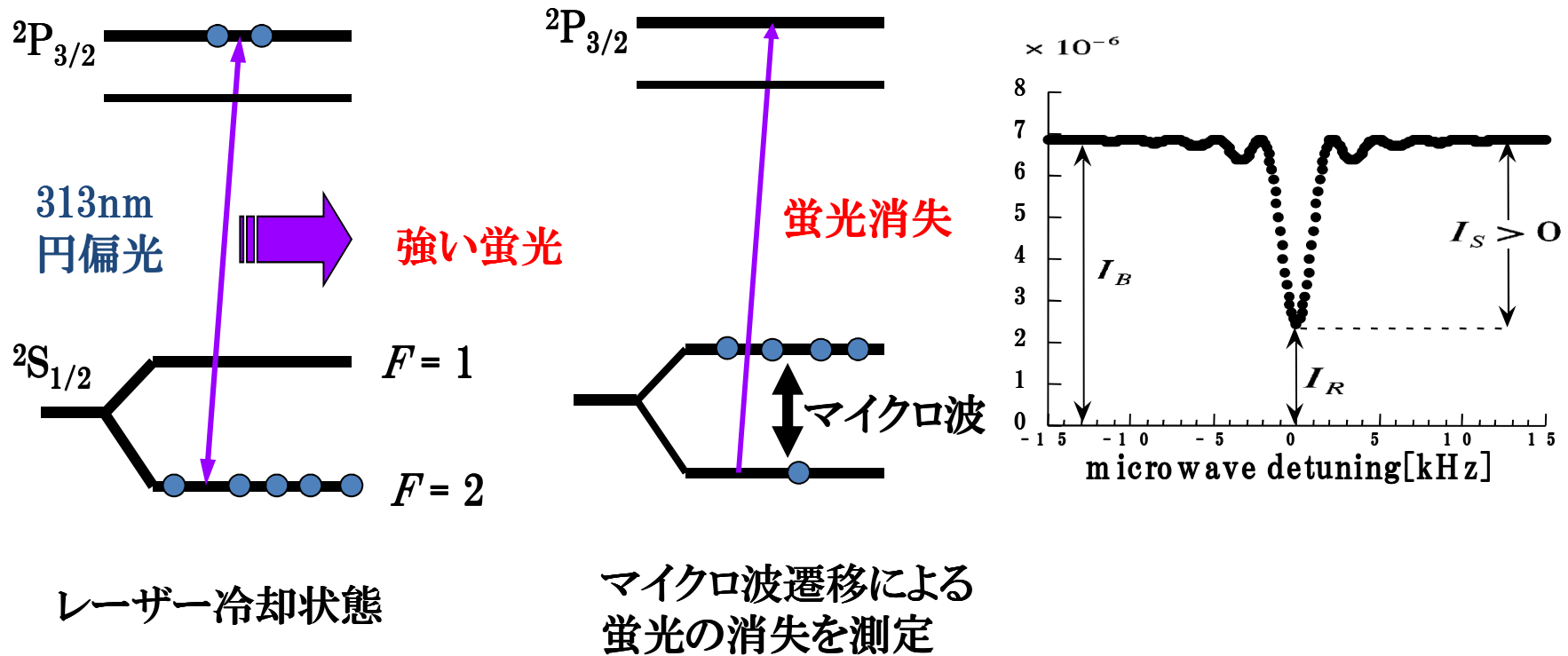


A. Takamine et al. Eur. Phys. J. A (2006)

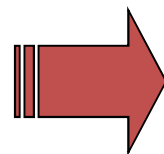
Fig. 5. Schematic layout of the laser setup and the trap chamber.

実験時にトラップに入射されるビーム強度 1cps
 ~ 数10 cps (レーザー冷却必須)

レーザー冷却イオンのレーザー・マイクロ波 二重共鳴分光法

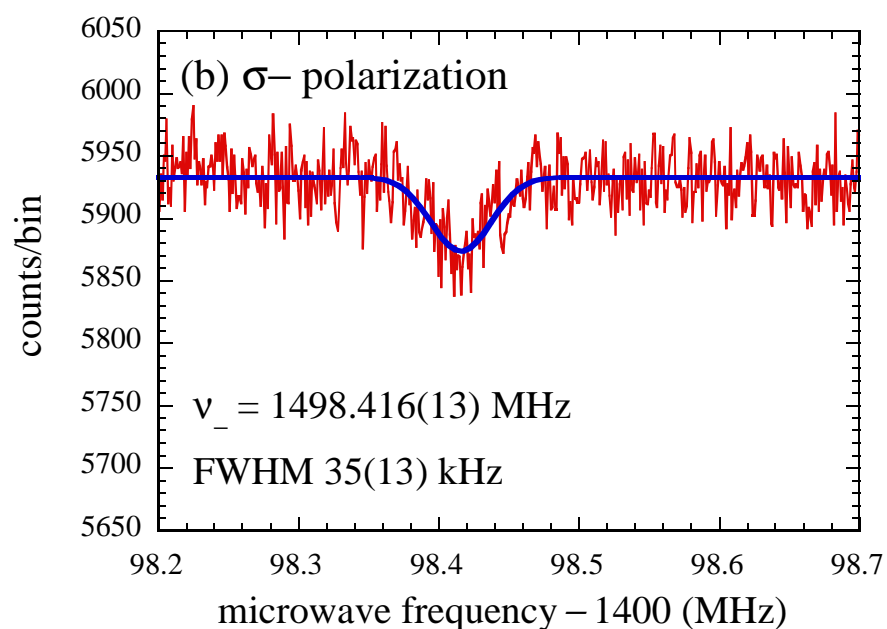
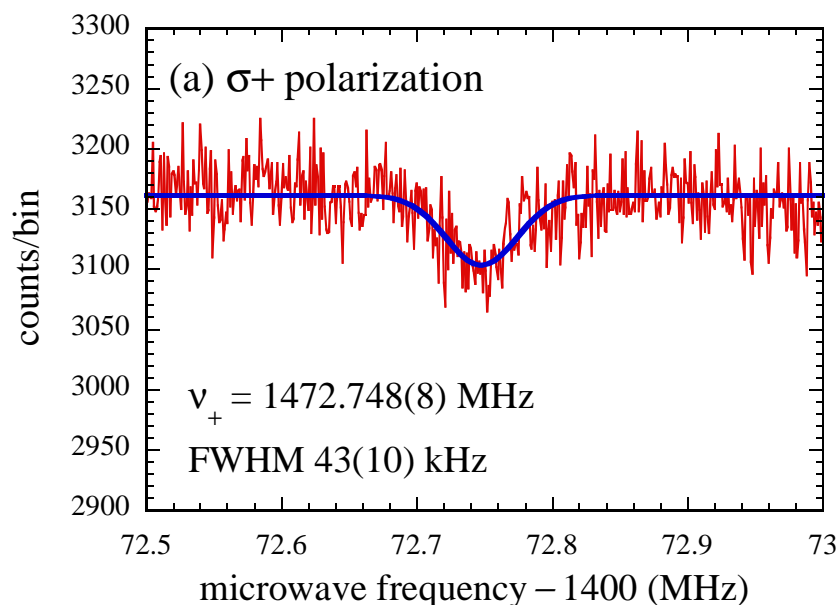


円偏光を使って最大または最小の
 m_F 準位へ光ポンピング
(同時にレーザー冷却)



高感度・高精度な
マイクロ波分光が可能

${}^7\text{Be}^+$ のレーザー・マイクロ波二重共鳴分光



$$A = -742.77228(43) \text{ MHz}, \quad \Delta A / A \sim 6 \times 10^{-7}$$

$$\mu_7 = \frac{A_7 I_7}{A_9 I_9} \mu_9 (1 + \Delta), \quad \Delta \sim 10^{-5} \quad \longrightarrow \quad \mu_7 = -1.39928(2) \mu_N$$

${}^7\text{Be}$ の磁気モーメントを高精度に決定
(世界初！)

Precision Measurement of the Hyperfine Structure of Laser-Cooled Radioactive $^7\text{Be}^+$ Ions Produced by Projectile Fragmentation

K. Okada,¹ M. Wada,^{2,3,*} T. Nakamura,² A. Takamine,² V. Lioubimov,^{2,8} P. Schury,² Y. Ishida,² T. Sonoda,² M. Ogawa,⁴
Y. Yamazaki,^{2,4} Y. Kanai,² T.M. Kojima,² A. Yoshida,³ T. Kubo,³ I. Katayama,⁵ S. Ohtani,⁶
H. Wollnik,⁷ and H. A. Schuessler⁸

¹*Department of Physics, Sophia University, 7-1 Kioicho, Chiyoda, Tokyo 102-8554, Japan*

²*Atomic Physics Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

³*Nishina Center for Accelerator Based Science, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

⁴*Graduate School of Arts and Science, The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan*

⁵*Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan*

⁶*Institute for Laser Science (ILS), University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585, Japan*

⁷*II. Physikalisches Institut, Justus-Liebig-Universität Giessen, Giessen, Germany*

⁸*Department of Physics, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, USA*

(Received 20 June 2008; published 18 November 2008)

The ground state hyperfine splitting of $^7\text{Be}^+$ has been measured by laser-microwave double-resonance spectroscopy in the online rf trap of RIKEN's slow RI-beam facility. Be ions produced by projectile fragmentation of ^{13}C at ≈ 1 GeV were thermalized in a rf ion guide gas cell and subsequently laser cooled in the ion trap to ≈ 1 μeV . This 10^{15} -fold reduction of the kinetic energy allows precision spectroscopy of these ions. A magnetic hfs constant of $A = -742.772\,28(43)$ MHz was measured for $^7\text{Be}^+$, from which a nuclear magnetic moment of $\mu_I = -1.399\,28(2)\mu_N$ was deduced.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.212502

PACS numbers: 21.10.Ky, 27.20.+n, 31.30.Gs, 37.10.Ty

博士課程以来、10年越しの研究が遂に実る！



Hyperfine Structure Constant of the Neutron Halo Nucleus $^{11}\text{Be}^+$

A. Takamine,^{1,*} M. Wada,^{1,†} K. Okada,² T. Sonoda,¹ P. Schury,¹ T. Nakamura,³ Y. Kanai,³ T. Kubo,¹
I. Katayama,⁴ S. Ohtani,⁵ H. Wollnik,⁶ and H. A. Schuessler⁷

¹*Nishina Center for Accelerator Based Science, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

²*Department of Physics, Sophia University, 7-1 Kioicho, Chiyoda, Tokyo 102-8554, Japan*

³*Atomic Physics Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

⁴*Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan*

⁵*Institute for Laser Science (ILS), The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan*

⁶*Department of Chemistry and Biochemistry, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico 88003, USA*

⁷*Department of Physics, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, USA*

(Received 18 October 2012; revised manuscript received 15 January 2014; published 24 April 2014)

The hyperfine splittings of ground state $^{11}\text{Be}^+$ have been measured precisely by laser-microwave double resonance spectroscopy for trapped and laser cooled beryllium ions. The ions were produced at relativistic energies and subsequently slowed down and trapped at mK temperatures. The magnetic hyperfine structure constant of $^{11}\text{Be}^+$ was determined to be $A_{11} = -2677.302\,988(72)$ MHz from the measurements of the $m_F - m_{F'} = 0-0$ field independent transition. This measurement provides essential data for the study of the distribution of the halo neutron in the single neutron halo nucleus ^{11}Be through the Bohr-Weisskopf effect.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.162502

PACS numbers: 21.10.Ky, 27.20.+n, 31.30.Gs, 37.10.Ty

遂に今年、念願の $^{11}\text{Be}^+$ の精密超微細構造分光の論文が出版される！

和田さんの言：“大谷先生に出版のご報告ができなかったことが残念”

上智大学における研究の紹介

■ CaH⁺イオンの振動回転基底状態の生成と検出

陽子－電子質量比($\beta = m_p/m_e$)の時間変化に高い感度をもつ分子イオンが注目されている。本研究ではCaH⁺の超精密振動遷移分光を行うために必要となる“振動回転基底状態”の生成を実現するための基礎研究を行っている。

■ 星間分子雲におけるイオン-極性分子反応の実験室測定

イオントラップ中で生成された極低温分子イオンと低速極性分子を反応させ、低温におけるイオン－極性分子反応の反応速度定数の測定を行っている。

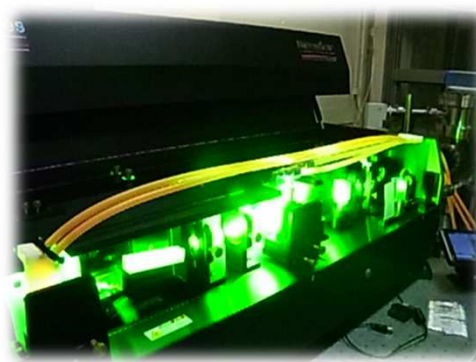
- 星間分子雲の研究に必要なデータベースへの貢献
- 低温反応における量子効果・異常な温度依存性の発見を目指す



反応測定装置



Stark velocity filter



パルス色素レーザー

【分子振動遷移の $\beta = m_e/m_p$ 依存性】

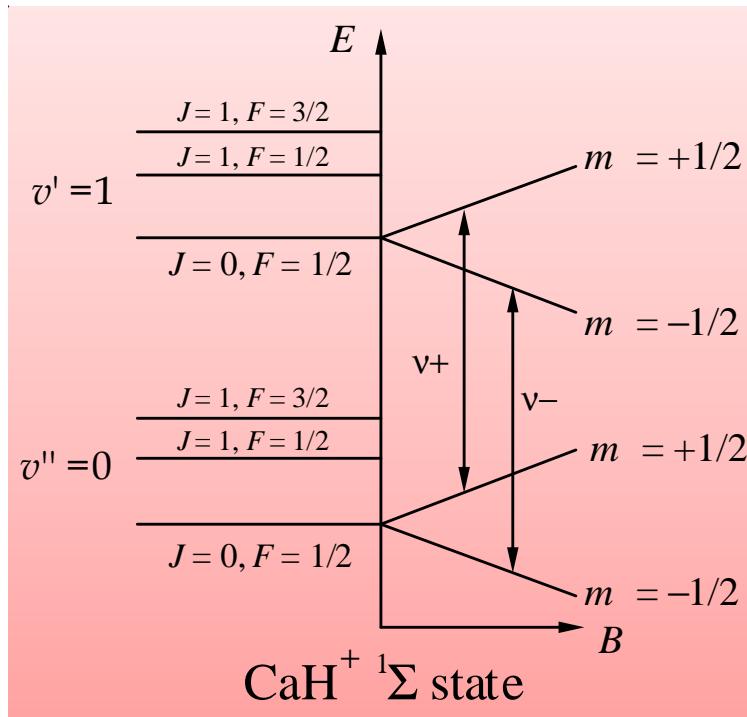
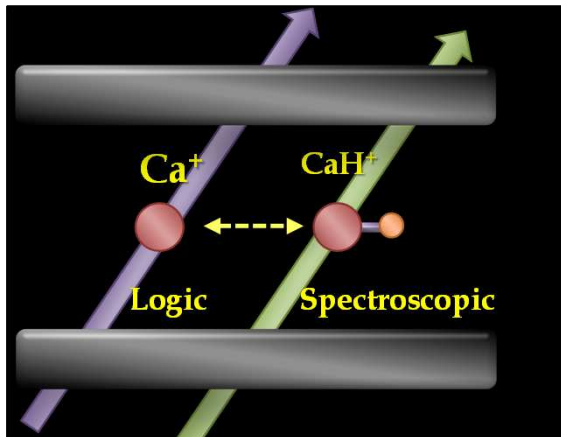
Electronic transition: $\nu_{el} \propto \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_B} \propto \frac{m_p m_e}{m_e + m_p} \approx m_e$

※梶田雅稔, 日本物理学会誌67 (2012)
 ※X. Calmet *at al.*, EPJ. E24, 639 (2002)

Internuclear Energy: $V_{XH^+} = M_n (R\omega_{vib})^2 \propto m_p \nu_{vib}^2 a_B^2 \propto \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_B} \rightarrow \nu_{vib} \propto m_e^{3/2} m_p^{-1/2}$

→ $\frac{\nu_{vib}}{\nu_{el}} \propto \sqrt{\frac{m_e}{m_p}} \rightarrow \Delta\left(\frac{\nu_{vib}}{\nu_{el}}\right) \propto -\frac{1}{2}\left(\frac{\nu_{vib}}{\nu_{el}}\right) \times \frac{\Delta(m_p/m_e)}{m_p/m_e} \propto -\frac{\Delta\beta}{\beta}$

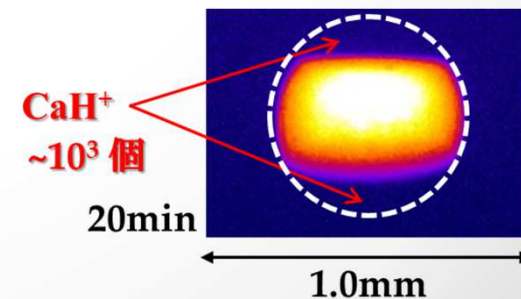
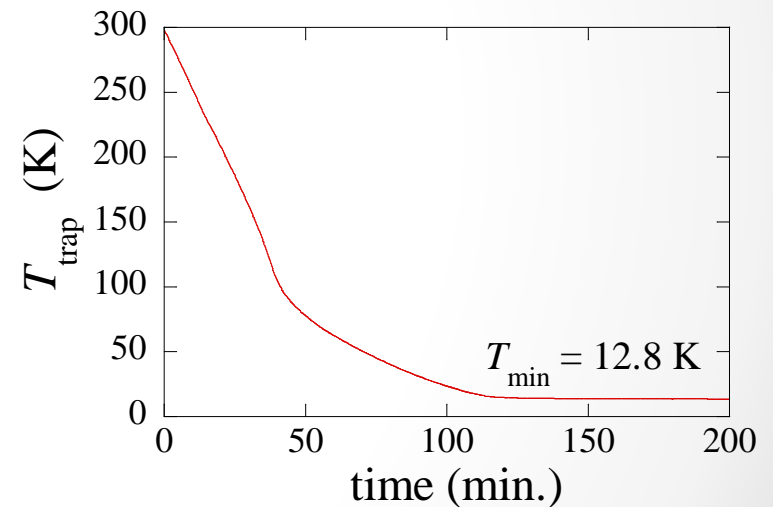
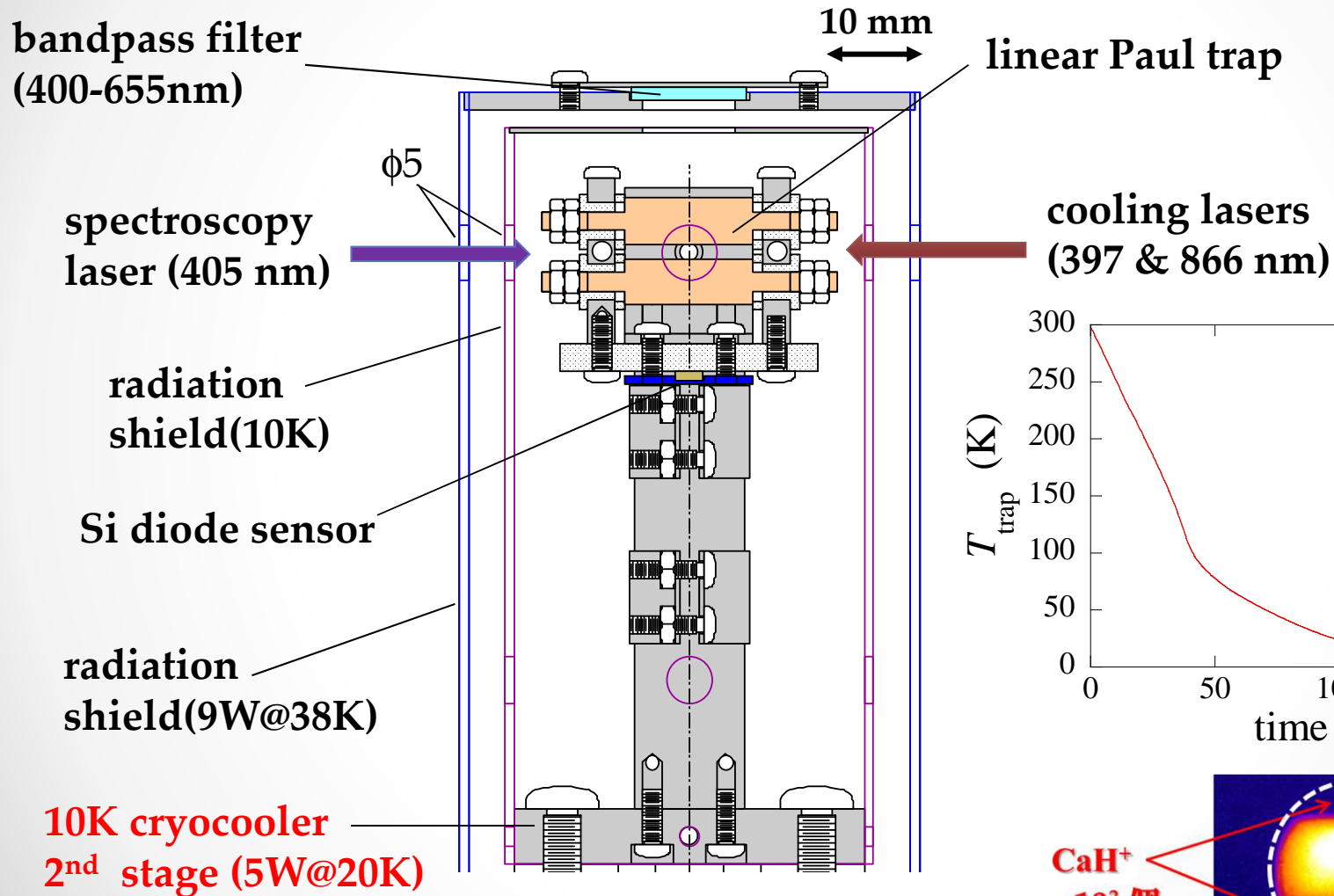
- サイドバンド冷却で重心運動の振動基底状態を生成
- 分子振動遷移の励起により Ca^+ の振動準位が変化



- $(J, v) = (0, 0) \rightarrow (0, 1)$ 遷移が起きたかどうかを、 Ca^+ のLIFにより高感度に検出($\lambda = 6.94 \mu\text{m}$)
- $(0, 0)$: LIF ON → 非共鳴
- $(0, 1)$: LIF OFF → 共鳴
- 光時計遷移と比をとる

$\delta\nu/\nu \sim 10^{-16}$

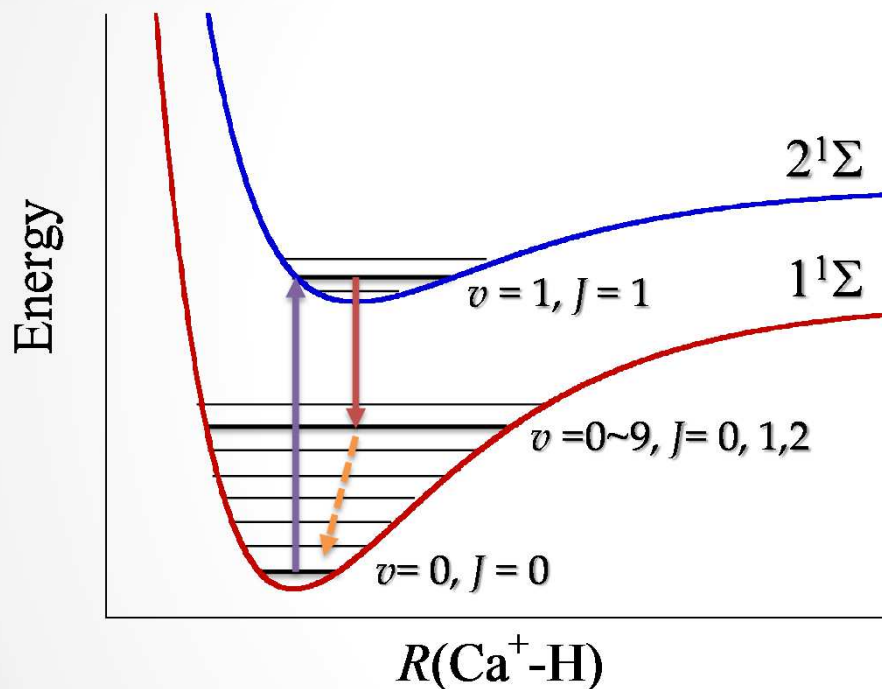
【Cryogenic Linear Paul trap】



イオンラップ電極を12.8 Kに冷却し、CaH⁺の回転基底状態を生成

【Laser spectroscopy of CaH⁺】

■ Electronic transitions in CaH⁺



Einstein A [kHz]	
1 ¹ Σ	2 ¹ Σ
$v'' \downarrow v' \rightarrow$	1
0	523.2
1	1048.7
2	606.1
3	14.6
4	323.5
5	917.2
6	907.2
7	466.8
8	129.0
9	16.2
10	0.4

吸収
発光

Emission λ[nm]	
1 ¹ Σ	2 ¹ Σ
$v'' \downarrow v' \rightarrow$	1
0	405.3
1	430.5
2	458.3
3	488.9
4	522.7
5	560.0
6	601.2
7	646.8
8	696.9
9	751.9
10	811.8

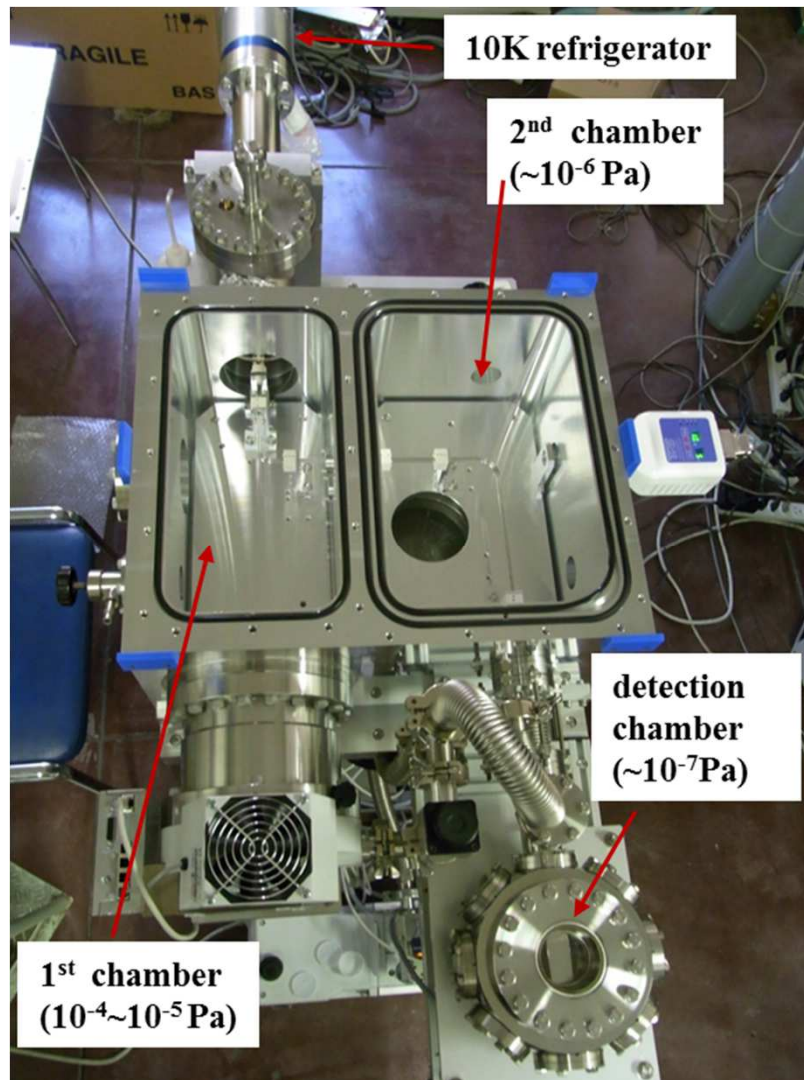
吸収
発光

※M. Abe *et al.*, J. Phys. B43, 245102 (2010);
CPL521, 31 (2012).

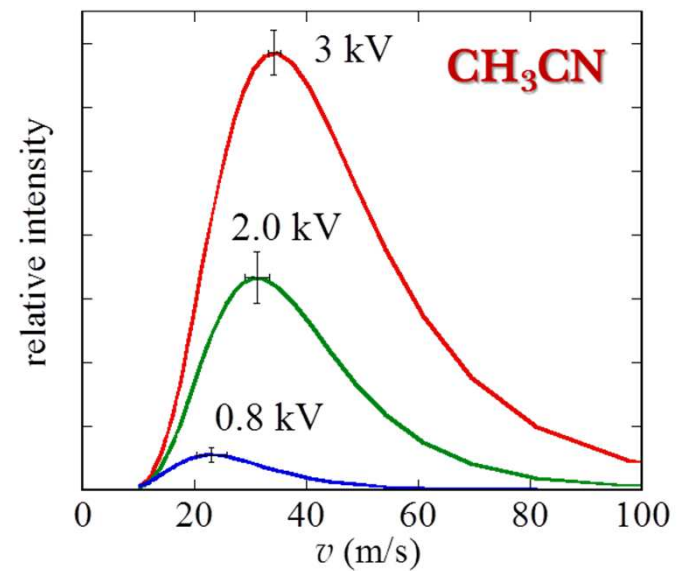
- 励起: 405 nm レーザー (紫)
- LIF観測: 430~752nm
- パルス照射によるLIF観測

環境温度12.8KでCaH⁺イオン
を生成し、1時間以上トラップ
→ $v=0, J=0$: 約55%を達成?

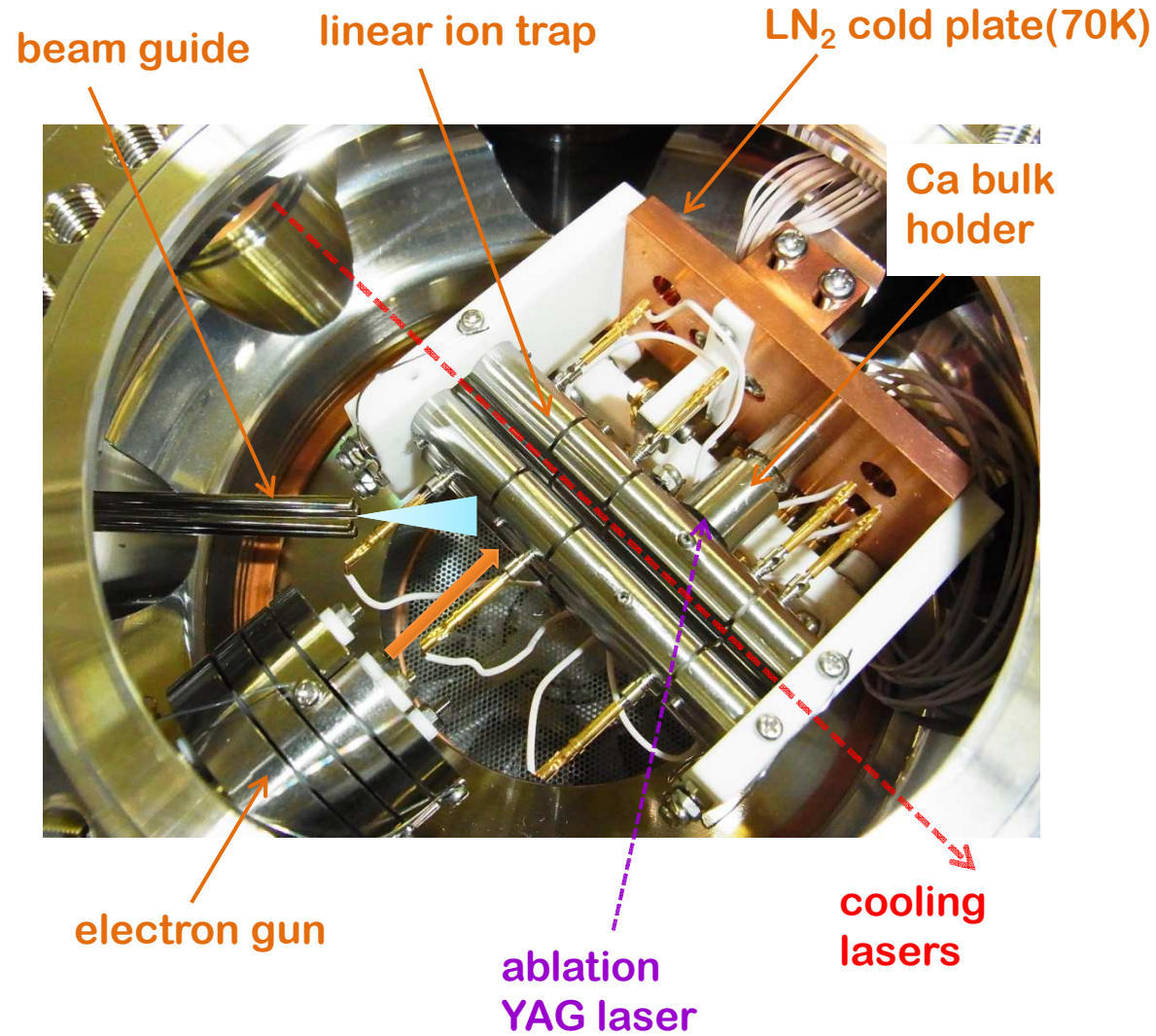
Stark Velocity filter@Sophia



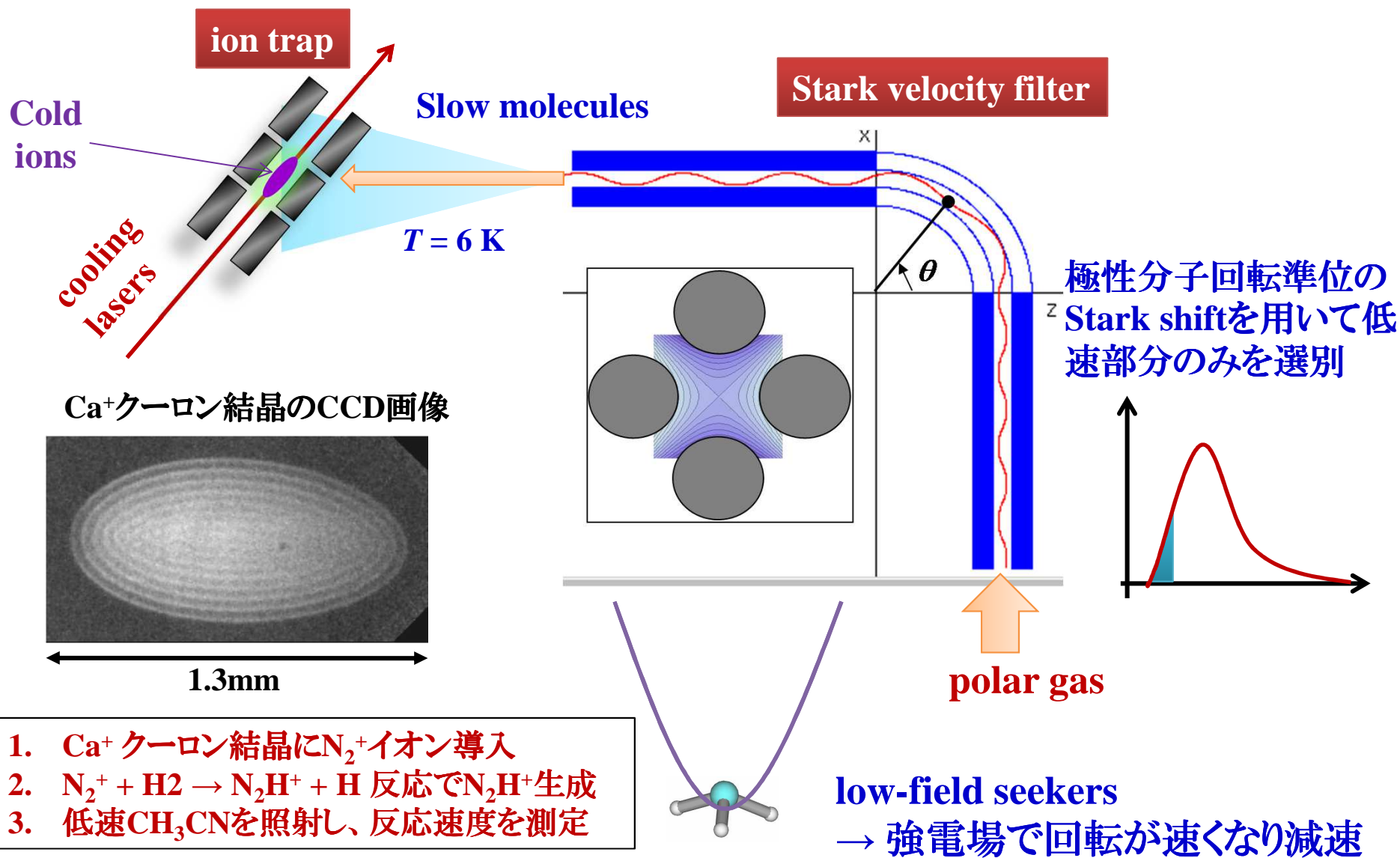
飛行時間測定による低速CH₃CNの速度分布



実験装置(主要部)



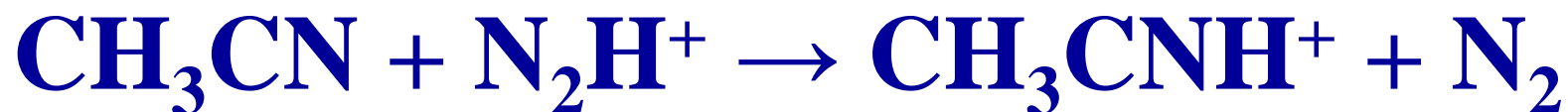
イオン - 極性分子反応の実験室測定



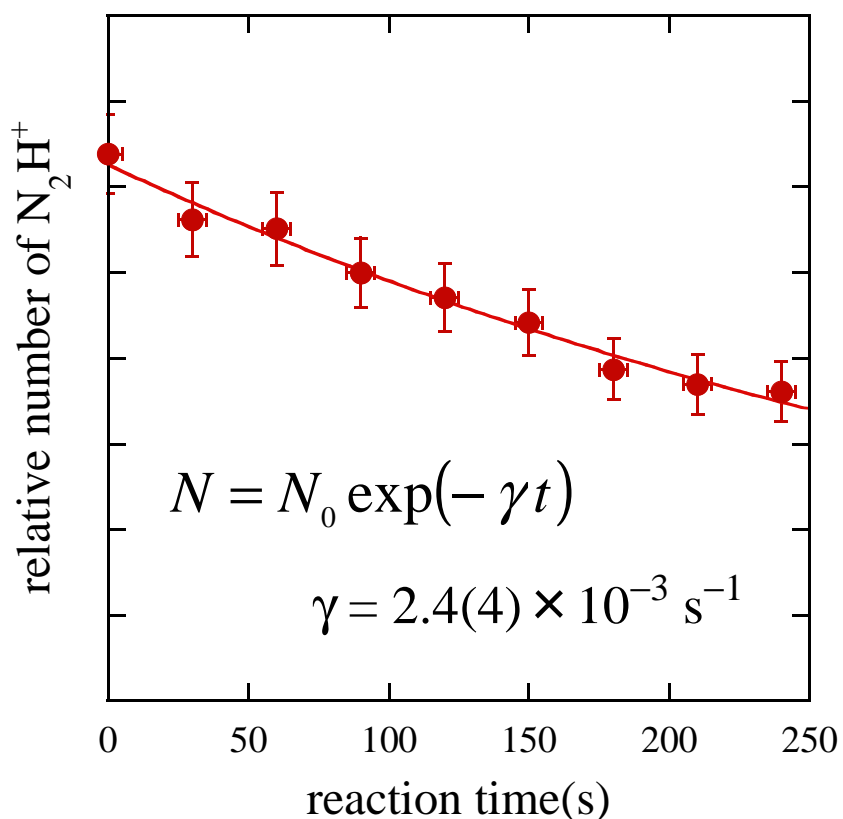
1. Ca⁺ クーロン結晶に N₂⁺ イオン導入
2. N₂⁺ + H₂ → N₂H⁺ + H 反応で N₂H⁺ 生成
3. 低速 CH₃CN を照射し、反応速度を測定



Reaction-rate constant of



■ Example of decay curve



■ Average reaction rate

$$\gamma = 2.0(2) \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

(9 measurements)

■ Reaction rate constant ($\sim 3 \text{ K}$)

$$k_{\text{exp}} = 1.7(6) \times 10^{-8} \text{ (cm}^3 \text{ /s)}$$

K. Okada *et al.*, PRA87, 043427 (2013)

大谷先生の教え(と勝手に思っていること)

- “ごつい”研究をしなさい
- 研究者仲間(年齢問わず)をたくさん持ちなさい
- 多くの人(学生、研究者)と協力して何かを成し遂げなさい
- (研究のみに囚われない)広い視野をもちなさい

最後に...

<謝辞>

研究者となる機会を与えて頂いた大谷俊介先生に感謝するとともに、急逝された先生のご冥福をお祈り申し上げます。

ご清聴ありがとうございました。