

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月11日現在

機関番号： 11301

研究種目： 挑戦的萌芽研究

研究期間： 2011～2012

課題番号： 23654074

研究課題名（和文） 重イオン用固体アルゴンゼノン全エネルギー検出器の開発

研究課題名（英文） Development of solid Ar-Xe total energy detector for heavy ion

研究代表者

小林 俊雄 (KOBAYASHI TOSHIO)

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30186754

研究成果の概要（和文）：

エネルギー約300MeV/u、質量数約100の重RIビームを用いた不変質量法による実験では、同じエネルギー／質量領域の入射核破砕片の質量分離が必要不可欠である。この為には約0.1%の分解能を持つ全エネルギー検出器が必要であり、アルゴンにゼノンを少量混合した液体又は固体検出器を開発した。液体窒素を用いた冷却により、単体ガス又は混合ガスを液化／固化する試作機を製作し測定を行った。アルゴン単体の液化と部分的な固化の段階まで進んだ。

研究成果の概要（英文）：

For invariant mass spectroscopy using heavy RI beams of about 300 MeV/u and mass 100, mass identification of the projectile fragment in the same energy/mass region. For this purpose, total energy detector with about 0.1% resolution is required. We have developed liquid/solid detector made of Ar with a small amount of Xe which are cooled by liquid nitrogen. Liquidation of Ar and partial solidification of Ar have been observed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：粒子識別、全エネルギー検出器

1. 研究開始当初の背景

エネルギー領域300 MeV/uのRIビームを用いた原子核反応により不安定核の原子核構造を調べる場合、標的での核反応から放出される入射核破砕片の粒子識別と4元運動量の測定が必要である。原子核番号と質量数を分離する粒子識別には独立な3個の測定量が必要であり、磁気剛性／エネルギー損失／速度、又は磁気剛性／エネルギー損失／全エネルギーの組み合わせが考えられる。エネルギー250 MeV/u、質量数100の重粒子の質量を 5σ で分離する為には、磁気剛性／速度を測定する場合には夫々磁気剛性2.4 GeV/cで0.14%、速度 $\beta=0.65$ で0.09%のrms分解能が、又磁気剛性／全エネルギーを測定する

場合には磁気剛性2.4 GeV/cで0.06%、全エネルギー25GeVで0.1%のrms分解能が必要である。

前者の場合には、飛行距離を5mとして約25psecの時間分解能が必要になり、1m x 1m程度の有効領域で達成するのは難しい。後者の場合には、NaI(Tl)、CsI(Tl)、CsI pureなどの結晶が考えられる。NaI(Tl)の光を光電子増倍管で測定した場合に約0.2%のエネルギー分解能が得られているが、発光時定数が0.25 μ sと長い為に計数率に制限がある。CsI(Tl)のほぼ同じエネルギー分解能を持つが発光時定数がNaI(Tl)よりも長い為に適さない。CsI pureを用いた場合は、発光時定数が短く高計数率には対応可能であり又放

射線損傷に強い事が知られているが、発光量が少ない為にエネルギー分解能が 0.2-0.3% と悪い欠点がある。悪いエネルギー分解能を補償する為に、全エネルギー検出器の上流に物質を置き、磁気剛性を測定した後にエネルギー損失をさせて全エネルギーの差を増幅する事により約 5σ の質量分離を得た。

数百 MeV/u の RI ビームを供給する加速器施設であるドイツの SIS18 加速器施設 (GSI) の ARADIN/LAND 測定器では $\sigma_A=0.43$ 程度 (2.3σ 分離) しか得られておらず、質量分離には大きな問題がある。日本にある RI Beam Factory に建設された同種の測定装置である SAMURAI では前述の CsI pure を光電子増倍管で読み出し、磁気剛性測定後のエネルギー損失を組み合わせる事により、試作機では 5σ 程度の質量分離が得られ実機を製作中である。しかし原理的に補正可能であるとはいえ 1%/度という大きな温度係数が実際の使用上の問題点である。

2. 研究の目的

上述のように一般的な結晶を用いた全エネルギー測定には色々な短所がある事がわかっている。この研究の目的は、高分解能と高速性に加え良い安定性を持つ全エネルギー検出器の開発の可能性を探ることである。私達は、発光体として結晶ではなく液体又は固体状態の稀ガスの発光に注目した。

液体ゼノンには多くの素粒子実験に用いられている。液化温度は 162K で NaI (Tl) より良い十分な発光量を持ち、発光時定数は 2, 30nsec と短く、発光波長は 175nm の紫外であるが、非常に高価である。液体アルゴンは高エネルギー実験用カロリメータに使用されている。液化温度は 84K、液化発光量は NaI (Tl) なみに充分あり低価格であるが、発光時定数が (6.5)/1100 nsec と長く高計数率には適さず、発光波長が 130nm と Xe より短く PMT には適さない為波長変換剤を併用する。

道家らによる混合稀ガスの基礎研究によると、短波長かつ長時定数の光を出すアルゴンに少量のゼノンを混ぜると、発光量は殆ど変化せず、発光波長がゼノンと同じ 175nm に長波長化され、かつ発光時定数もゼノンと同じに高速化される。低価格のアルゴンに少量の高価なゼノンを混合することにより、NaI (Tl) なみの十分な発光量を保ったまま、低価格化、高速化、発光波長の長波長化が行われることになり、目標とする全エネルギー検出器に適している。

液体状態で充分ではあるが、もし混合ガスを固化する事が可能であれば、密度変化なども少ないと考えられ、温度依存性の小さい検出器として安定に動作するであろう。

本研究の目的は、アルゴンに微量のゼノンを加えた混合ガスを液化又は固化させた検

出器を製作し、その発光を測定する事により重イオンの全エネルギーを高精度で測定する事が可能かどうかを検証することである。

3. 研究の方法

ゼノンとアルゴンの液化温度は夫々 162K、84K である為、多くの液体ゼノン検出器や液体アルゴン検出器は、80K、160K の特殊なクライオポンプを用いている。しかし本研究の最終目標は混合ガスの固化である為、高価なクライオポンプは使用せず、液化温度 77K の液体窒素を混合ガスの冷却に用いる事にした。もし必要であればヒータの追加により 77K より高い状態での温度コントロールは可能である。

試験の為には、アルゴン単体又はアルゴン/ゼノン混合ガスを液化又は固化する冷却ブロック、それを液体窒素で冷却する液体窒素リザーバーとコールドフィンガー、冷却ブロックやコールドフィンガーなどを収容する真空箱、ガスの混合と流量調整を行うガス処理系が必要であり、それを製作した。

ガス混合系は、図 1 のように 2 台の Mass Flow Controller (MFC) を使用し、アルゴン/ゼノンを最大流量 1000/100 cc/min で調節可能である。



図 1 : ガス混合系。MFC と流量コントロールパネル、電源からなる。

単体又は混合ガスを液化/固化する為の冷却ブロックとして、図 2 のように 50mm x 50mm x 10mm 厚の銅板に直径 30mm、深さ 10mm の円柱状の穴をあけ、液化/固化状態変化の観測用に片面にマイラー膜を貼った。マイラー膜は紫外光の観測には適さないが、液化/固化の観測を優先した為に利用した。冷却ブロックにはガス導入用に SUS パイプを溶接し、又常温の真空箱からの熱流入を少なくする為に長さを取りコイル状に巻いてある。

冷却/混合ブロックは真空箱上部の液体

窒素リザーバー底面に接続している銅製のコールドフィンガーにボルトで固定する。

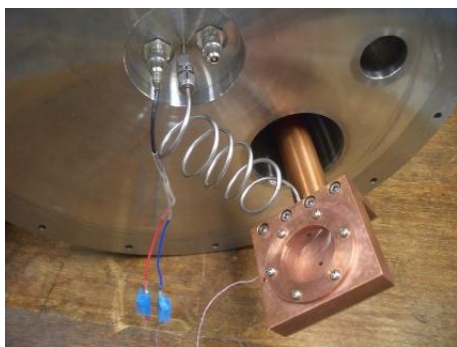


図2：コールドフィンガーに固定した冷却ブロック。マイラー膜は接着後、円盤状リングで固定してある。コイル状のパイプはガス導入パイプ。配線はモニター用温度計。

冷却ブロックは図3に示す真空箱の内部に入れる。真空箱には、光電子増倍管用の延長ダクト／フランジ（現在はガラス窓がついたフランジ）が両側面にあり、又液化／固化観測用のスリット状の窓にはマイラー膜が貼られている。真空箱の上部フランジにはガス導入用パイプ、光電子増倍管の信号取出用コネクターなどがついたフランジが固定されている。



図3：真空箱。この中に冷却ブロックが入っている。右上の円柱状のものは液体窒素リザーバー、手前のマイラーを接着した横長のスリットが観測用窓、真空箱両側のダクトとフランジが光電子増倍管用のフランジ構造。

ガス混合系、冷却系と真空箱、排気用真空ポンプ系を含む全体の模式図を図4に示す。真空箱の真空モニターとしてピラニーゲージを、冷却系中のガス圧モニターとしてクリスタルゲージを使用した。

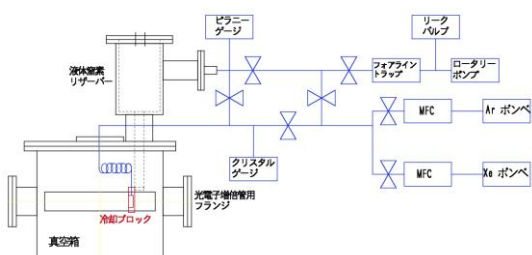


図4：試作機全体の模式図

4. 研究成果

アルゴンガス単体又はアルゴン／ゼノン混合ガスの液化／固化は、全体を真空にひいた後、MFCにより約100:5に混合されたアルゴン／ゼノンガスを冷却ブロックに流し込み、液化／固化させる。

最初に廉価なアルゴンガス単体の液化／固化と試みた。液体窒素リザーバーに液体窒素を入れ冷却ブロックが充分冷えたと思われる30分後くらいに、アルゴンガスを約400cc/minの流量で流し込んだ。この場合約30分で冷却ブロックが一杯になる。

ガスを注入中は冷却ブロック下部からアルゴンがたまっていく。液体窒素温度ではアルゴンは固体になるはずであるが、アルゴンは直接固体になるのではなく、液体の状態で存在する事が観測された。冷却ブロックが充分冷えていない可能性があり、コールドフィンガーと冷却ブロックの熱伝導を色々改善してはみたが、いまの所ガス状態から直接固体になる条件を見いだす事に成功はしていない。

ただ冷却ブロックに液化アルゴンが一杯になった状態で約8時間冷却を続けた場合、図5のように冷却ブロック内部の縁部分に固体らしきものができた事が観測された。

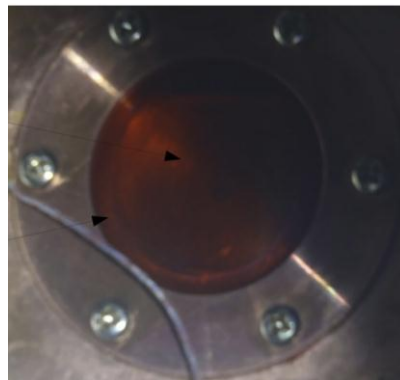


図5：冷却ブロックの周辺に固体らしきものができたのが観測された。中央部分はまだ液体である。

結論として、今回の研究では、単体又は混合ガスを液化／固化する試験機を製作し、アルゴンガス単体を液化し周辺部を部分的に固化する事には成功した。しかし、混合ガスの液化や、そこからの光を観測するまでには至っていない。

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4件）

1. “N=16 spherical shell closure in ^{24}O ”

Physical Review Letters **109** (2012) 022501

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.>

109.022501

査読有

K.Tshoo, Y.Satou, H.Bhang, S.Choi,
T.Nakamura, Y.Kondo, S.Deguchi,
Y.Kawada, N.Kobayashi, Y.Nakayama,
K.N.Tanaka, N.Tanaka, N.Aoi, M.Ishihara,
T.Motobayashi, H.Otsu, H.Sakurai,
S.Takeuchi, Y.Togano, K.Yoneda, Z.H.Li,
F.Delaunay, J.Gibelin, F.M.Marqués,
N.A.Orr, T.Honda, M.Matsushita,
T.Kobayashi, Y.Miyashita, T.Sumikama,
K.Yoshinaga, S.Shimoura, D.Sohler,
T.Zheng, and Z.X.Cao

2. “Scintillating fiber detector for momentum tagging light unstable nuclei at intermediate energies”
Nuclear Instruments and methods in physics research **A670** (2012) 25
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.12.029>

査読有

Y.Matsuda, T.Kobayashi, M.Itoh, K.Ozeki,
H.Sakaguchi, J.Zenihiro, Y.Iwao, H.Otsu,
H.Takeda, and S.Terashima

3. “ $^{14}\text{Be}(p,n)^{14}\text{B}$ reaction at 69 MeV in inverse kinematics”
Physics Letters **B697** (2011) 459
<http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2011.02.045>

査読有

Y.Satou, T.Nakamura, Y.Kondo, N.Matsui,
Y.Hashimoto, T.Nakabayashi, T.Okumura,
M.Shinohara, N.Fukuda, T.Sugimoto,
H.Otsu, Y.Togano, T.Motobayashi,
H.Sakurai, Y.Yanagisawa, N.Aoi,
S.Takeuchi, T.Gomi, M.Ishihara, S.Kawai,
H.J.Ong, T.K.Onishi, S.Shimoura,
M.Tamaki, T.Kobayashi, Y.Matsuda, N.Endo,
and M.Kitayama

4. “Large, thin solid hydrogen target using para-H₂”
Nuclear instruments and methods in physics research **A643** (2011) 6
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.04.017>

査読有

Y.Matsuda, H.Sakaguchi, J.Zenihiro,
S.Ishimoto, S.Suzuki, H.Otsu, T.Ohnishi,
H.Takeda, K.Ozeki, K.Tanaka, S.Terashima,
Y.Maeda, T.Kobayashi, A.Koreeda, and
K.Kamei

[学会発表] (計 2 件)

1. T. Kobayashi

“Status of Samurai spectrometer at RIBF”
The 8th China- Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJJNPS2012), 15-Oct-2012 ~

19-Oct-2012, Beijing, China

2. T. Kobayashi

“SAMURAI Spectrometer for RI Beam Experiments”
The 16th IUPAP International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to Their Applications (EMIS2012), 2-Dec-2012 ~ 7-Dec-2012, Matsue, Japan

6. 研究組織

- (1) 研究代表者

小林 俊雄 (KOBAYASHI TOSHIO)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：30186754

- (2) 研究分担者

()

研究者番号：

- (3) 連携研究者

()

研究者番号：