

Belle II 実験のための光検出器 HAPD を用いた ARICH 検出器性能評価

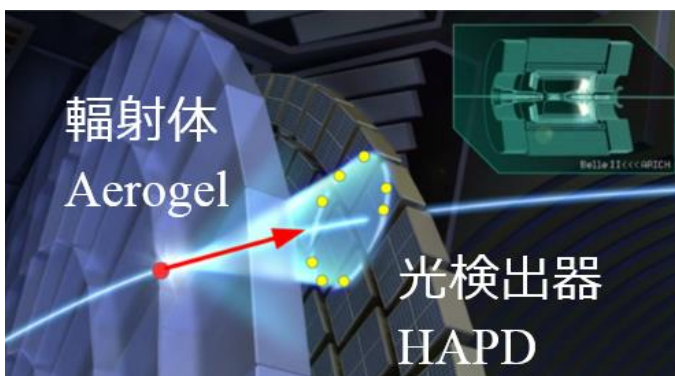
北村 勇人（素粒子物理学教室）

Belle II 実験は標準理論を越えた新物理探索を目的とする素粒子物理学実験である。高エネルギー加速器研究機構 KEK の SuperKEKB 加速器を用いて電子・陽電子対をそれぞれ 7GeV/c と 4GeV/c まで加速し、衝突により B・反 B 中間子対を大量に生成する。それらが崩壊して出てくる素粒子を Belle II 検出器によって精密測定し、B 中間子の崩壊過程や崩壊時間を測定する。崩壊過程の測定では崩壊後の粒子識別が非常に重要であり、特に荷電 K 中間子と荷電 π 中間子は様々な物理解析において精度の高い識別が要求されており、実験の精度に大きく影響する。

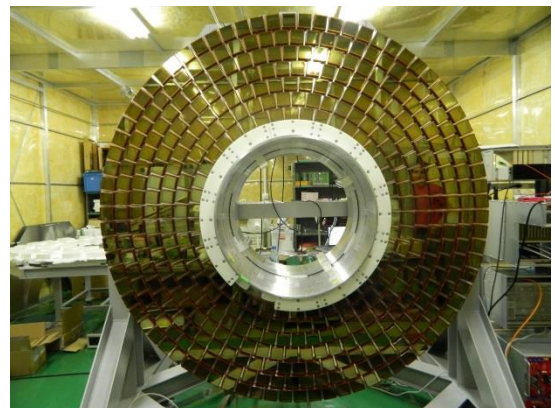
ARICH 検出器は Belle II 検出器エンドキャップ部において K/ π 識別を担うリングイメージ型のチェレンコフ検出器である。ARICH 検出器は輻射体シリカエアロゲルと光検出器 HAPD の 2 層から構成されている。荷電粒子が輻射体を通過した際に粒子の種類ごとに定まった角度で放射されるチェレンコフ光を光検出器により精密に測定し、その位置情報からチェレンコフ光放射角度を算出し、粒子の種類を同定する。したがって、ARICH 検出器の粒子識別ではチェレンコフ角度分解能が識別性能を示す一つの指標となる。Belle II 実験からの要求は運動量 0.5~3.5GeV/c において 4σ の精度で K/ π 識別をすることであり、これから要求される角度分解能は 7.5mrad 以上である。本研究では 2018 年度における検出器の調整などを目的として行われた Phase2 運転、および 2019 年度から開始された物理解析用データ取得を目的とした Phase3 運転で得られたビーム衝突データを用いて、チェレンコフ角度分解能の評価を行った。

Bhabha イベント ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$) および μ 対生成イベント ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$) によるチェレンコフ角度分布を作成し、分布からチェレンコフ角度分解能を算出する。Phase2 では検出器の温度上昇のために部分的にしか稼働していなかったが、Phase3 以降は全領域で稼働している。そのため、本研究が Belle II 実験本番のセットアップで行われた ARICH 検出器のはじめての性能評価である。Phase3 運転時現在の ARICH 検出器のチェレンコフ角度分解能は、Bhabha イベントにおいて $4.7 \pm 0.1 \text{ mrad}$ 、 μ 対生成イベントにおいて $4.6 \pm 0.1 \text{ mrad}$ であり、要求性能を満たしていることが確認された。

一方で Phase2 では検出光子数がシミュレーションと比較して $27.7 \pm 2.7\%$ 少なかった。その要因に対して、量子効率の光検出器 HAPD 光電面に対する光子入射角度依存性と光検出器 HAPD 各チャンネルの 1 光子検出効率の 2 つの観点から評価を行った。評価結果から Phase2 における検出光子数の減少は後者が要因であり、Phase2 における 1 光子検出効率は $76.5 \pm 4.6\%$ であった。Phase3 では閾値電圧の設定変更などにより最適化され、Phase2 よりも検出光子数が増えた。Phase3 運転時現在における 1 光子検出効率について再び評価を行い、検出効率 $91.6 \pm 4.7\%$ を得た。



ARICH 検出器の光子検出のイメージ図



光検出器 HAPD

低エネルギー領域でのニュートリノと反ニュートリノ反応による二次粒子の解析

小坂井悠介（素粒子物理学教室）

素粒子は、自然や物質を構成している最小の粒子のことでその種類はいくつか存在している。解明されていないことが多く、素粒子を理解することで宇宙についての解明につながると考えられている。素粒子の一つであるニュートリノはレプトンの一種で電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの三種類存在しており、さらにそれぞれの反粒子も存在する。素粒子の反応や性質を示す標準理論ではニュートリノには質量がないことが示されていた。しかし、今まで様々な研究が行われてきた結果、ニュートリノ振動の発見によって、質量があることが解明された。例えば、**OPERA** 実験では、ミューニュートリノからタウニュートリノに変わるニュートリノ振動による現象を **10** 例発見されている。ニュートリノは物質と非常に相互作用がしにくく、検出が困難であるため、その性質はまだ解明されていないところがある。

ニュートリノを直接検出することは難しいので、存在の有無を確かめる方法として、物質と反応した時に出てくる二次粒子について着目した。二次粒子をたどっていくことで、反応が起こったかどうかを確かめることができるからである。そのために、高い空間分解能が必要である。ニュートリノによる反応から出てくる二次粒子の探索を行うため、本研究では検出器としてサブミクロンの空間分解能をもつ原子核乾板を用いている。**J-PARC** から低エネルギー(約 **1Gev**)のニュートリノ及び反ニュートリノビームをそれぞれ期間を別にして鉄板と原子核乾板を交互に積載された検出器である **ECC** に照射した。鉄板は反応数を稼ぐために用いられている。**ECC** は **4** つの区分に分かれていて、用いた乾板は **25cm×25cm** でそれぞれの区分に **69** 枚積載している。二種類のビーム照射の時期と一致させるために時間情報を与える **Shifter** を **ECC** の後ろに設置している。反応による二次粒子の内、透過性の高い μ 粒子の探索を行い、飛跡をたどっていくことで反応が起こった場所を特定している。その際、外部から入ってくる宇宙線などのバックグラウンドになる粒子と区別するために、**ED** チェック及びマニュアルチェックを行った。**ED** チェックでは、反応点の周りのトラックを収集し、バックグラウンドとなり得る **thin** トラックの除去を行っている。マニュアルチェックは各反応について二次粒子を **FTS** を用いて、確認を行うことで反応とは関係のない粒子を除去している。現在、ニュートリノ反応によるマニュアルチェックは完了し、反ニュートリノ反応によるマニュアルチェックを行った。

超微粒子原子核乾板 NIT における AgBr(I) 結晶の飛跡形成のエネルギー閾値評価 佐伯加奈（素粒子物理学教室）

原子核乾板とは、AgBr(I)結晶がゼラチン溶液中にランダムに分布している乳剤を、支持体に塗布した荷電粒子の飛跡検出器である。荷電粒子が原子核乾板に入射すると、そのエネルギーを吸収して励起された電子が自由電子として振舞い、銀原子とハロゲン原子が形成される。この過程が繰り返されることで、感光中心である銀原子の数が増えて現像を引き起こす潜像核へと成長する。

潜像形成効率とは、荷電粒子が貫通した結晶数のうち潜像形成が行われて現像された結晶数の割合のことで、原子核乾板の基礎特性を示す値であり、結晶 1 個レベルの飛跡シミュレーションに組み込むことで、検出器の性能を見積もる際の指針となる値である。

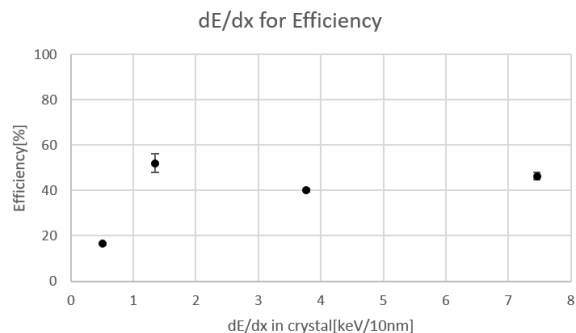
今まで、荷電粒子による電離損失によって数百～数千個／結晶(直径約 70nm)の e-h 対生成が期待される状況下で、結晶 1 個に対する潜像形成効率の評価は行なわれてこなかった。それは、原子核乾板は高い分解能を持つ故に、分解能が約 200nm の光学系で現像銀粒子数(以下 GD)を正確に測定するのが、困難だったためである。本研究では、乳剤に乳剤製造時に使われる PVA を含むゼラチン溶液を添加し、希釈することで、結晶間距離を広げて GD を定量的に計測することを試みた。

結晶サイズ約 60nm の超微粒子原子核乾板 NIT にエネルギー損失量の異なる(0.6～8.6[keV/10nm])C イオン(@放射線医学総合研究所重粒子がん治療装置 HIMAC)、Ar イオン(@HIMAC)、²⁴¹Am α 線(@名古屋大学)、Fe イオン(@HIMAC)を照射し、5℃のメトール・アスコルビン酸現像液に 10 分浸して現像処理を施し、飛跡の GD を落射光学顕微鏡で計測した。また、本研究では未増感・亜硫酸ナトリウムによる塗布後増感の 2 種類の増感方法を施したサンプルを用意し、増感の違いが与える潜像形成効率の影響も評価した。さらに、照射後に数ヶ月冷凍保管したサンプルから潜像退行の評価も行なった。そして、潜像形成効率から飛跡形成に必要なエネルギー閾値を見積もった。

未増感・塗布後増感の潜像形成効率の結果から、 dE/dx に依らず亜硫酸ナトリウムによる増感の効果を確認し、少なくとも 1.7 倍であることがわかった。

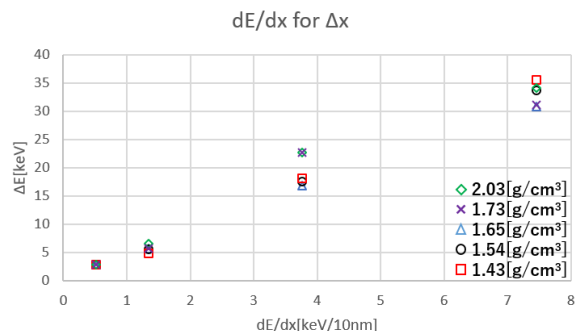
潜像形成効率の結果として、

C(dE/dx [keV/10nm]=0.51) : $16.5^{+0.5}_{-0.7}\%$
 α (dE/dx [keV/10nm]=1.35) : $52.0^{+4.2}_{-4.1}\%$
 Ar(dE/dx [keV/10nm]=3.77) : $40.1^{+0.7}_{-0.6}\%$
 Fe(dE/dx [keV/10nm]=7.46) : $46.4 \pm 1.6\%$
 を得た。



エネルギー閾値の結果として、

C(dE/dx [keV/10nm]=0.51) : 2.8keV
 α (dE/dx [keV/10nm]=1.35) : 5.6keV
 Ar(dE/dx [keV/10nm]=3.77) : 19.5keV
 Fe(dE/dx [keV/10nm]=7.46) : 33.0keV
 を得た。



dE/dx が大きい α が最も潜像形成効率が高くなったことを受け、潜像形成効率が重粒子と線源の違いからなのか、 α の dE/dx でピークを持つのかを確かめるため HIMAC にて He を撃ちこみ検証したい。

SHiP 実験に向けたコンパクトエマルシヨンスペクトロメーターの試験機評価

廣瀬寛士（素粒子物理学教室）

素粒子物理学の標準理論ではニュートリノは質量を持たない粒子として扱われてきた。しかし 1998 年のスーパーカミオカンデ実験にてニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動が発見された。その後 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の観測が試みられるようになったが、 ν_τ の反応で生成される τ は短寿命であるため、直接の検出が難しかった。DONUT 実験や OPERA 実験で ν_τ の反応の観測に成功したが、その数は合わせて 19 個しかなく、 $\bar{\nu}_\tau$ の反応との識別も出来ないため、レプトンの種類の違いは質量の違いのみによるものであることを示すレプトンユニバーサリティの検証は未だできていない。

CERN-SPS の SHiP 実験は未発見の粒子の探索を目標とする実験計画である。また、400GeV/c 陽子ビームを高密度金属標的に照射し、 ν_τ を多く含むビームを生成するので、 ν_τ 反応自体の研究、そして $\bar{\nu}_\tau$ の世界初の識別が可能になると期待されている。そこで重要なのがタウレプトン崩壊娘粒子の電荷符号の識別を可能とするコンパクトエマルシヨンスペクトロメーター (CES) の開発である。CES は低密度支持体と原子核乾板を交互にサンドイッチした構造で、 τ 粒子の崩壊生成物であるハドロンが通過する距離 3 cm の間に、磁場による数 μm の粒子の曲がりを検出することでサジッタ法により電荷符号と運動量を測定することができる。先行研究の原理検証では、KEK PS にて 0.5~2.0 GeV/c のハドロンを 1 T の永久磁石中に設置した CES に垂直照射した結果、乾板の面積 4 cm² において荷電符号識別精度は 7σ 以上であった。SHiP 実験で実際に使用するにはより大面積で、より大きな角度を持った飛跡に対しても検出を可能にするため、原子核乾板を拡大したうえで同様の性能が要求される。

そこで 2017 年に、より本実験に近い状況で照射試験をするために原子核乾板のサイズを 10×12.5 cm² へ拡大した CES スタックを CERN PS において 1T の電磁石中に設置し $\tan\theta = \pm 0.3$ までの角度で 1.0 ~ 10 GeV/c の荷電ハドロンビームを照射して電荷符号判別試験を実施した。その結果、解析可能範囲約 70 cm² で 6 GeV/c までの電荷符号を 2σ 以上の信頼性で識別することができた。しかし、運動量分解能がシミュレーションによる見積もりでは 20% 程度であるのに対し、飛跡データの解析による実測値は 23.6% と完全には一致していない。運動量分解能に影響する主な要因は多重電磁散乱と飛跡検出精度であるが、それ以外にも照射時の原子核乾板自体の歪みやたわみによる影響がある。照射実験時に原子核乾板の相対位置関係が歪みやたわみにより設計時と変化しているならば、運動量分解能を示すサジッタの値に影響する。そこで包括的に解析を行うことで照射試験の結果をまとめ、かつ、ゆがみやたわみ、原子核乾板の傾きが無いところでは運動量分解能がシミュレーションの結果である 20% と一致するのか検証した。また、それに伴い解析手法の改善を行った。