MAIKoアクティブ標的を用いた不安定核実験

大阪大学RCNP 古野 達也

Collaborators

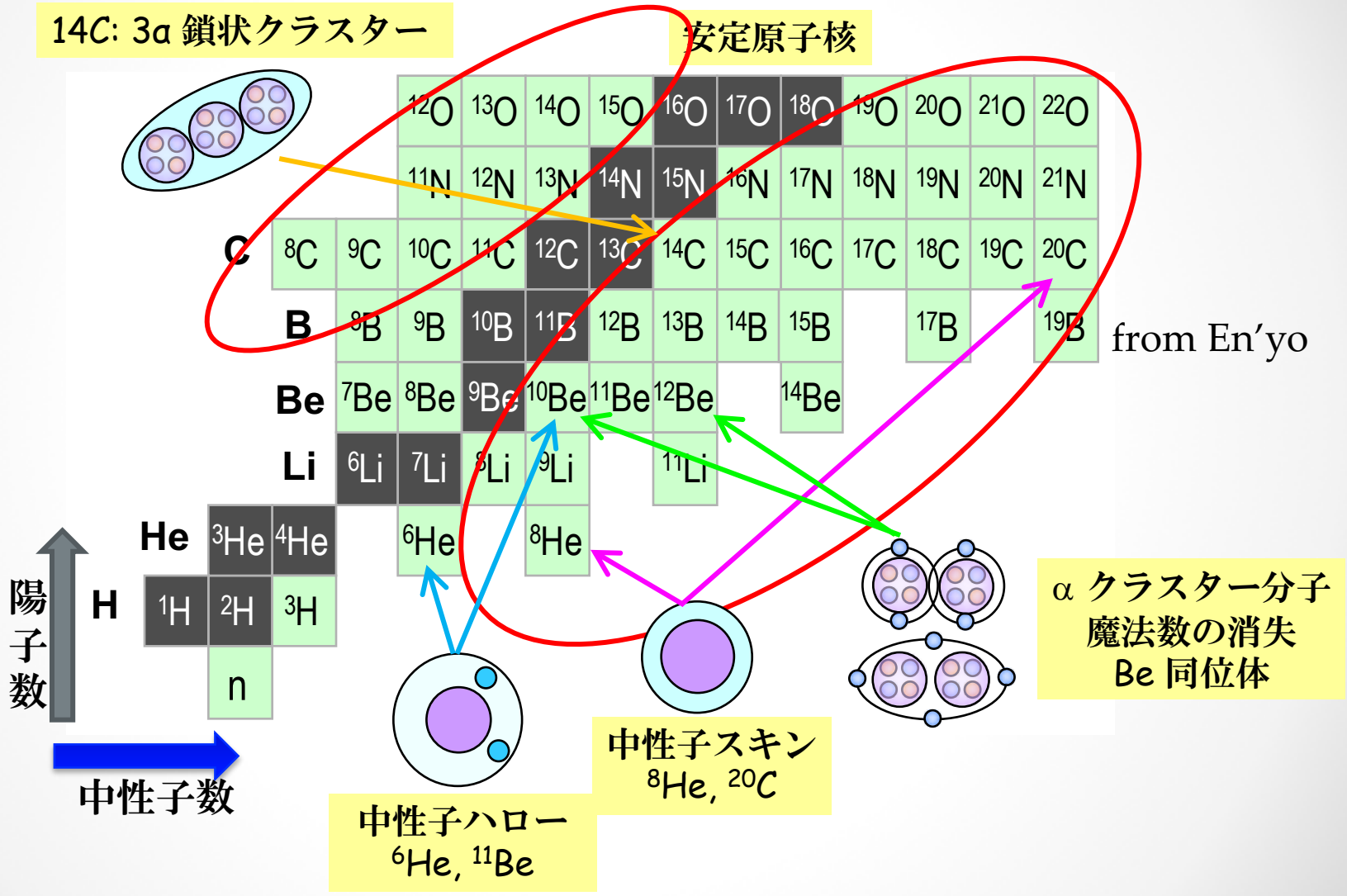
川畑貴裕[A]，足立智[A]，Yassid Ayyad[C]，延與佳子[D]，藤川祐輝[D]，
稲葉健斗[D]，村田求基，Hooi Jin Ong，Michele Sferrazza[E]，
高橋祐羽[D]，武田朋也[D]，谷畑勇夫，Dinh Trong Tran，津村美保[D]

RCNP，[A]阪大理，[B]九大理，[C]FRIB，[D]京大理，[E]Univ. libre de Bruxelles

2019/12/06 MPGD研究会 理研

不安定核物理

RIBF等の次世代加速器の誕生により、不安定核物理が活発化。



不安定核には、安定核には見られなかった原子核の"形"が発現！？

原子核の形を調べるには？

軽い原子核をプローブとしたdirect reactionの測定

- **陽子, ^{4}He 弾性散乱** (p,p), (α,α), …
  原子核の密度分布, スキン・ハロー構造

- **非弾性散乱** (p,p′), (d,d′), (α,α′), …
  励起状態の変形・αクラスター, 遷移強度$B(E2)$, 巨大共鳴, 殻構造

- **荷電交換反応** (p,n), (^{3}He,t), (d,^{3}He), …
  Gamow-Teller **強度**

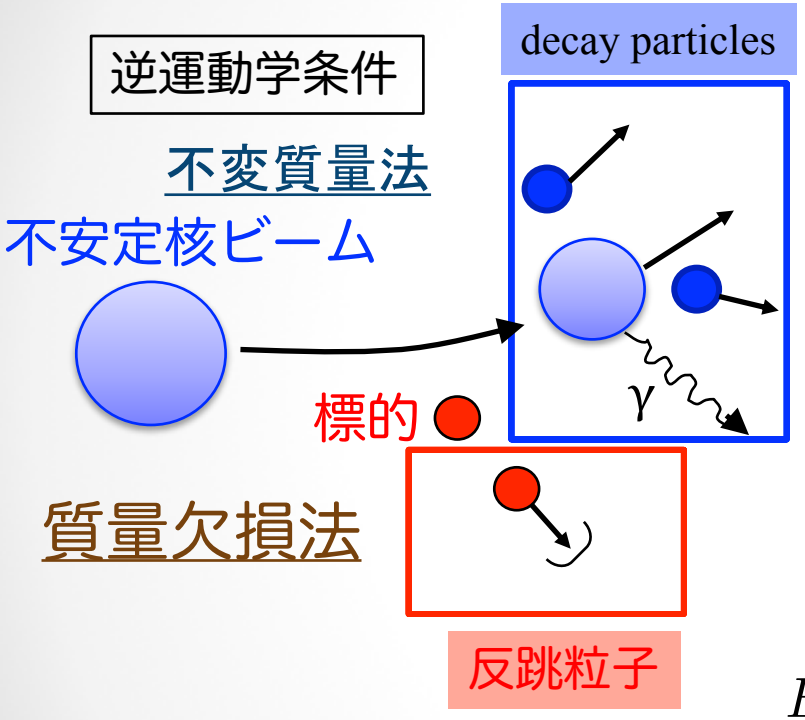
- **核子移行反応** (p,d), (p,t), (p, ^{3}He), (d,p), …
  殻構造, 天体核反応(低エネルギー)

- **ノックアウト反応** (p,2p), (p,pn), (p,p ^{4}He)…
  基底状態の配位・運動量分布, クラスター相関

不安定核をビームとした直接反応の測定を行う必要がある。

不安定核の分光

励起エネルギーを算出する手法は2通り。



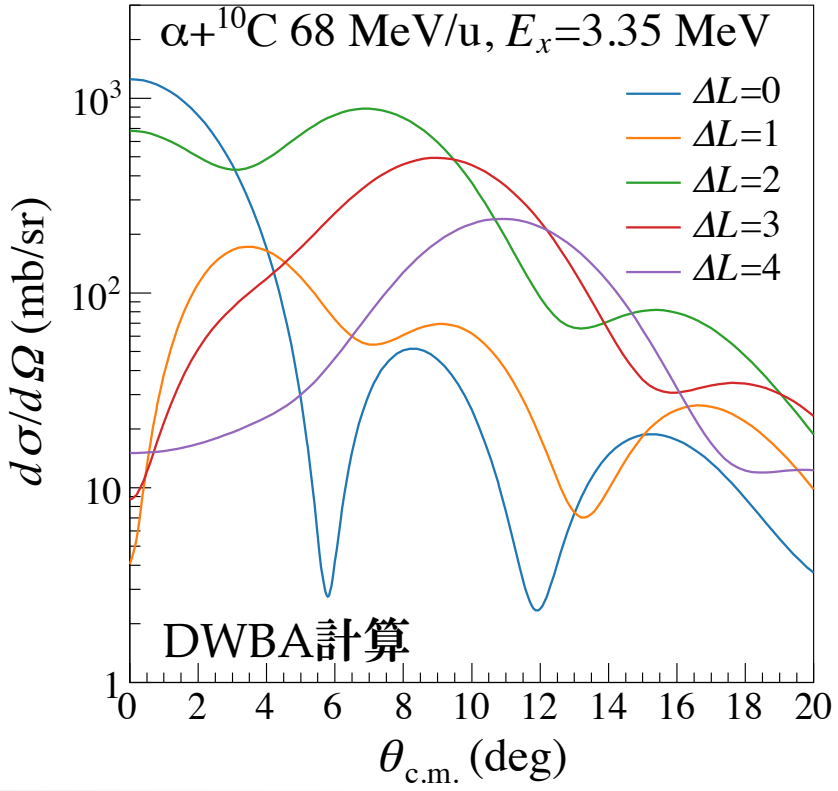
- ◆ 不変質量法
  - ✓ 標的厚い → 高統計の実験が可能
  - ✓ 検出粒子数が多くなるチャンネルでは低効率なので不向き
  - ✓ チャネルによってスペクトルにバイアス
- ◆ 質量欠損法
  - ✓ 検出する粒子が反跳粒子のみ
  - ✓ 全ての励起状態に適用可能

$$E_x = 2\sqrt{\frac{m}{M}E_{\mathrm{beam}}E_\alpha}\cos\theta - \left(1+\frac{m}{M}\right)E_\alpha$$

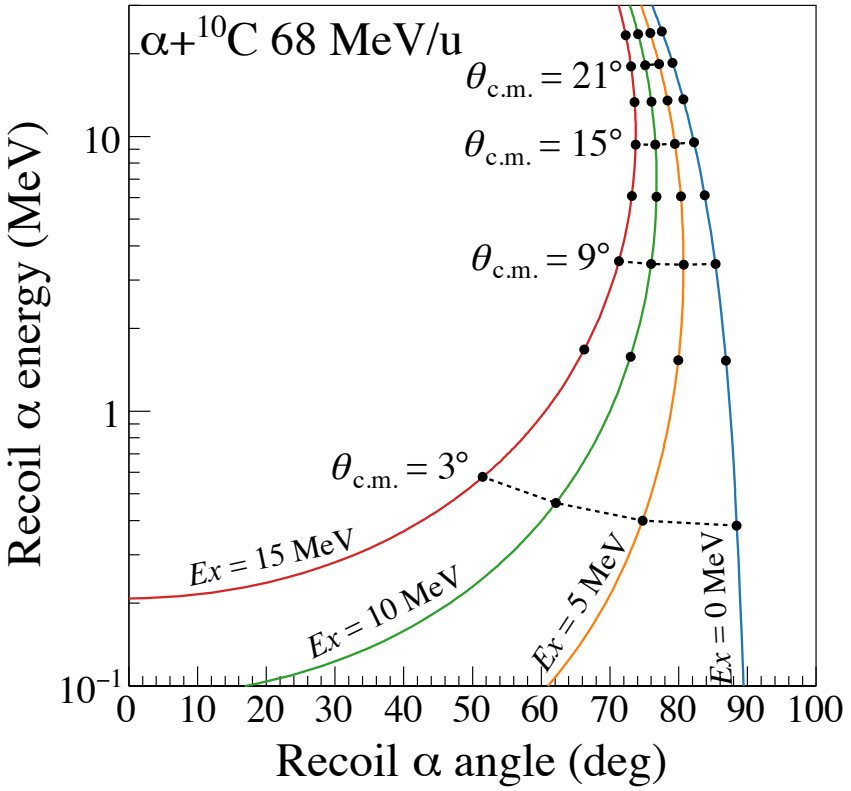
広い励起エネルギー領域での測定には、質量欠損分光が適している。

質量欠損分光の欠点

非弾性散乱の断面積

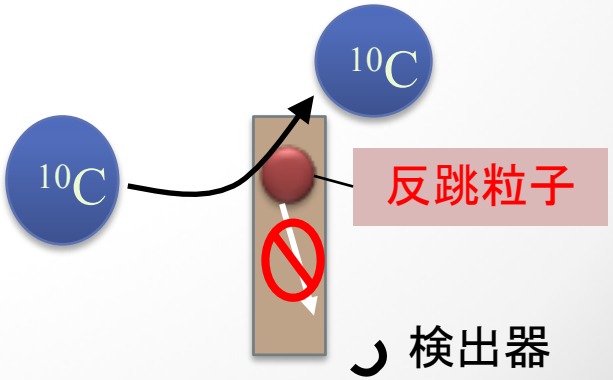


反跳粒子の運動エネルギー



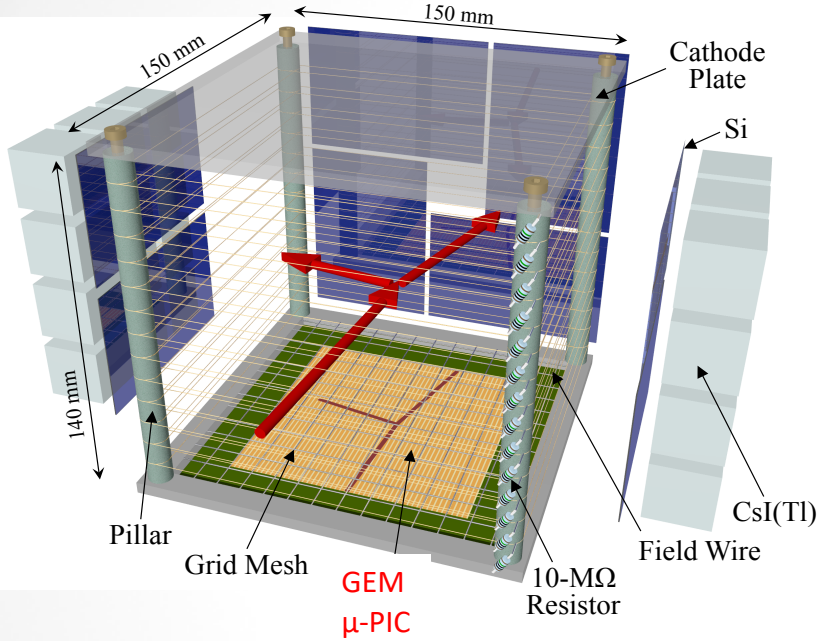
前方角度での測定が重要。

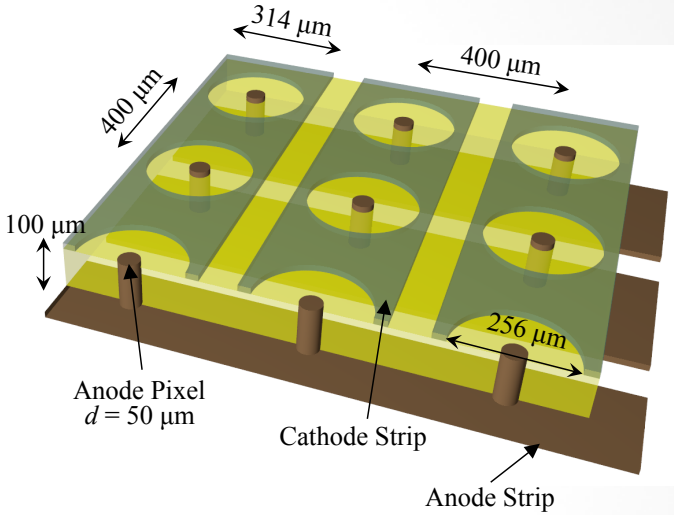
反跳粒子のエネルギーが低い。



MAIKoアクティブ標的

TPCの検出ガス = 散乱の標的





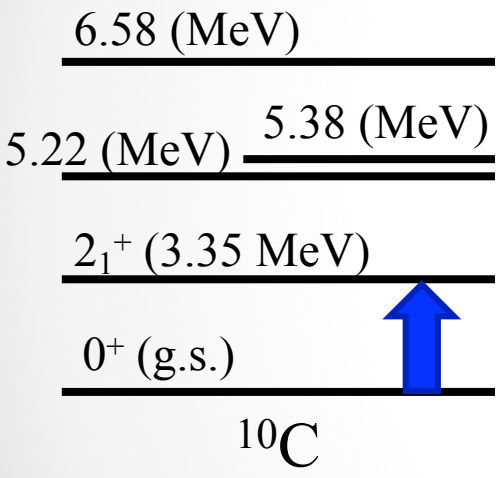
T. Furuno *et al.*, NIM A **908**, 215 (2018).

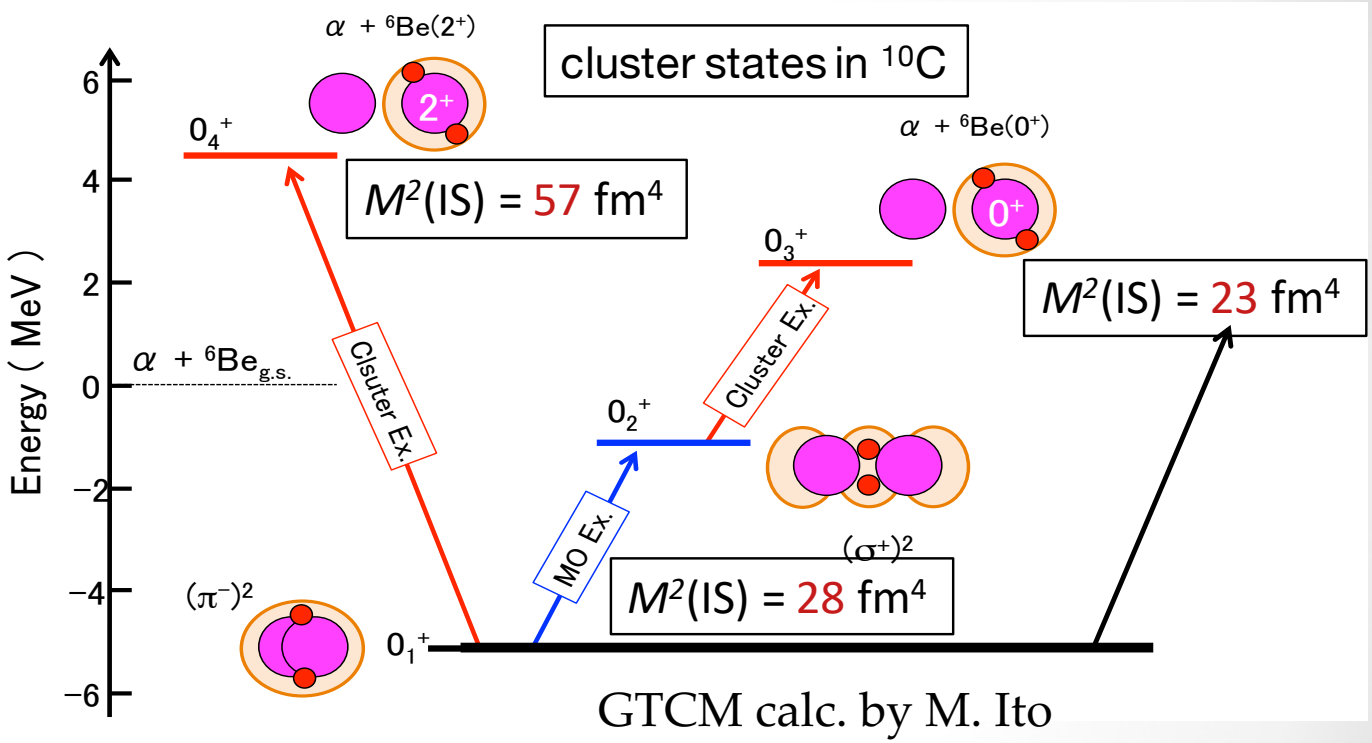
- TPCガス: He + CO_2(4%) @0.5 – 2.0 atm
- μ-PIC + GEMによる増幅
  - μ-PIC (gain~1000): 2次元ストリップ読み出し (400 μm pitch).
    256A+256C = 512 ch.
  - GEM (gain~30): 140 μm pitch, d=70 μm, t=100 μm (thick GEM)
- TPC track → θ_α , ガス中の飛程 / Si+CsI → E_α

First Physics Experiment

^{10}C アルファ非弾性散乱の測定

^{10}C 既知の準位

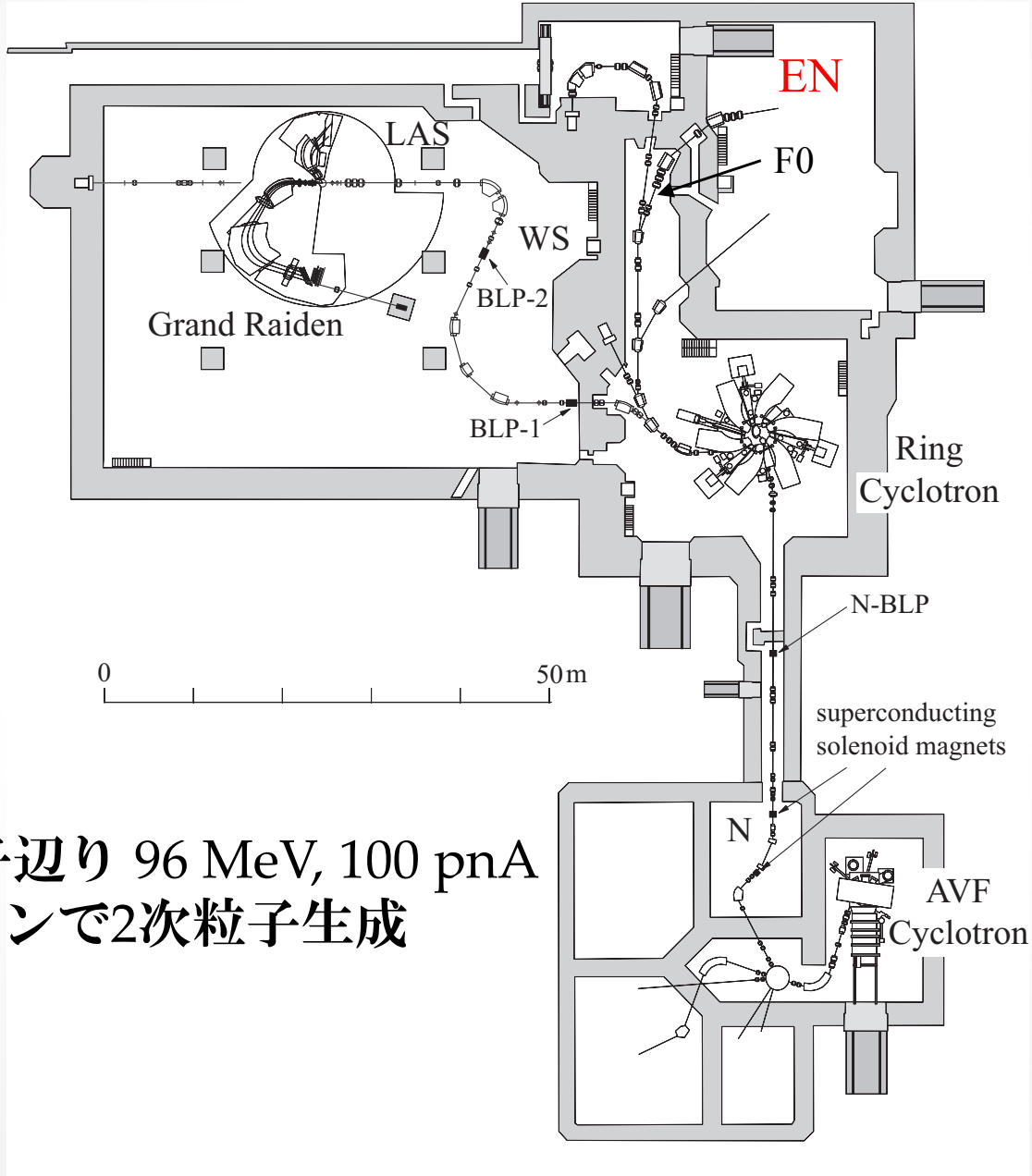




実験の目的

- ✓ 未知の**アルファクラスター構造**の探索
- ✓ 2_1^+状態への散乱断面積の測定 → **殻構造**の解明

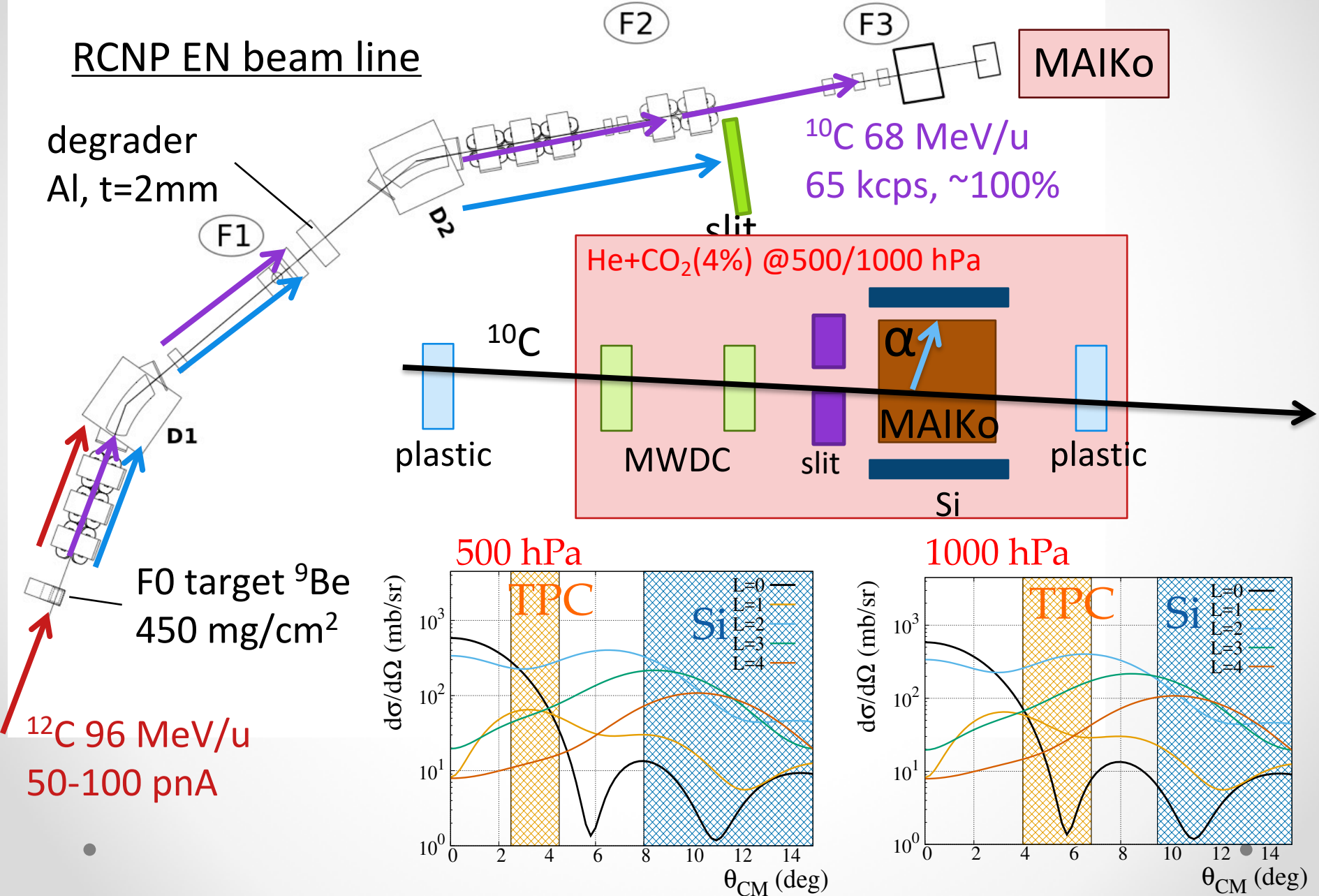
Exp. @大阪大学RCNP



^{12}Cビーム 核子辺り 96 MeV, 100 pnA
ENビームラインで2次粒子生成

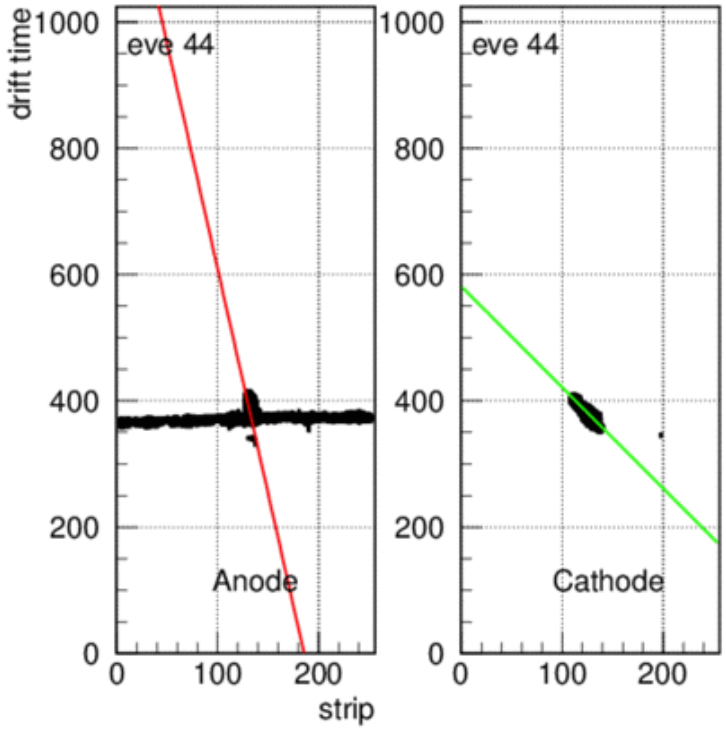
実験セットアップ

RCNP EN beam line

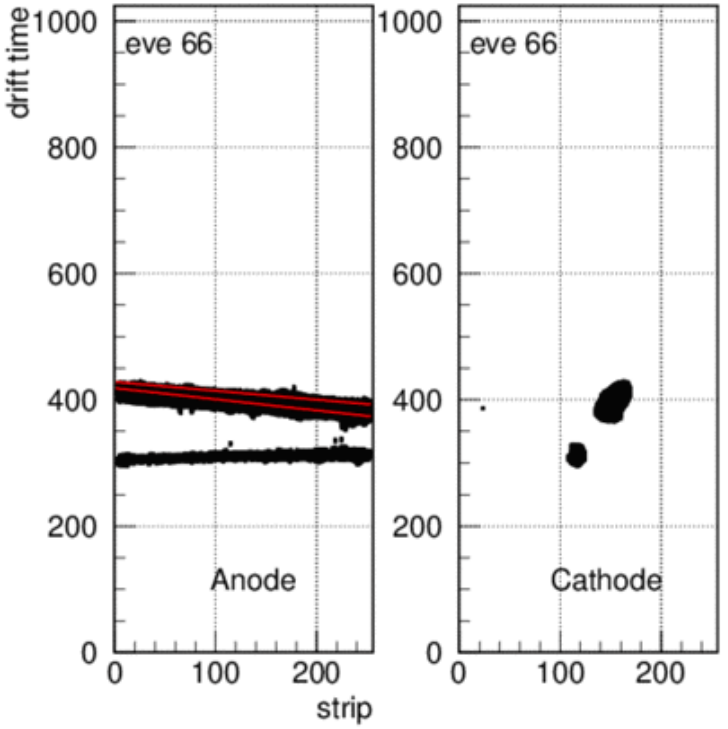


Track Examples

散乱イベント

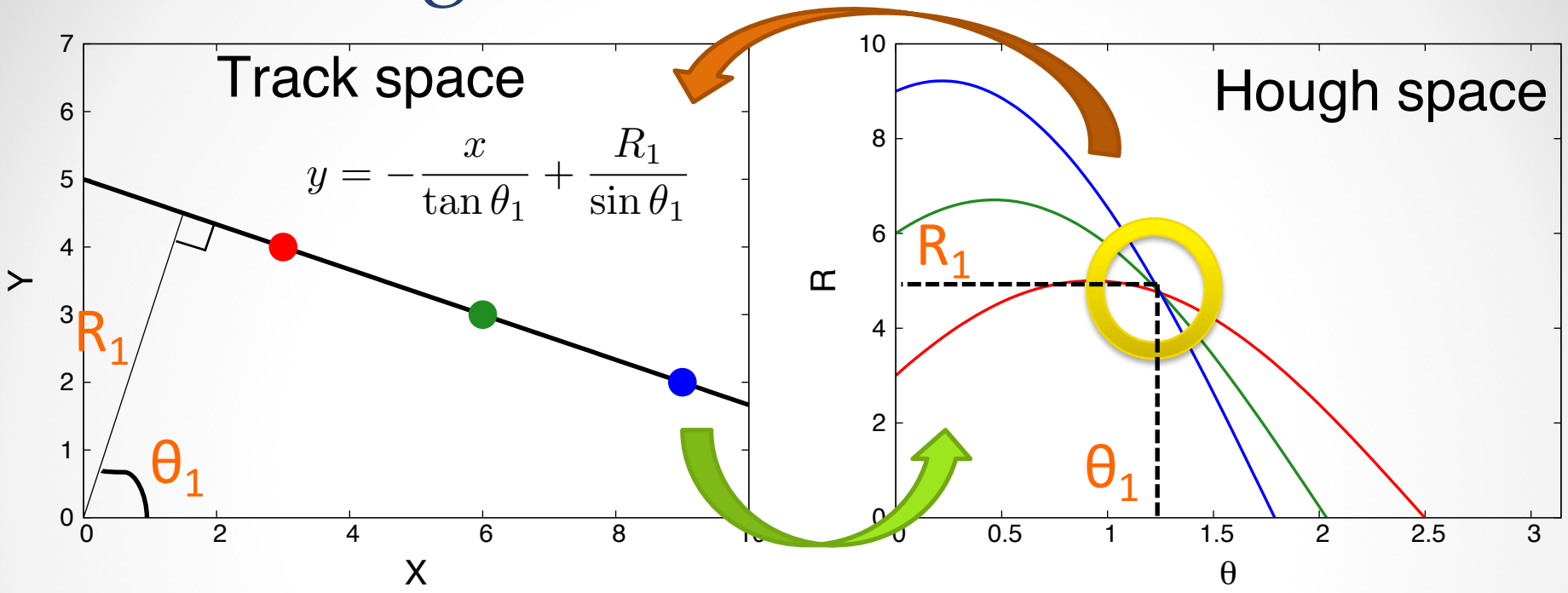


Background



散乱 / Background イベントを区別するためには、
画像から飛跡を抽出する必要がある。

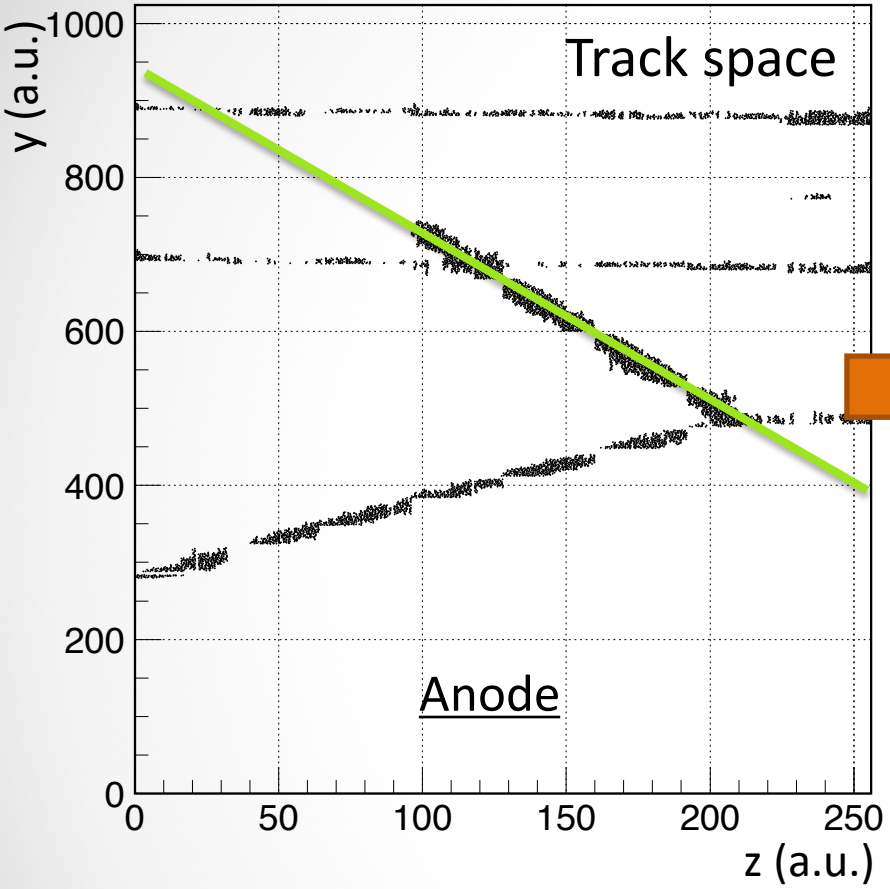
Hough変換による飛跡抽出

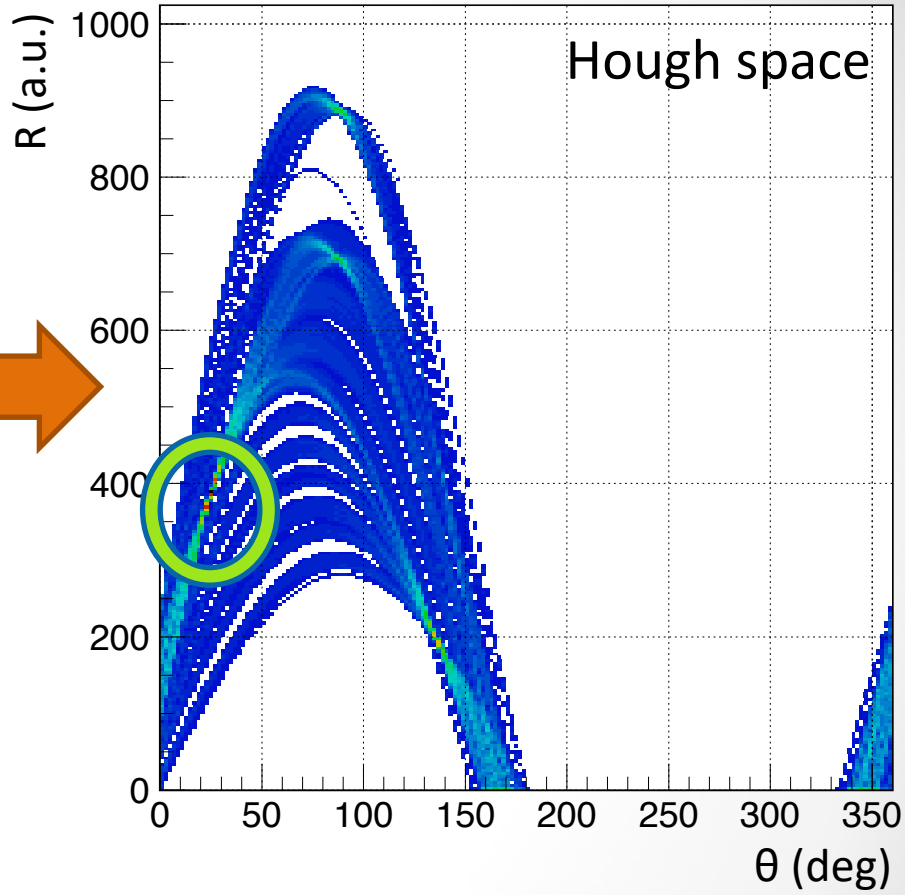


Hough 変換

点 (*x*, *y*)	→	曲線 *r* = *x**cosθ + *y**sinθ
直線	→	1点で交わる
直線探索	→	極大点の探索

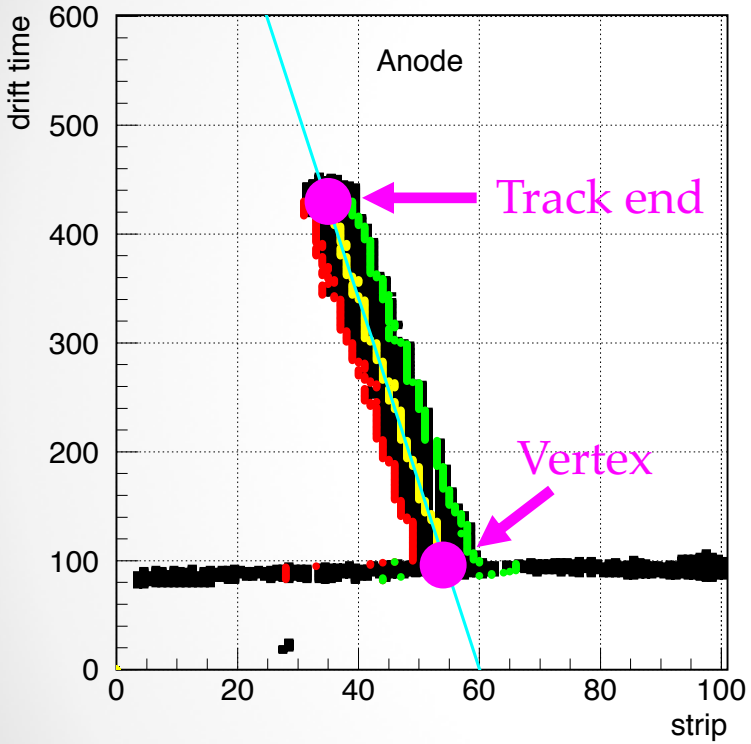
Tracking Algorithm





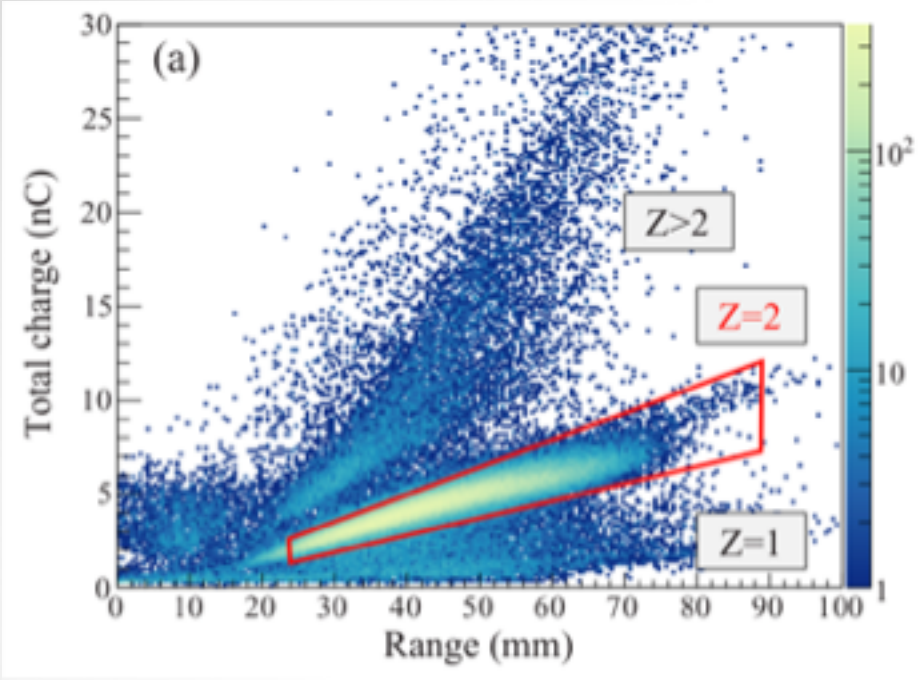
① Hough空間で最大点を見つける→直線の決定
② 発見した直線付近のHitを除去
③ 残ったHitを再度Hough変換し、次の直線を決定
④ ②--③を繰り返す

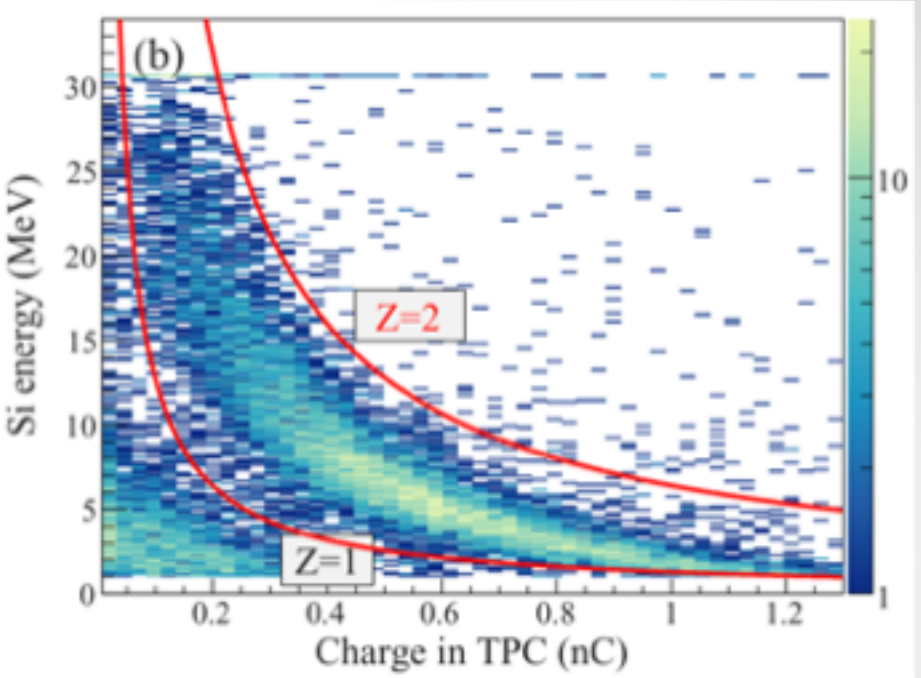
反跳角度・エネルギーの決定



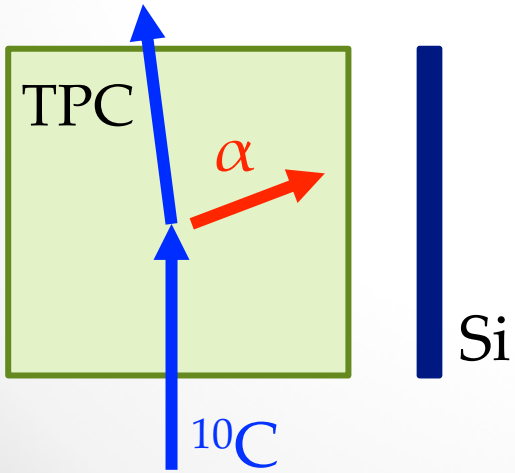
- ✓ Hough変換によって反跳飛跡を抽出
- ✓ 各clockで左右の端点を探索
- ✓ 中点の集合を直線フィット
- ✓ 散乱点・終点を探索
- ✓ 反跳角度・飛程を計算

反跳粒子識別

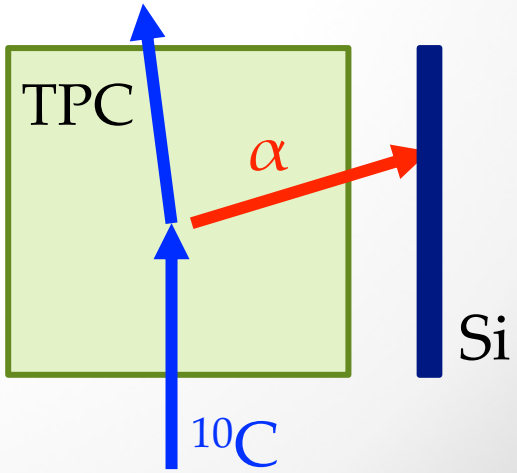




反跳粒子がTPC内で停止

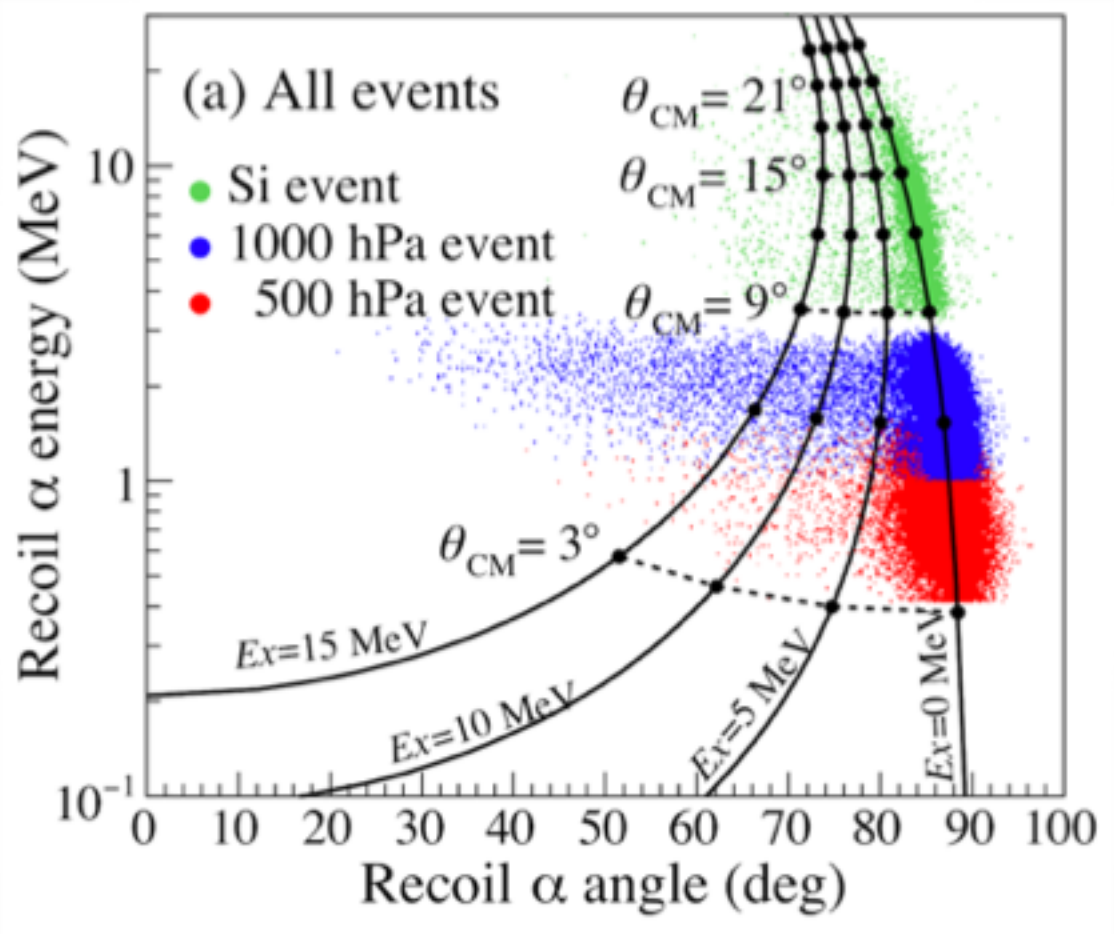


反跳粒子がSiにhit



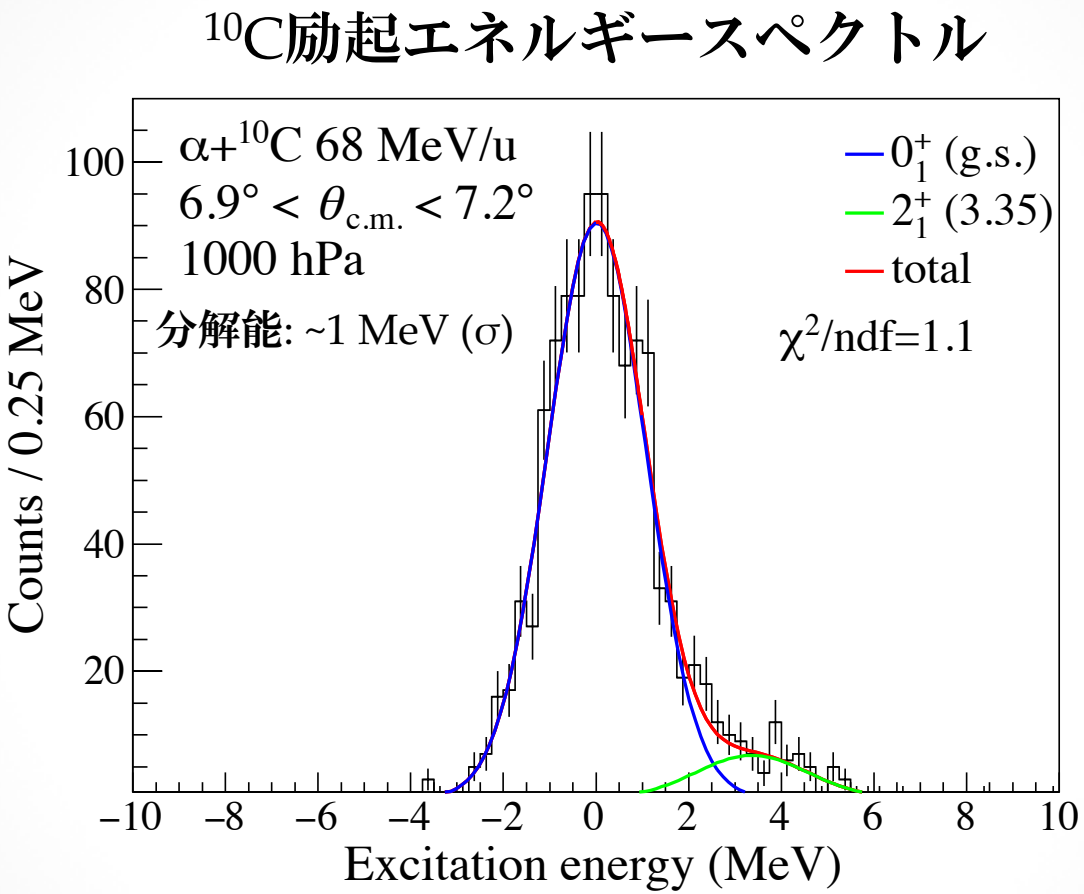
Results

反跳粒子のエネルギー v.s. 角度



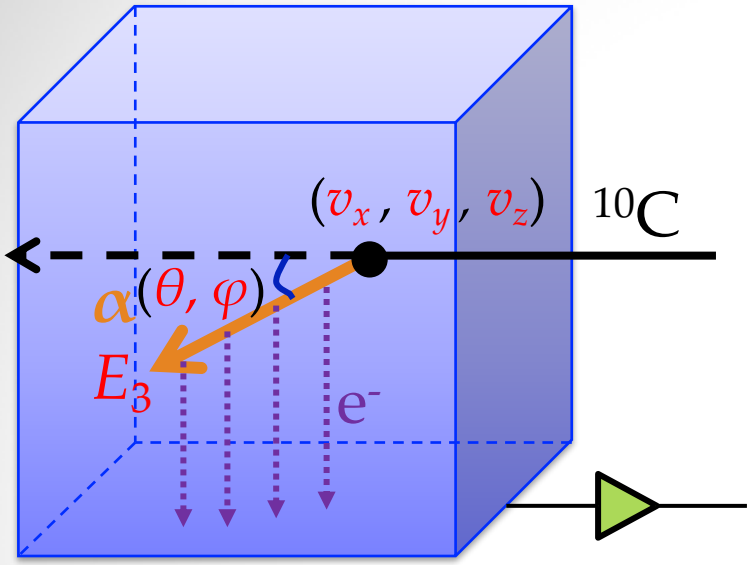
- 500 keVの低エネルギー α粒子の検出に成功！
- 主に弾性散乱イベント

Results



基底状態と2_1^+状態の分離に成功

detection, tracking 効率



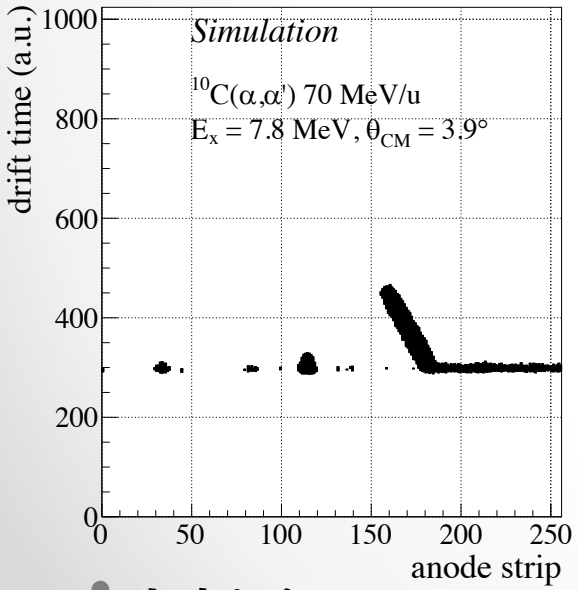
Monte-Carlo simulationの手順

①イベントをランダムに生成
- ✓ 反跳角度(θ, φ)
- ✓ 反跳エネルギー(E_3)
- ✓ vertex位置(v_x , v_y , v_z)

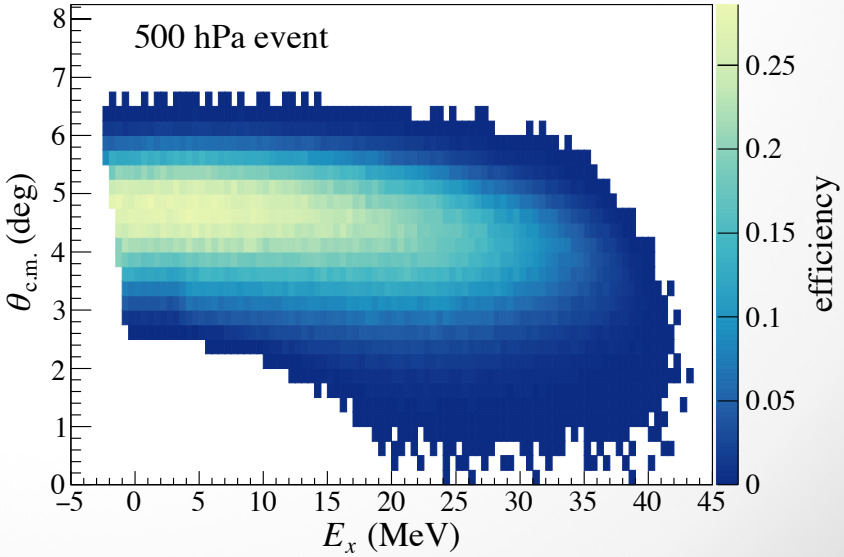
②反跳α飛跡に沿って、電子を生成・ドリフト
- ✓ SRIMを用いたエネルギー損失
- ✓ αのstraggling, 電子の拡散も考慮

③回路の応答で畳み込み、TPC dataを生成

④実dataと同じ解析を適用し、
各(E_x , θ_{CM}) で散乱と識別される割合(ε)を計算。

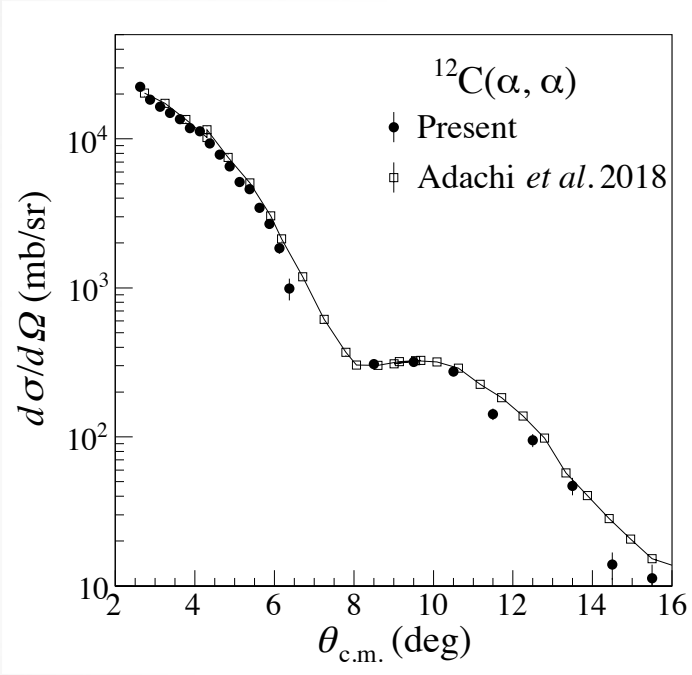


生成したTPC data

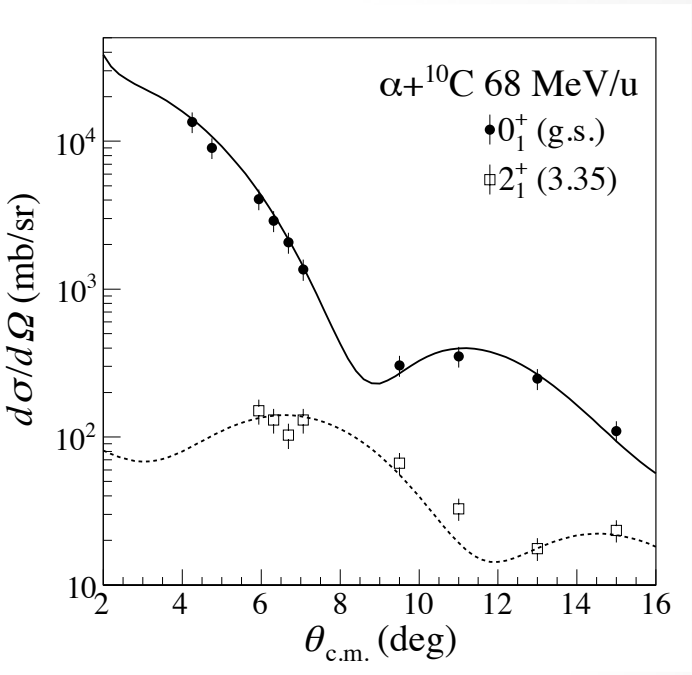


散乱断面積

^{12}Cビームで測定



^{10}Cビームで測定



- ^{12}C ビームで測定 → 過去の断面積と一致。
  - ✓ MAIKo測定のをreliabilityを確認。
- ^{10}C 弾性散乱、非弾性散乱の断面積
  - ✓ ^{10}Cの密度分布
  - ✓ 2_1^+状態への遷移強度→殻構造

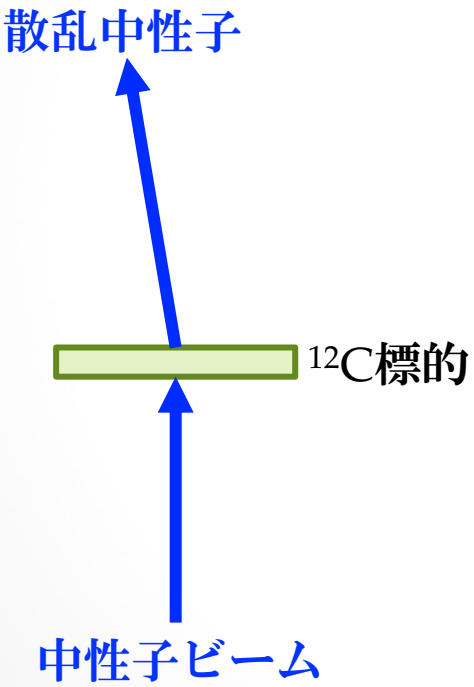
MAIKoで初の物理の成果！→ T. Furuno *et al.*, Phys. Rev. C **100**, 054322 (2019).

おまけ: 現在進行中の実験

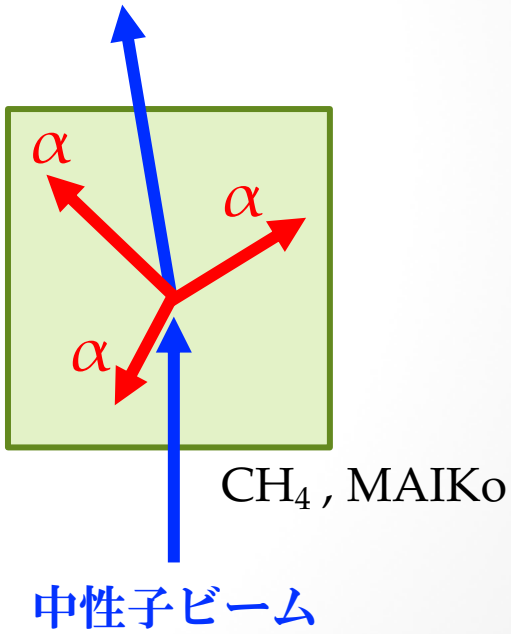
$^{12}C(n,n')3\alpha$ の反応断面積の測定

✓ 高温・高密度環境下での^{12}Cの合成レートに寄与 [PRL **119**, 112701 (2017).]

質量欠損法

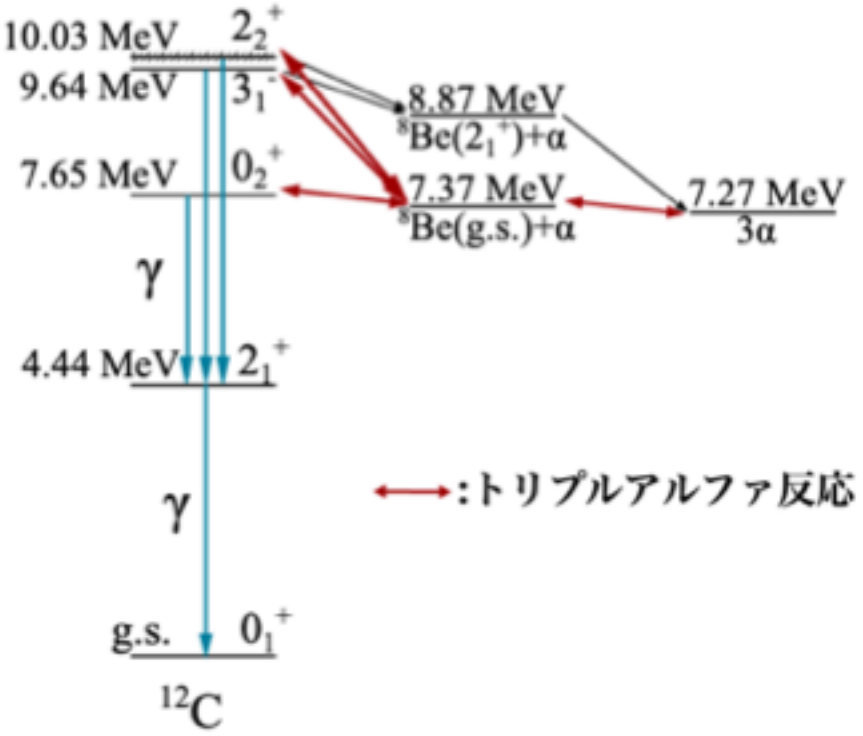


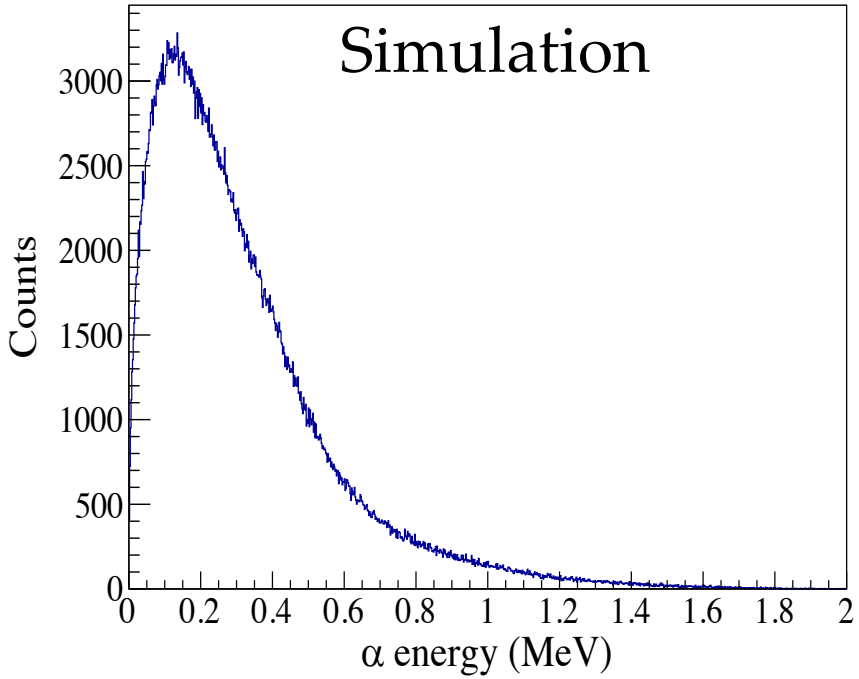
不変質量法



MAIKoを用いて、^{12}C からの崩壊3αを検出！

崩壊α粒子のエネルギー

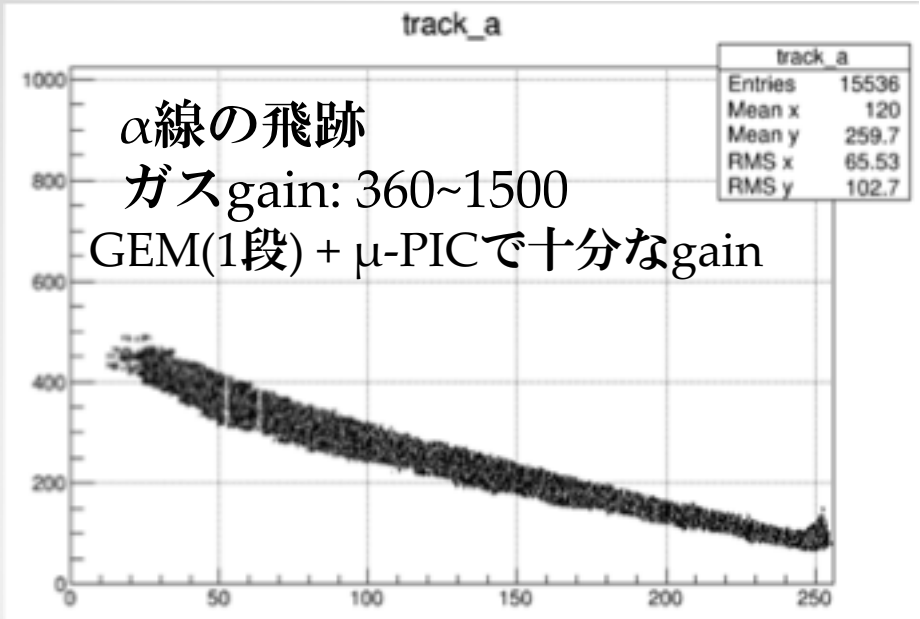


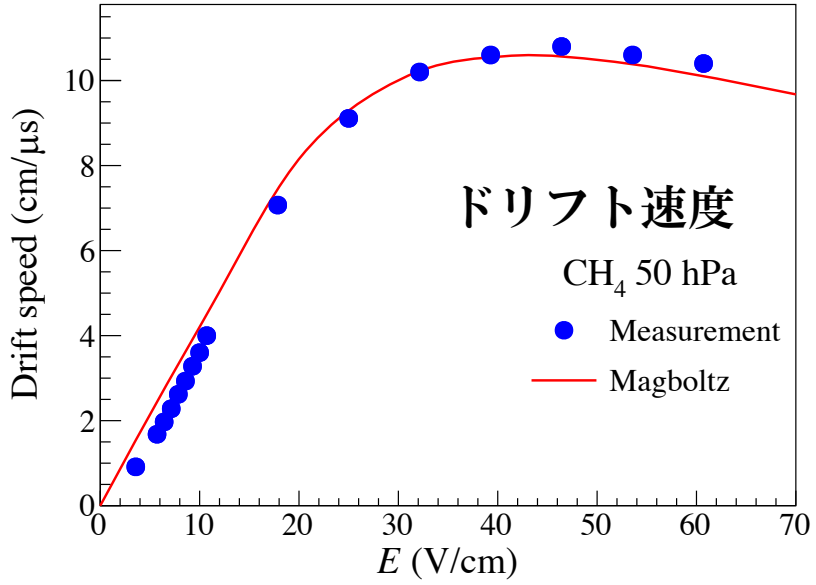


崩壊 α粒子のエネルギーは僅か100 keV
CH_4 @50 hPa でTPCを動作させる。→ガス中での飛程は22 mm

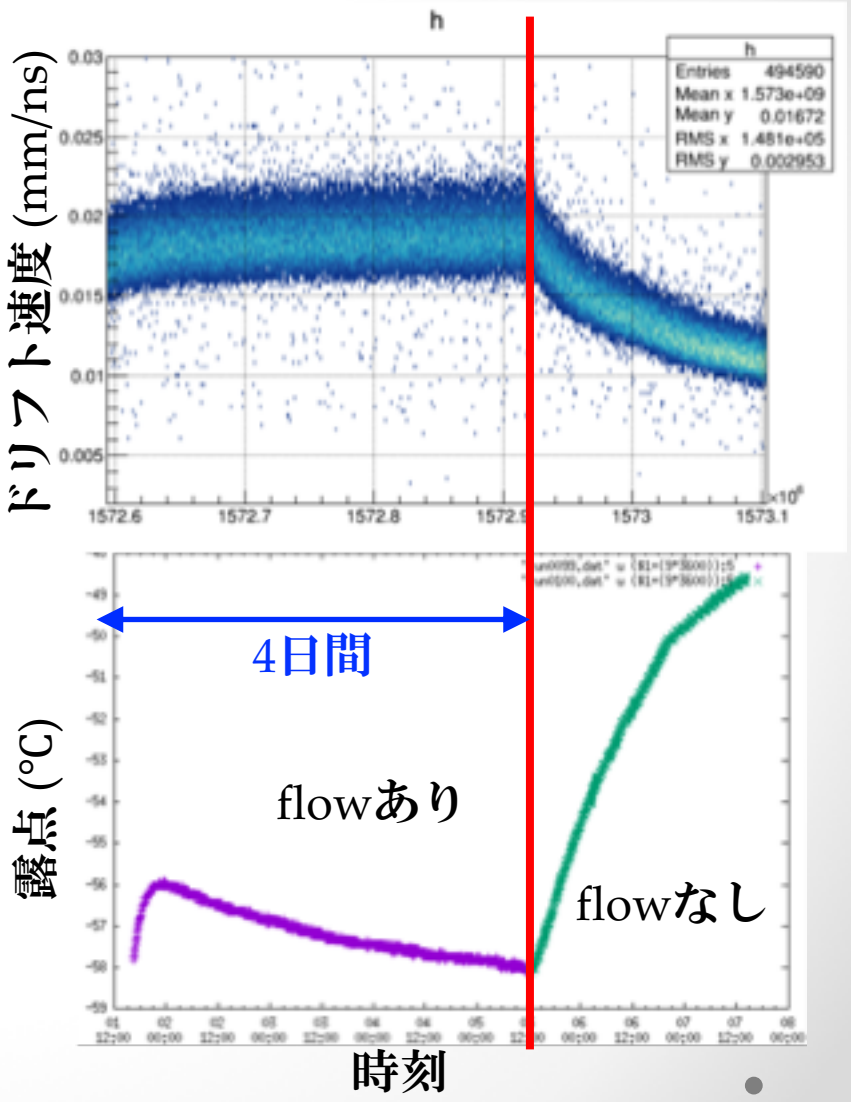
低圧でのTPC 動作試験が必要。

CH_4 @50 hPa の動作試験





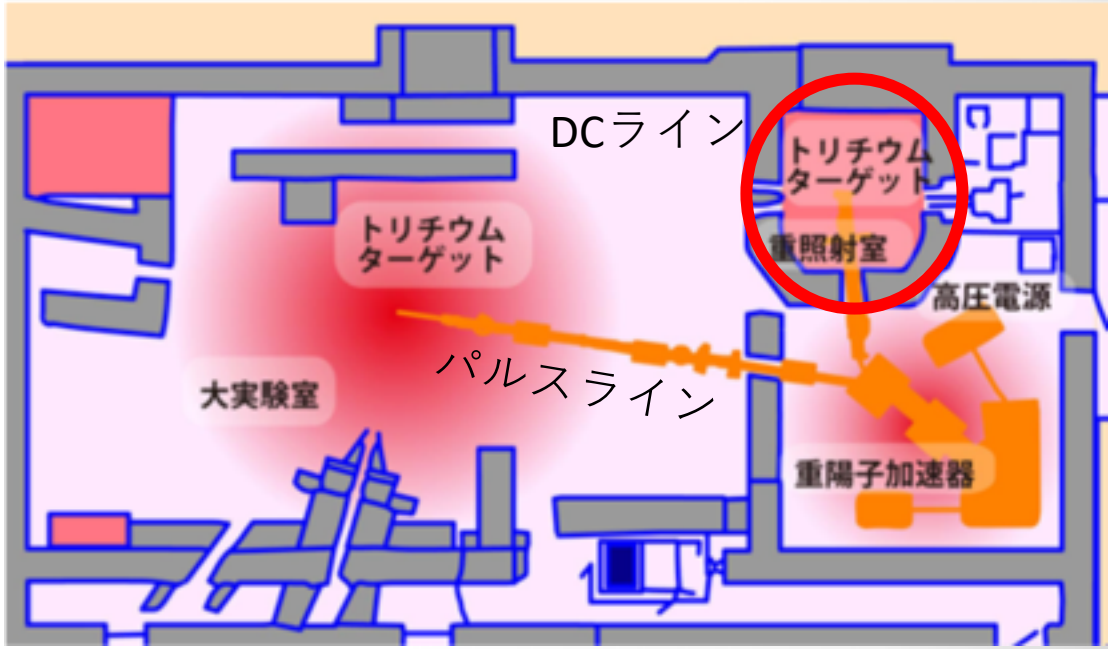
長期安定性



$^{12}C(n, n')$ テスト実験計画

大阪大学にあるOKTAVIANという施設の単色中性子ビーム (14 MeV) を使って測定

- $t(d,n)^4He$反応を用いる (2体反応なので単色)
- DCビームとパルスビームの両方がある
  - パルスビームは1次標的と測定室が同じ部屋
    →DCビームを用いる
- DCビームは最大10^{10}個/sの中性子が4πに



今月中にビームタイム? (昨年の地震でダメージを受け、現在修理中)

まとめと今後

- 不安定核実験で質量欠損分光を実現するために、MAIKoを開発。
  - ✓ GEM + μ-PICによる増幅。10 x10 cm^2 有感領域
  - ✓ He(96%) + CO_2(4%) @ 500/1000 hPa
- RCNPにおいて、初の不安定核実験
  - ✓ $^{10}C + \alpha$ 弾性散乱・非弾性散乱断面積
  - ✓ ^{10}Cの核子密度分布、遷移強度測定
- 2011年より開発してきたMAIKoアクティブ標的で初めての成果。
- ^{10}C高励起状態の解析を引き続き行う。
  - ✓ αクラスター構造の探索。
- MAIKoアップグレード(10 cm→30 cm)プロジェクトがスタート！
  - ✓ 標的厚・重心系角度アクセプタンスを大きくして合計10倍の統計量
  - ✓ 舞妓→芸妓(仮) として今後の不安定核実験で活躍の予定！
- 来月にD論公聴会(予定)