

東京大学宇宙線研究所 共同利用研究

トランジェント天体に同期した ニュートリノ事象の探索



毛受弘彰 (名大ISEE)



本研究課題の内容

- 研究目的

MeV-GeV領域で世界最高感度のスーパーカミオカンデを用いて突発天体現象に対するフォローアップ観測体制を構築すること。

- 共同研究者 12名 (海外4名含む)

- 共同利用研究費 旅費10万円 (SKで共同執行)

SKでの突発天体観測体制

■ アラート発信

□ 重力崩壊型超新星爆発

- 銀河系内のイベントに対して100%の検出効率。
- 有意なニュートリノ事象数増加検出で自動でアラート配信。
- SK単体で方向決定が可能。

■ フォローアップ観測

□ SKは24時間観測、 4π アクセプタンス

→ どの突発事象に対しても解析可能!!

□ これまでの解析例

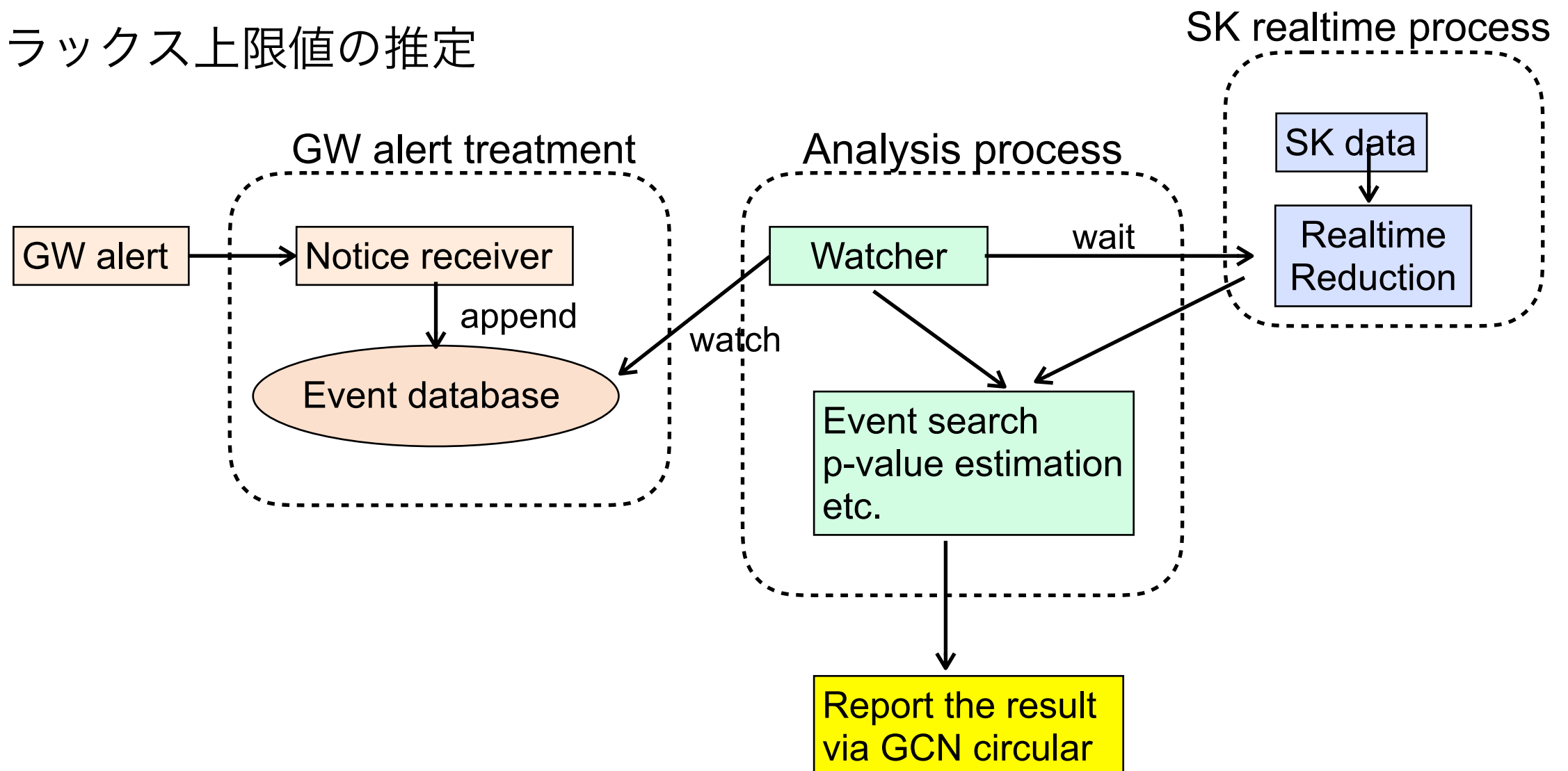
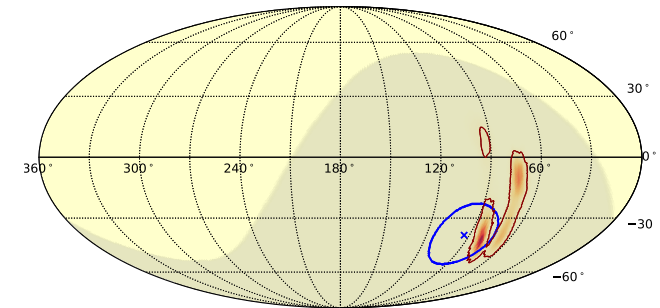
GRB、GW

Blazar TXS0506+056 (IceCube)、Solar flare

フォローアップ観測システム

1. NASA-GCNを通してGWなどの突発天体アラート受け取り
2. データリダクション、イベント再構成プロセス
3. 突発イベントとの同期事象探索
 - イベント時間から ± 500 秒内のニュートリノイベントを探索
 - バックグラウンドと比較しての優位度
 - フラックス上限値の推定

GW190602_175927



本年度の成果

- 自動フォローアップシステムの高速度
 - 既存の解析パイプラインの処理終了を待つためにアラート受信から解析完了まで1日程度の時間がかかっていた。
 - オンタイム解析システム (WIT) の出力を用いた解析パイプラインを用いることで低エネルギー事象の即時解析が可能。探索の時間幅も最適化。
→アラート受信から15分程度まで短縮する目処がたった。
- オフライン解析：GW同期ニュートリノ事象探査
 - GW O4前半 (2023年10月まで) の56イベントに対して探索
探索幅 ±500秒
 - 高エネルギー、低エネルギー事象ともにバックグラウンドとコンシステントな結果だった。

低エネルギー事象の探索結果

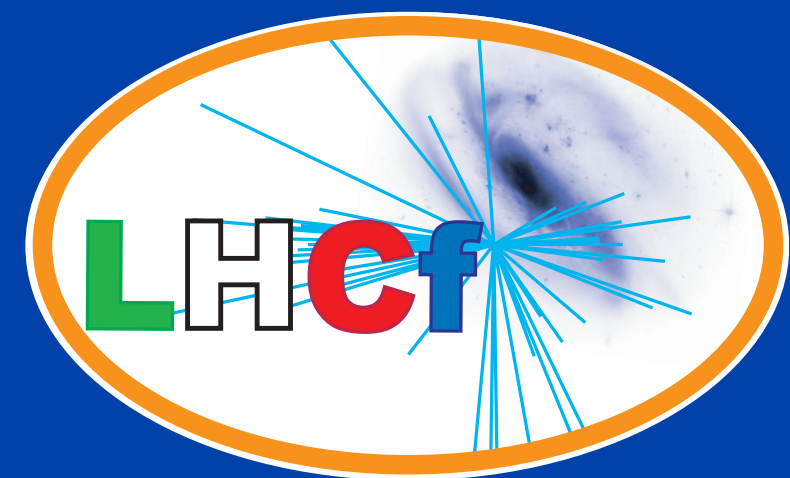
GW event	GW TYPE	BKG EXP	N OBS	<i>p</i> time
S230814ah	BBH (100.0%)	9.34E-01	3	0.07
S230731an	BBH (81.4%)	9.73E-01	3	0.08
S230904n	BBH (91.1%)	1.02E+00	3	0.08
S230924an	BBH (100.0%)	8.71E-01	2	0.22
S230807f	BBH (86.4%)	9.50E-01	2	0.25
S230726a	BBH (100.0%)	9.80E-01	2	0.26
S230702an	BBH (100.0%)	1.01E+00	2	0.27
S230723ac	BBH (86.7%)	1.01E+00	2	0.27
S230628ax	BBH (100.0%)	1.01E+00	2	0.27
S230601bf	BBH (100.0%)	1.07E+00	2	0.29
S230529ay	NSBH (62.4%)	1.09E+00	2	0.30

まとめ

- 本研究では、スーパーカミオカンデ検出器を用いた突発天体に対するフォローアップ解析体制を構築することを目標としている。
- GW O4前半の事象に対する同期ニュートリノの探索を行ったが、優位なシグナルは発見できなかった。
- 自動フォローアップシステムの低エネルギー事象に対する高速化の目処がたち、今後は高エネルギー事象の解析の高速化も進めていく

東京大学宇宙線研究所 共同利用研究

Knee領域および最高エネルギー領域での 宇宙線反応の実験的研究



毛受弘彰 (名大ISEE)



本研究課題の内容

■ 研究目的

加速器実験(LHCf, RHICf)を用いた宇宙線相互作用の理解を通して、ミューオン超過問題など空気シャワー観測結果とシミュレーション結果との不一致問題の解決を目指す。

■ 共同研究者 9名 (代表:毛受)

■ 共同利用研究費 8万円 ICRRへの旅費に使用

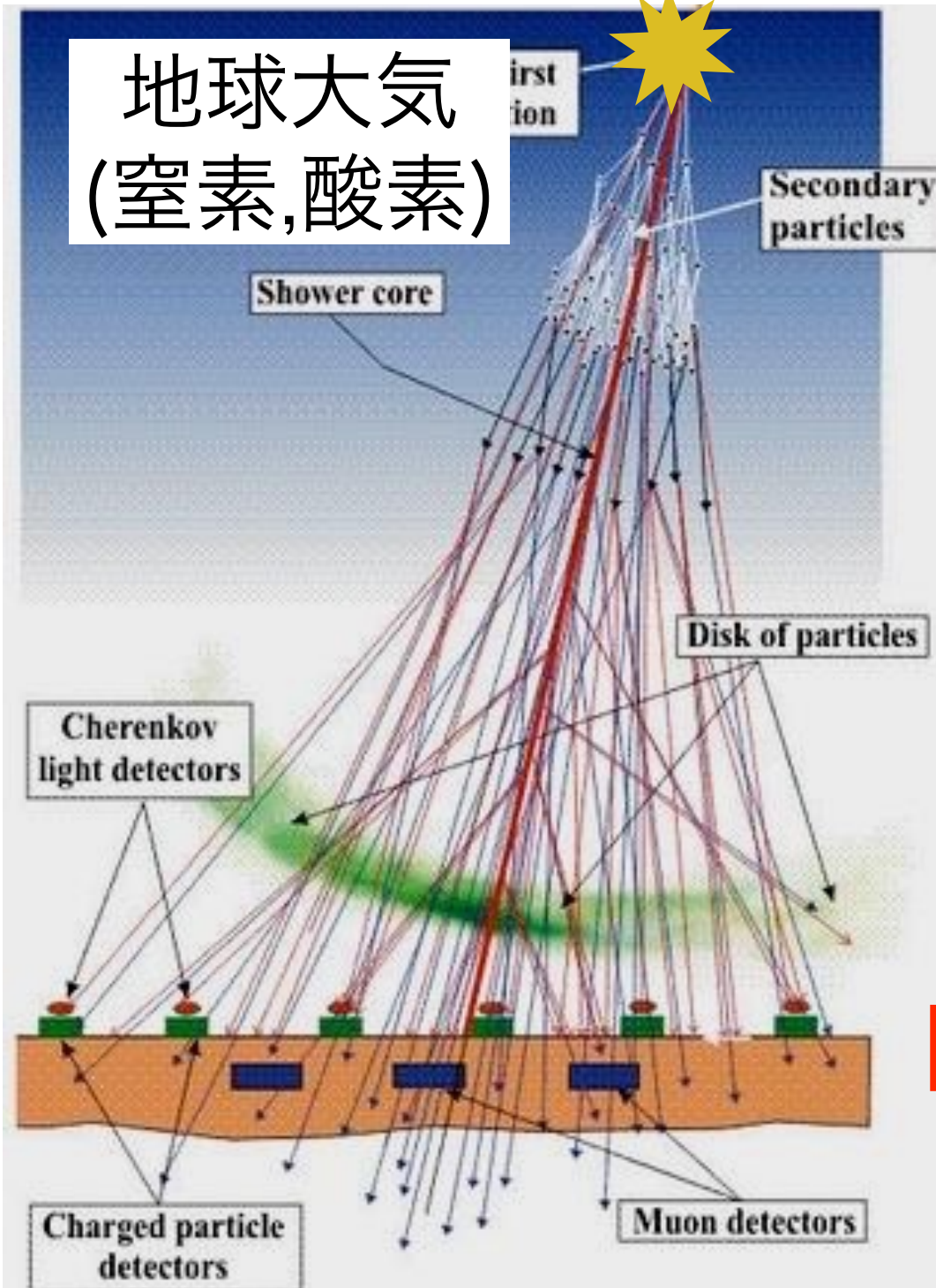
■ 大型計算機利用

■ 本年度の成果

- 陽子-酸素原子核衝突測定に向けた準備 → 後述
- 陽子-陽子衝突データの解析が進行中
- 研究会を開催予定 ←本年度は研究会としても共同利用研究費の支援をいただいています。

空気シャワーとハドロン相互作用

宇宙線(陽子,鉄など)



空気シャワーは、
高エネルギー粒子(宇宙線)と大気原子核衝突
2次生成粒子と大気原子核衝突
またその2次粒子と、、、
無数の電磁+ハドロン相互作用によって形成

高エネルギー領域での理解が重要

現在のハドロン相互作用モデルの問題

- ▶ 化学組成決定の不確定性
モデル間の差 > 実験誤差
- ▶ ミューオン超過問題
どのモデルも実験を再現できていない

加速器実験によって

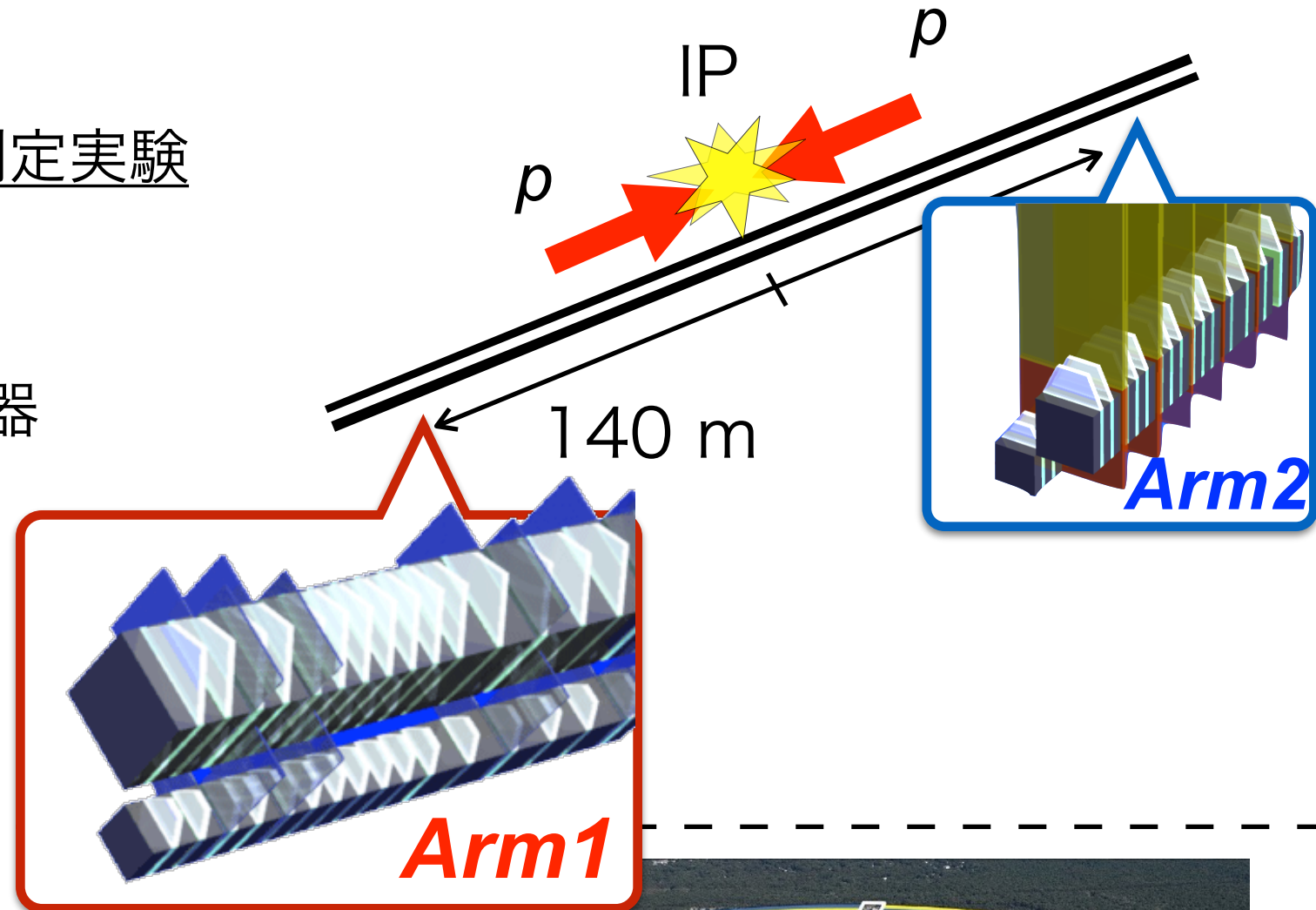
ハドロン相互作用の理解を進め、
高エネルギー宇宙線観測の課題を解決

LHCf/RHICf実験

LHCf実験

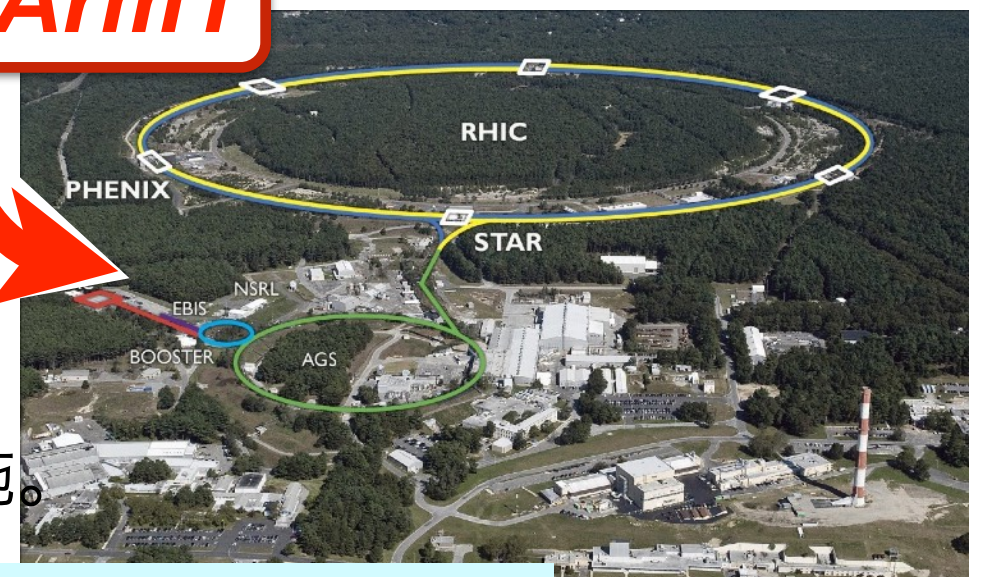
- CERN-LHC加速器の最前方領域測定実験
- ATLAS衝突点の両側140mに検出器を設置 (Arm1、Arm2)
- サンプリングカロリメータ検出器
 - ▶ タングステン(44 r.l.)
 - ▶ GSOシンチレータ 16層
 - ▶ 位置検出層 4層

Arm1: GSOバーXYホドスコープ
Arm2: シリコンストリップ



RHICf実験

- BNL-RHIC加速器の最前方領域測定実験
- STAR実験衝突点の片側18mにLHCf-Arm1検出器を設置。
- 偏極陽子を用いており、スピン物理の測定も実施。



LHCf/RHICf これまでに陽子-陽子,陽子-鉛衝突を測定

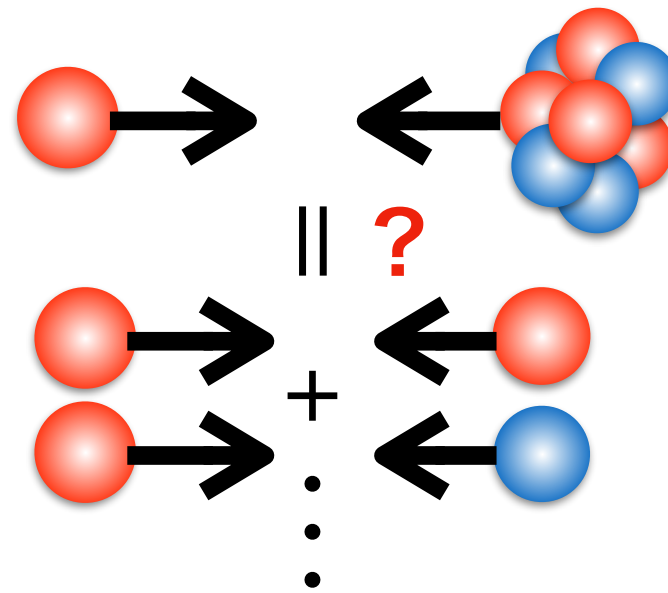
陽子-酸素原子核衝突

■ p-O衝突は宇宙線-大気相互作用を再現する理想的な条件 !!

- コライダーでの軽原子核衝突は世界初
- 原子核効果のモデリングの違いがモデル予測の違いの要因の1つ

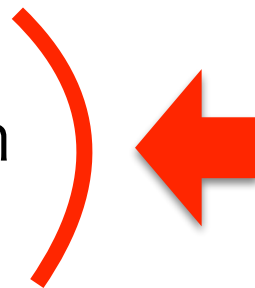
■ p-O相互作用

- Glauber理論
p-O衝突をp-p衝突の重ね合わせで記述
- 原子核効果



これまでLHCで測定が行われている陽子-陽子衝突で十分かどうかは自明ではない

- ▶ Nuclear Shadowing
- ▶ Limiting Fragmentation
- ▶ QGP (core-corona)



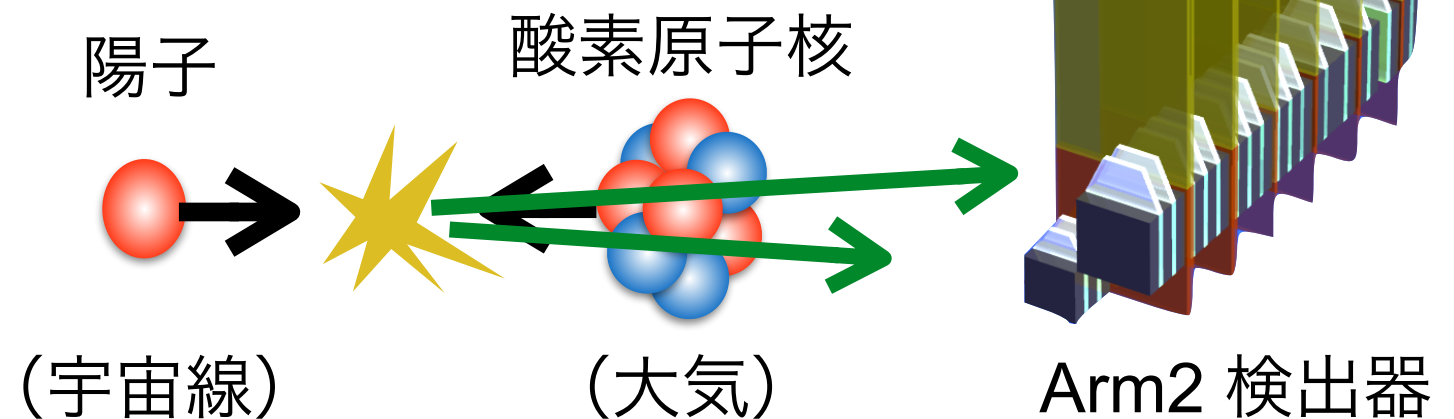
空気シャワー発達の違いを生む要因の1つと考えられている。

- データと実測の違い (ミュオン超過)
- 相互作用モデル間の違い

p-O測定準備状況

■ セットアップ

- Arm2検出器を陽子進行方向側に設置。



■ スケジュール

~~2024年6月にp-O測定予定~~ ⇒ 2025年7月に変更

■ 準備状況

- ビームパラメータの決定
 - ビームエネルギーなど全LHC実験で議論中
- 2月半ばにCERNにて準備作業
 - データ収集システムの最終動作試験
 - ATLASとの共同データ取得の準備

データ解析の進展

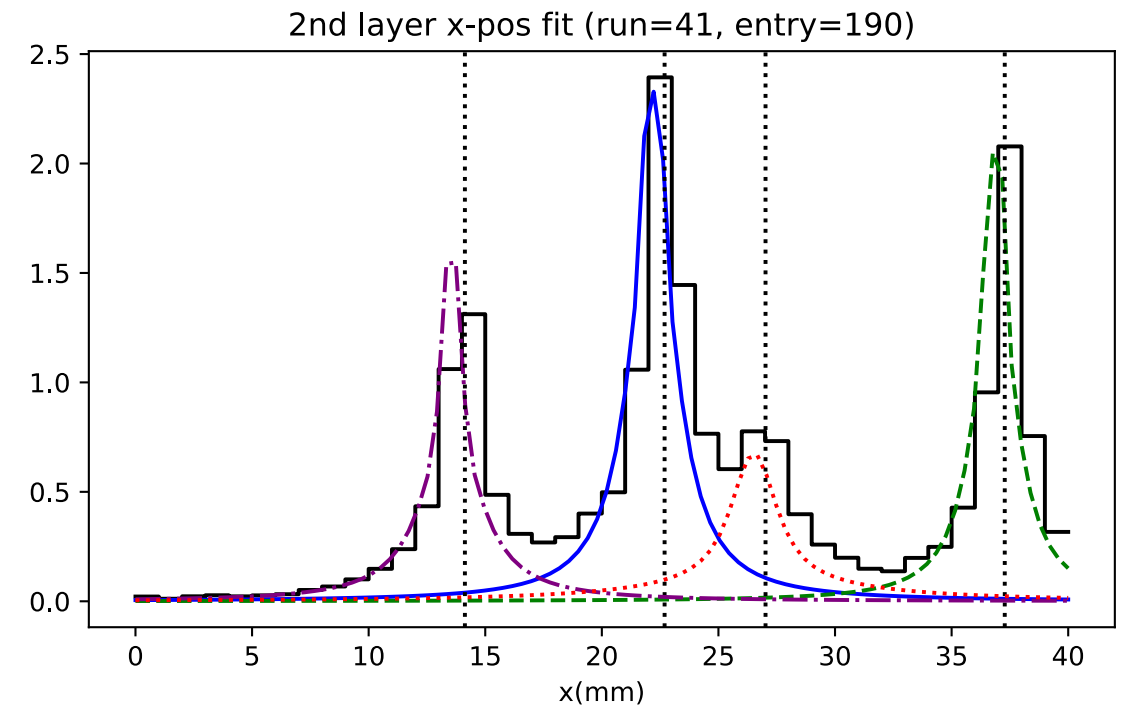
K⁰_s測定手法の開発

- $K^0_s \rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$
- イベント再構成に機械学習の導入した。
→ 4光子検出効率を大幅に向上

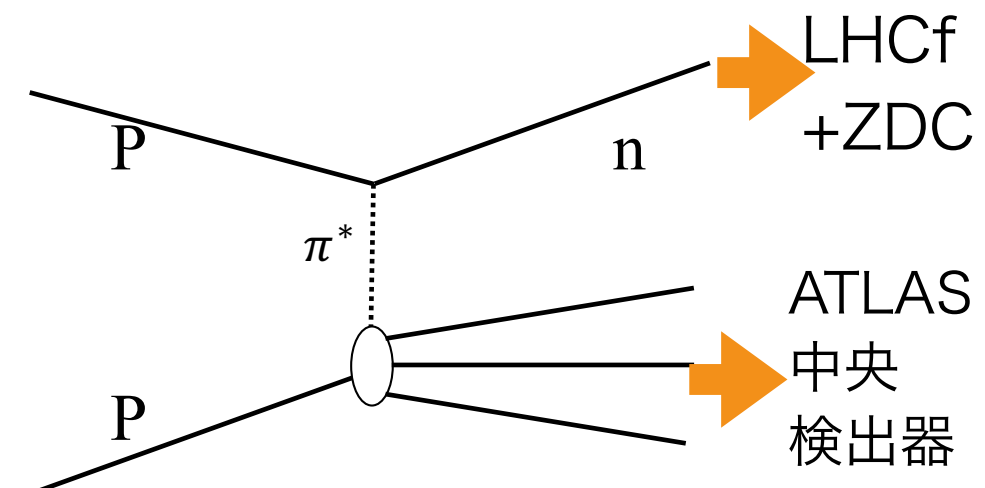
ATLAS-LHCf共同解析

- 2022年の高統計データでの共同解析の整備がほぼ完了→物理解析へ
- LHCf+ATLAS ZDCによって中性子のエネルギー分解能を向上：40-20%
→One-Pion-Exchange事象の測定によって陽子- π 衝突の測定を目指す。

4光子入射の検出例 (MC)



One pion exchange



まとめ

- LHCf/RHICf実験は、宇宙線相互作用理解のためにLHCとRHIC加速器で最前方領域測定実験を実施している。
- 2025年7月の陽子-酸素原子核衝突に向けて準備が最終段階
- データ解析も進展している。
 - 機械学習を導入した K^0_s 事象再構成手法の開発
 - ATLASとの共同データ解析
- 研究会を3月24-29日に開催

「宇宙線空気シャワー観測によるマルチメッセンジャー天文学の推進」研究会 Workshop for accelerating multi-messenger astronomy using air shower observations

📅 24 Mar 2025, 10:30 → 29 Mar 2025, 13:00 Asia/Tokyo

<https://indico.cern.ch/event/1484453/>

- ・講演だけでなく、各種ハンズオン講習（空気シャワーシミュレーション、レイトレースシミュレーション、機械学習）も開催