

A02 分担者研究紹介

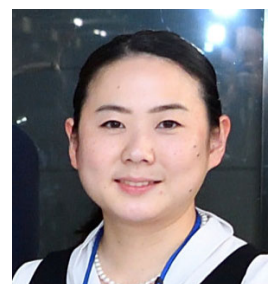
(1) 核破碎反応

9月29日 (木) 12時10分～30分



大西明 (京大基研)
原子核理論、ハドロン物理

重イオン衝突におけるハドロン輸送
多重核破碎反応理論
格子QCD
中性子星の核物質

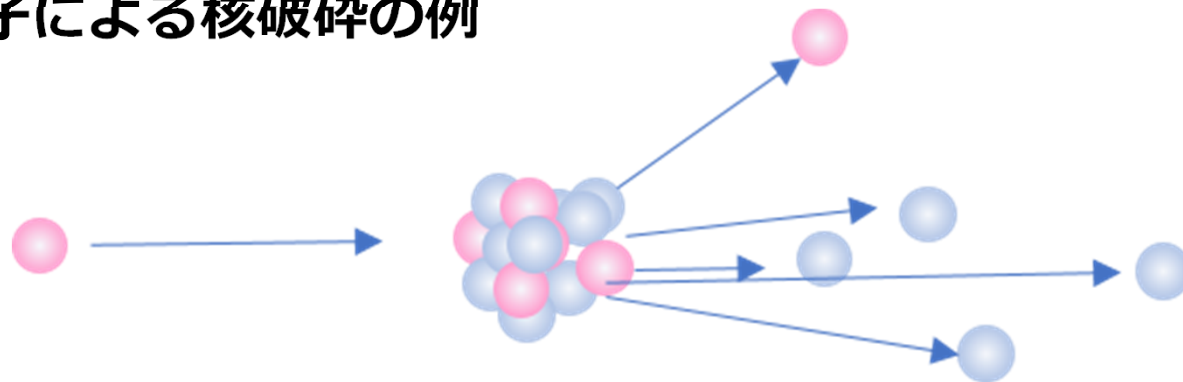


石塚知香子 (東工大IIR)
原子核理論、核データ

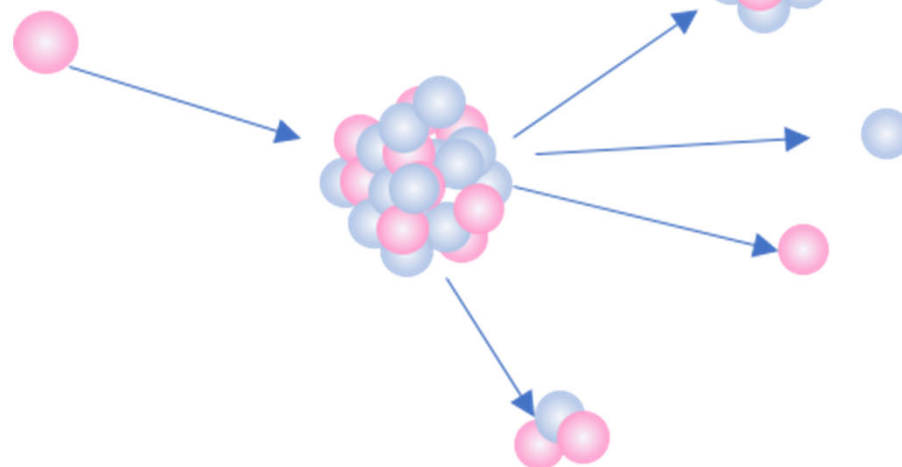
高密度天体の核物質
核反応理論 (重イオン入射反応、核分裂など)
機械学習

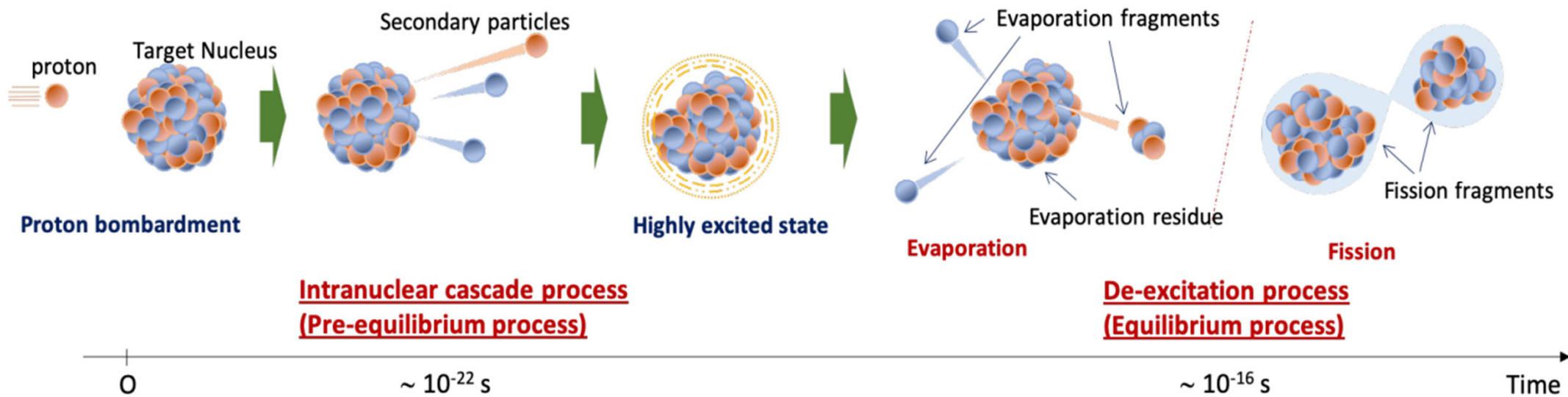
高エネルギー陽子による核破碎の例

spallation



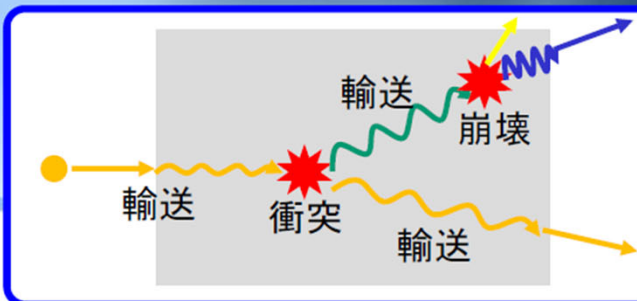
fragmentation





「核破碎反応のプロセス」 岩元大樹著、核データニュース, No.128 (2021)より転載

PHITSで扱う物理現象



衝突・崩壊過程

原子核反応

- **高エネルギー核破碎反応**
- 核分裂反応
- 吸収・原子核共鳴反応

原子反応

- 光電効果・コンプトン散乱・電子対生成
- モラー/バーバー散乱、対消滅・制動放射
- ノックアウト電子(δ 線)生成
- 電離/励起(飛跡構造解析モードのみ)

粒子崩壊

- 寿命による崩壊(μ & π 粒子、中性子 etc.)

輸送過程

電離・励起

- 連続エネルギー損失近似(CSDA)
- エネルギー・角度分散

外部場/反射

- 電磁場
- 重力
- 反射面(スーパーミラー etc.)

PHITSに組み込まれた物理モデル（奨励設定）

	中性子	陽子・ π 粒子 (その他の核子)	重イオン	μ 粒子	電子・ 陽電子	光子
高 ↑ エネルギー ↓ 低	1 TeV	1 TeV/u		1 TeV	EGS5 or 飛跡構造 解析	1 TeV
	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM	JAMQMD + GEM		仮想光子 核反応 JAM/ JQMD + GEM		EGS5 or EPDL97
	核内カスケード模型 INCL4.6 ^d + 蒸発模型 GEM ^t 20 MeV	³ He + GEM 10 MeV/u	量子分子 動力学模型 JQMD + GEM	200 MeV		
	核データ ライブラリ JENDL-4.0 + (EGM) 0.01 meV	1 MeV	エネルギー損失 ATIMA or 飛跡構造解析	ATIMA + オリジナル ミューオン 原子生成 +捕獲反応	1 keV	1 keV

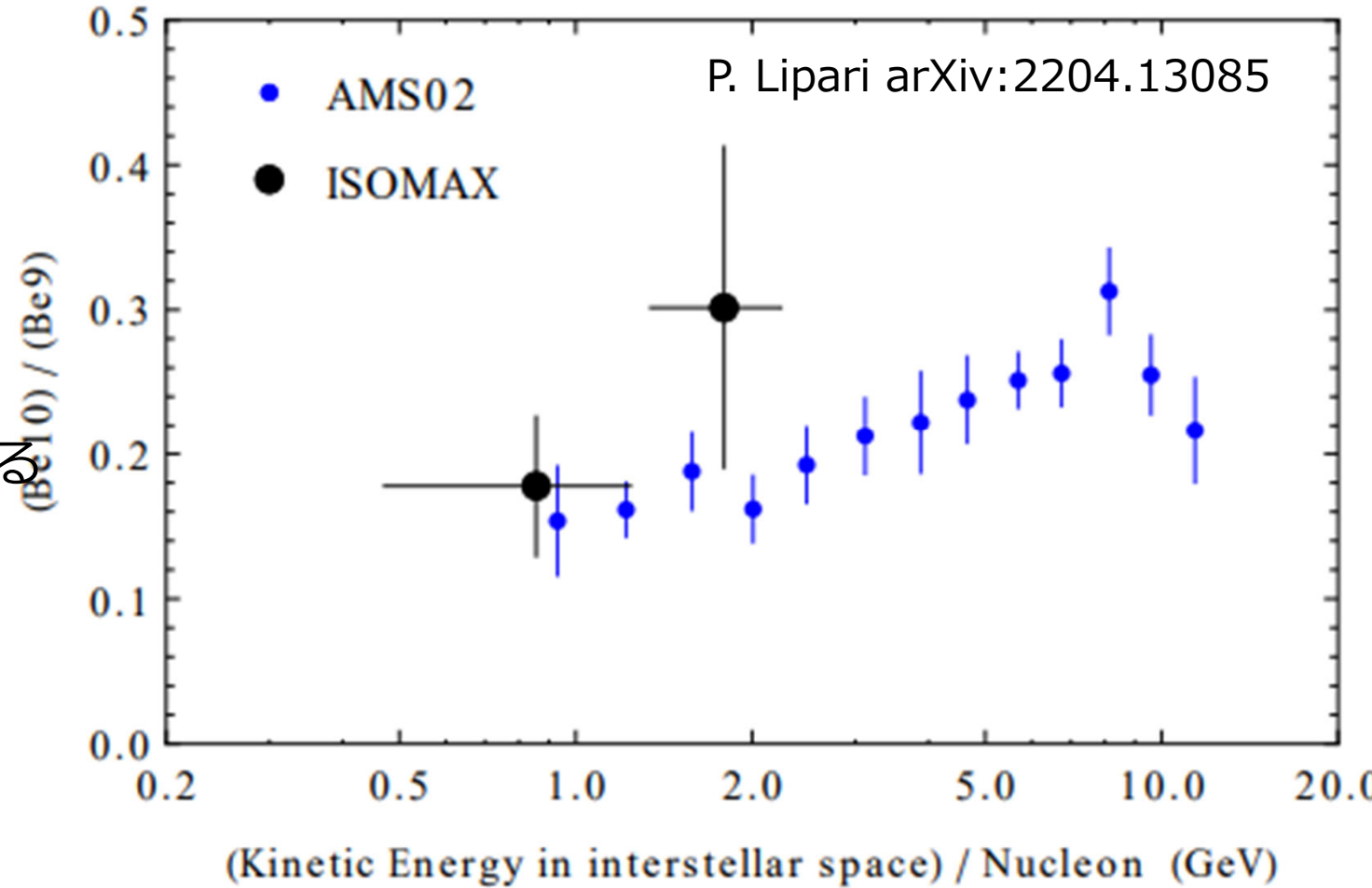
粒子別の奨励物理モデルとその適用エネルギー範囲

モデル及びその適用エネルギー範囲は入力ファイルにて変更可能

A02(1)のミッション 核破碎反応データベース作成

➤ Beの同位体比において、
関連する核破碎反応の
反応断面積の不確かさが
最大の問題となっている

➤ 高エネルギー宇宙線による
核破碎では、今回
陽子 + C, N, Oなど
出来れば鉄族あたりまで
広く標的核を仮定して
断面積の理論予測をしたい

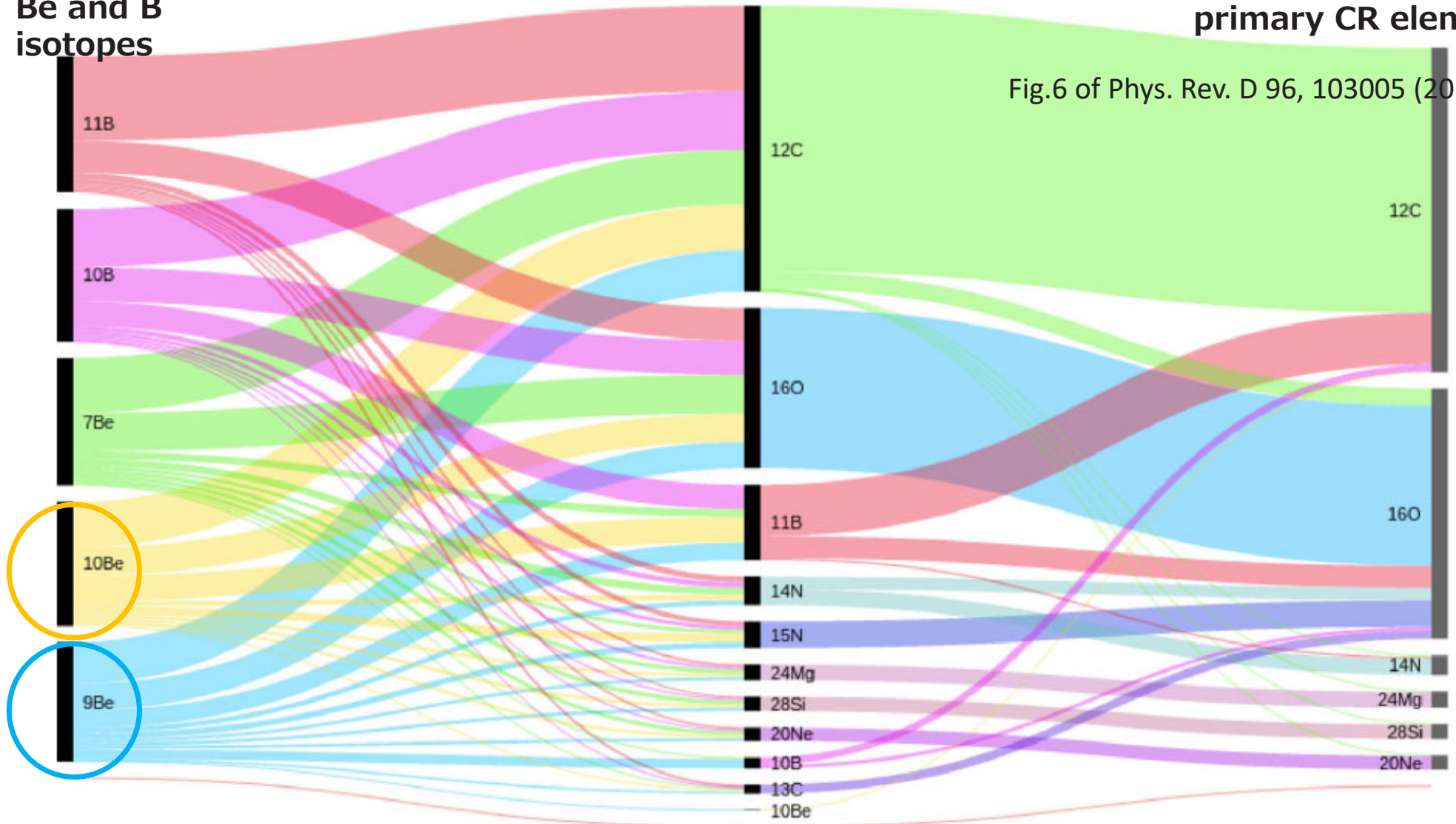


Nuclear fragmentation contribution at $E \sim 1$ GeV/n of kinetic energy.

Be and B isotopes

primary CR elements

Fig.6 of Phys. Rev. D 96, 103005 (2017).



PHITSに組み込まれた物理モデル（奨励設定）

	中性子	陽子・π粒子 (その他の核子)	重イオン	μ粒子	電子・ 陽電子	光子	
高エネルギー ↑ ↓ 低エネルギー	1 TeV		1 TeV/u	1 TeV		1 TeV	
	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM		JAMQMD + GEM	仮想光子 核反応 JAM/ JQMD + GEM	EGS5 or 飛跡構造 解析	EGS5 or EPDL97	光核反応 JAM/ JQMD + GEM + JENDL + NRF
	核内カスケード模型 INCL4.6 + 蒸発模型 GEM	d t ³ He α	量子分子 動力学模型 JQMD + GEM 10 MeV/u	200 MeV			
	核データ ライブラリ JENDL-4.0 + (EGM) 0.01 meV	1 MeV		ATIMA			
			エネルギー損失 + オリジナル	1 keV			

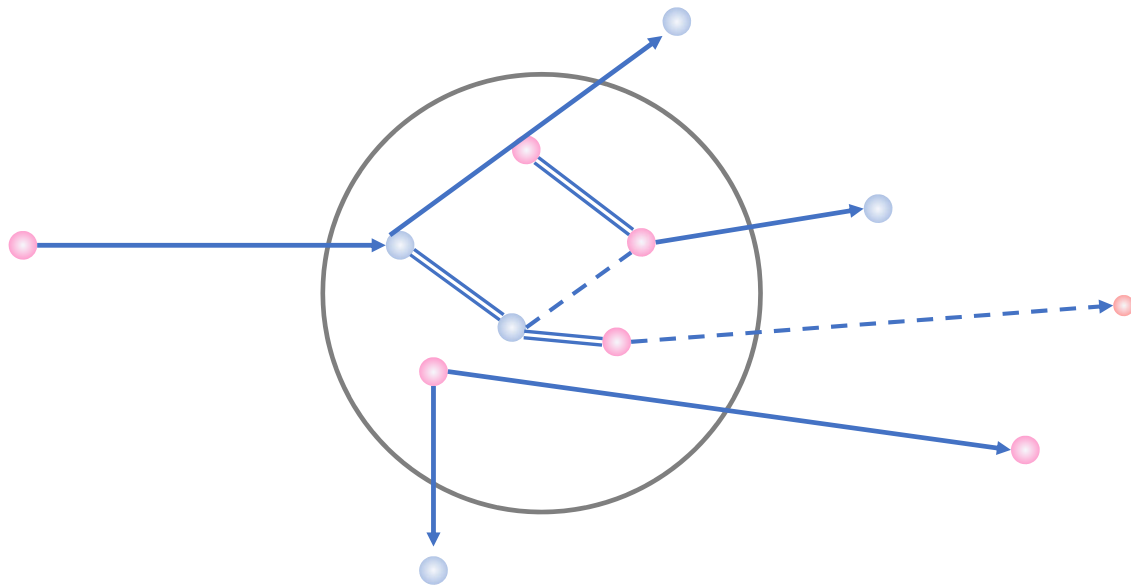
エネルギーの低いほうから順に本件で関連するコード

- INCL (Intra-Nuclear Cascade of Liège)
- GEM (Generalized Evaporation Model)
- JAM (The Jet AA Microscopic Transportation Model)

粒子別の奨励物理モデルとその適用エネルギー範囲

モデル及びその適用エネルギー範囲は入力ファイルにて変更可能

Intra-Nuclear Cascade (INC)モデル：原子核は核子の集合体であり、核反応は核子同士の二体衝突の重ね合わせで記述できるとするモデル



二体衝突で考慮されている反応
核子Nとn中間子による

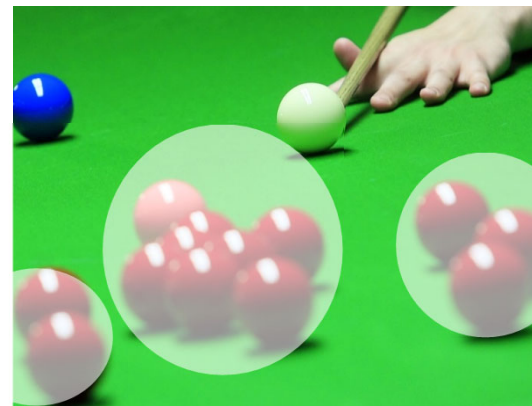
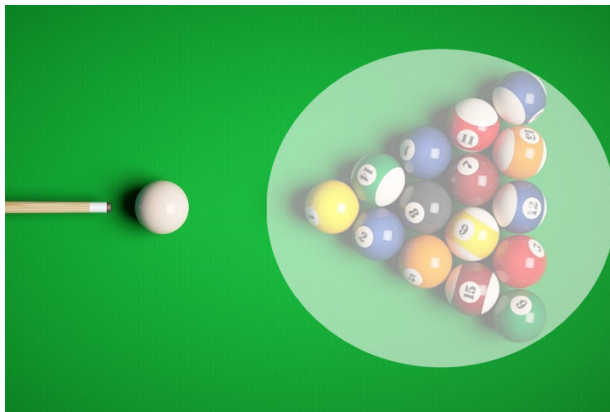
(N, N)散乱

(N, N)1n生成, (N, N)2n生成,

(n, N)弾性散乱,

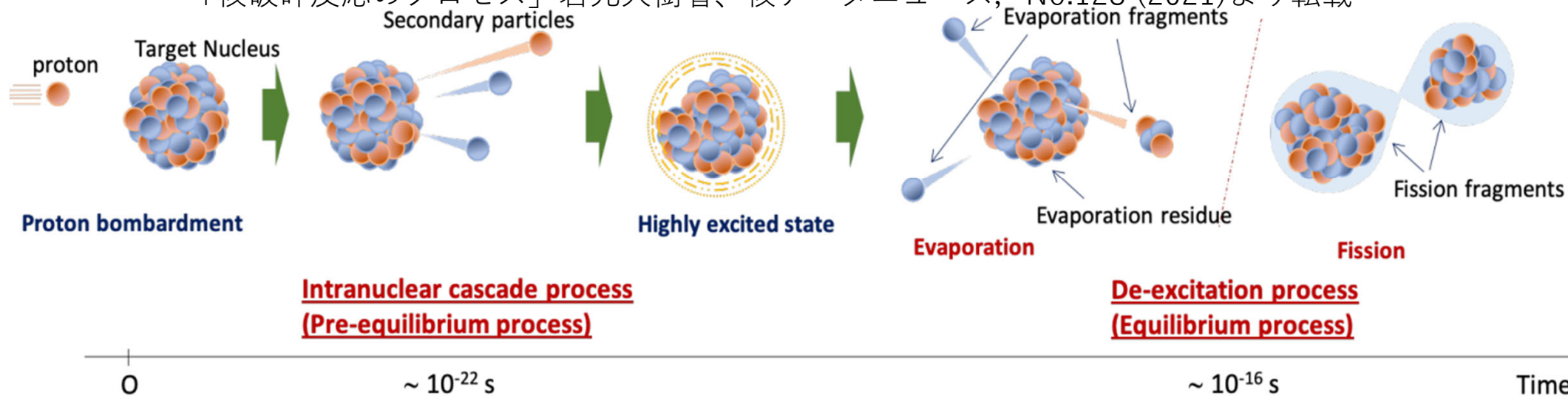
(n, p)荷電交換,

(n, N)吸収, (n, N)1n生成



	中性子	陽子・π粒子 (その他の核子)	μ粒子	電子・陽電子	光子
エネルギー ↑	1 TeV	1 TeV		EGS5 or 飛跡構造解析	1 TeV
	核内カスケード模型 JAM 3.0 GeV + 蒸発模型 GEM	核内カスケード模型 INCL4.6 + 蒸発模型 GEM	仮想光子 核反応 JAM/ JQMD + GEM		光核反応 JAM/ JQMD + GEM + JENDL
	20 MeV		200 MeV		

「核破碎反応のプロセス」 岩元大樹著、核データニュース, No.128 (2021)より転載



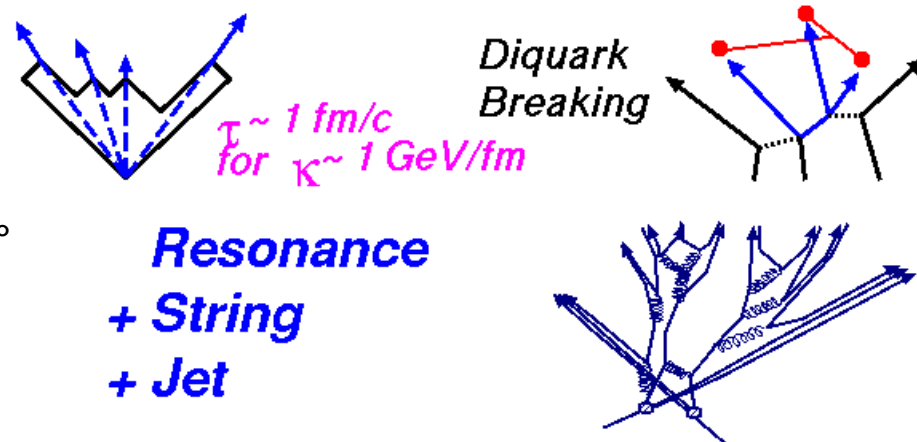
- JAM (Jet AA Microscopic transport Model)
共鳴モデルとストリングモデルを組み合わせたカスケードモデル
-共鳴モデル

JAMのNN衝突で実装されている共鳴

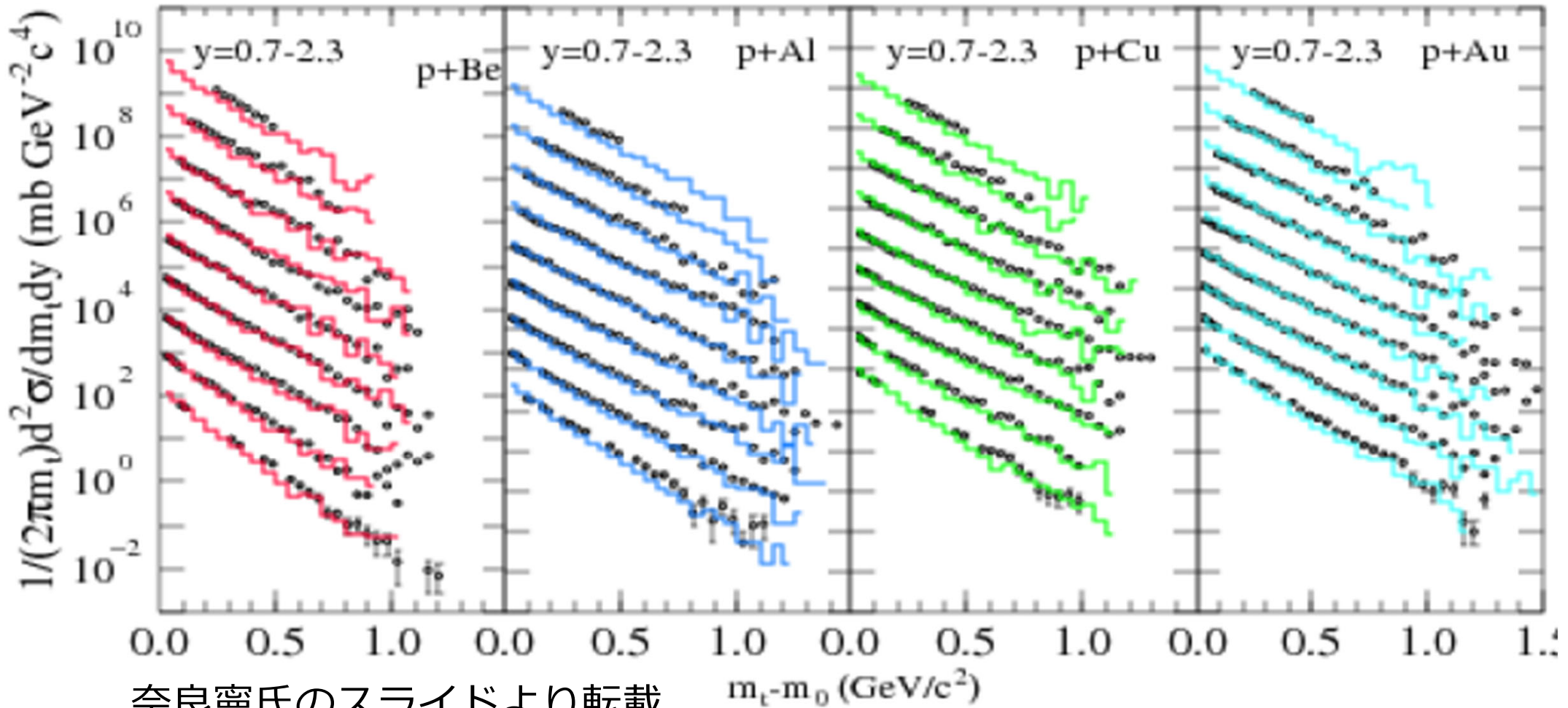
- (1) $NN \rightarrow N\Delta(1232)$, (2) $NN \rightarrow NN^*$, (3) $NN \rightarrow \Delta(1232)\Delta(1232)$,
 (4) $NN \rightarrow N\Delta^*$, (5) $NN \rightarrow N^*\Delta(1232)$, (6) $NN \rightarrow \Delta(1232)\Delta^*$, (7) $NN \rightarrow N^*N^*$,
 (8) $NN \rightarrow N^*\Delta^*$, (9) $NN \rightarrow \Delta^*\Delta^*$.

- ストリングモデル

ハドロン・ストリング=共鳴ハドロンの連続状態
 (クォークや反クォーク・ダイクォークを端点に持つひも)
 高エネルギーの反応で励起され、崩壊し、粒子を生成する。
 JAMでは入射エネルギー1TeV以上で有意になるジェット
 (クォークやグルーオンが走ってから崩壊)も含む



proton distributions



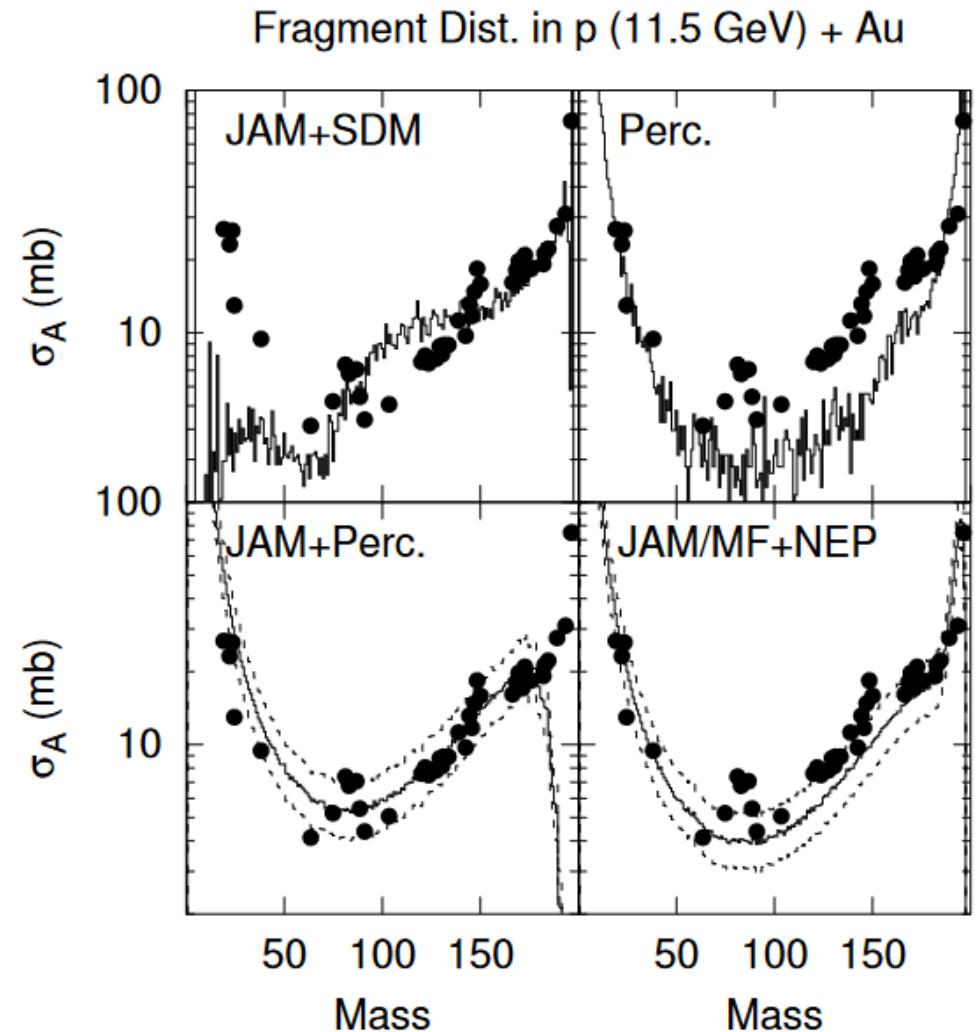
奈良寧氏のスライドより転載

E=14GeVでのJAMによる陽子分布と実験値の比較

高エネルギー反応での原子核生成

- 高励起原子核の崩壊過程
 - 蒸発模型(GEM)
(統計崩壊模型 SDM)
 - パーコレーション
(核子間のボンドを確率的に切る)
 - 非平衡パーコレーション
(切る確率を励起によって変化)
- 高エネルギーでの重い原子核標的の反応では動的模型とパーコレーション的模型を組み合わせるのがよさそう。
- 軽い原子核標的では？

Y.Hirata, A.Ohnishi, Y.Nara, T.Kido, T.Maruyama, N.Otuka, K.Niita, H.Takada, S.Chiba, Nucl. Phys. A707 (2002), 193.



A02班(1)の目標

- 高エネルギー・軽原子核(CNO)標的からの核破砕は原子核物理学・核データの観点からは未開拓であり、さらなる研究が必要である。

ただし「周り」(比較的低エネルギーでの反応からの核破砕、高エネルギー陽子を大きな原子核に入射する反応)では研究が行われており、必要な機構も提案されている。

- 本科研費研究でこれらの機構を確かめるとともに改善・調整を行い、宇宙線物理に寄与できるように予言能力を高めて評価を行うことが目標である。