

SCW黒体放射光による天体核物理の研究

2006年2月9日 SCW放射光利用計画ミニワークショップ
主催 SPring-8加速器部門 世話人 米原博人、早乙女光一

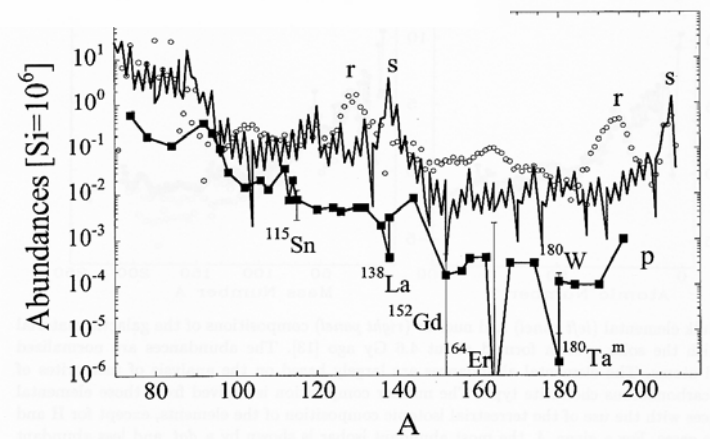
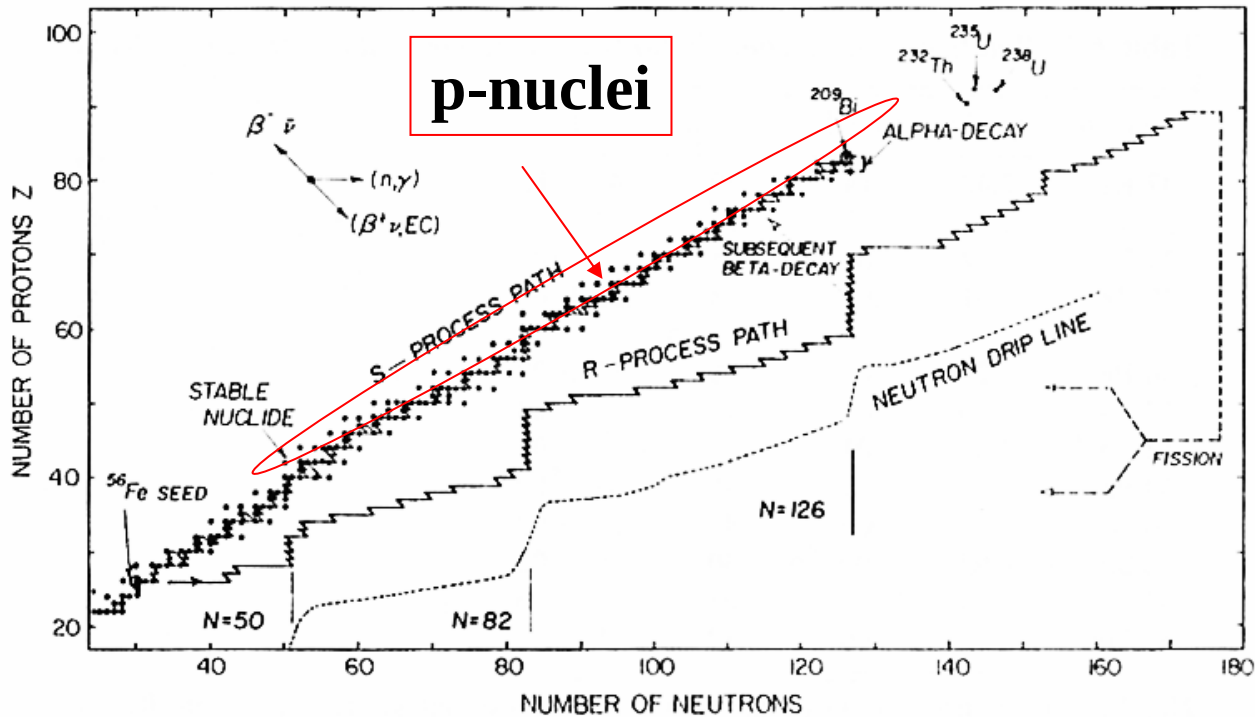
宇都宮弘章（甲南大学）

1. 天体光核反応とは
2. SCW黒体放射光の魅力
3. (γ, n) 反応 放射化実験
4. (γ, α) (γ, p) 反応 直接測定
5. 先端研究拠点事業とSCW放射光
6. ガンマ線源の将来像

重元素の起源

✂ 35 中性子欠乏安定核

$^{74}\text{Se} - ^{196}\text{Hg}$



p-プロセス

Arnould (1976)

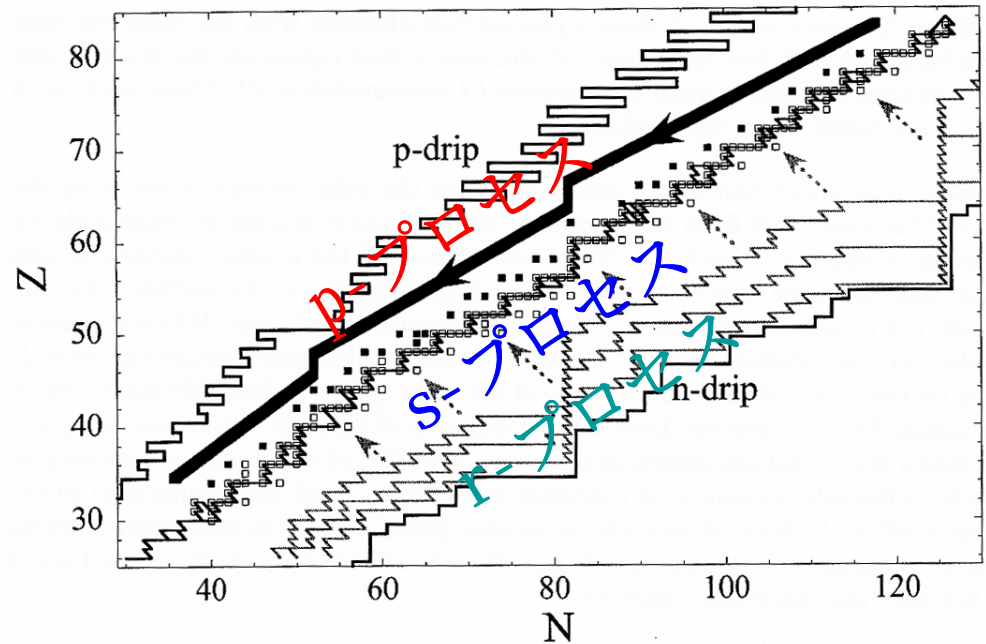
Woosley & Haward (1978)

Rayet et al. (1995)

Rauscher et al. (2002)

Arnould & Goriely (2003)

Utsunomiya et al. (2005)



⌘ $(\gamma, n)(\gamma, p)(\gamma, \alpha)$ 光核反応と n-, p-, and α - 捕獲反応

⌘ 2000 核種, 20000 反応 : 弱い相互作用による核変換を含む

⌘ 温度 : 15 ~ 35 億ケルビン

⌘ 有力な宇宙環境: 超新星爆発前の重い星の O/Ne 層 または Type II 超新星爆発の O/Ne 層

実験室での天体光核反応率

P. Mohr (2000)

基底状態にある原子核の光核反応

$$\lambda(T) = \int_0^{\infty} c n_{\gamma}(E, T) \sigma_{\gamma}(E) dE$$

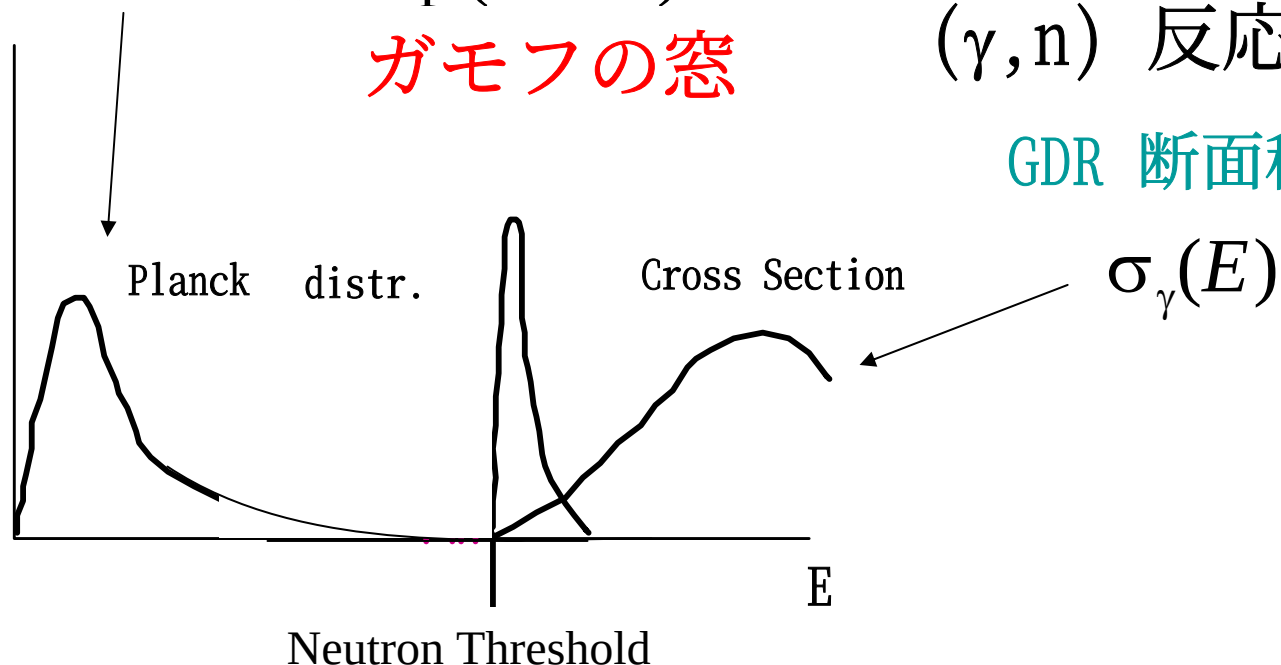
プランク分布

$$n_{\gamma}(E, T) = \left(\frac{1}{\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{\hbar c}\right)^3 \frac{E^2}{\exp(E / kT) - 1}$$

ガモフの窓

(γ, n) 反応

GDR 断面積



AIST

ETL Electron Accelerator Facility

産総研

準単色ガンマ線の生成：第1世代LCSガンマ線

Storage Ring TERAS

Super Conducting Wiggler
Polarized Monochromatic Gamma-Ray Generator
Variable Polarization Undulator

Storage Ring NIJI-IV

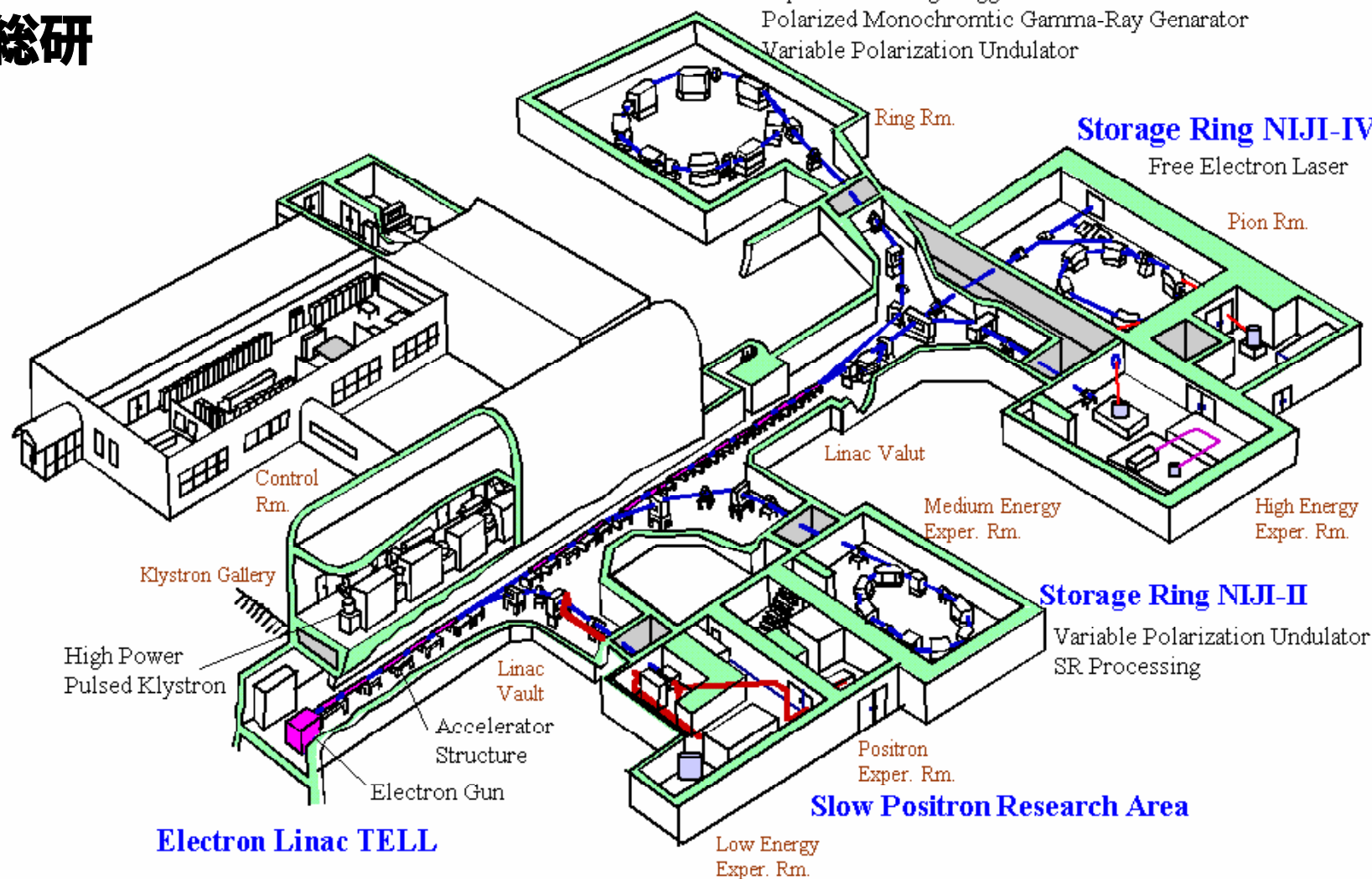
Free Electron Laser

Storage Ring NIJI-II

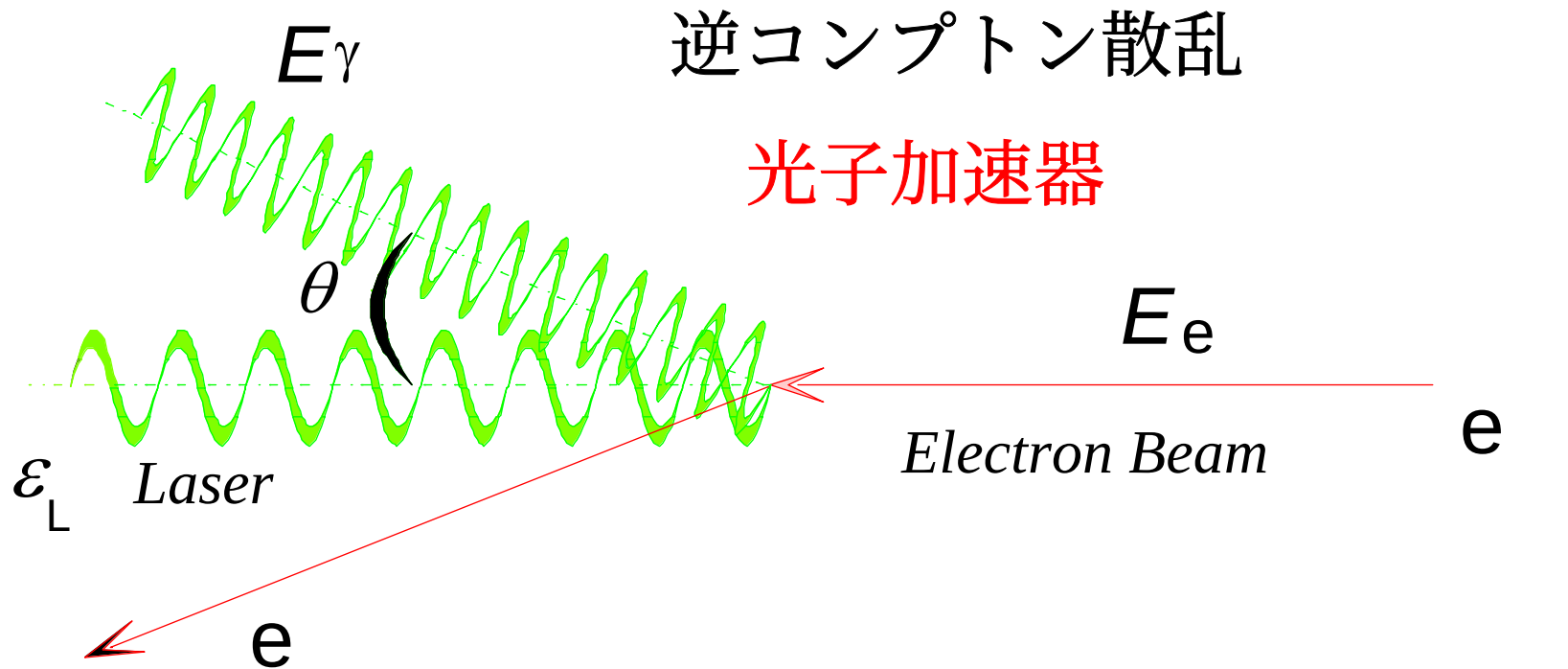
Variable Polarization Undulator
SR Processing

Slow Positron Research Area

Electron Linac TELL



• Energy $E_\gamma = 1 - 40 \text{ MeV}$



$$\gamma = E_e/mc^2$$

$$E_\gamma = \frac{4\gamma^2 \varepsilon_L}{1 + (\gamma\theta)^2 + 4\gamma\varepsilon_L/(mc^2)}$$

⌘ エネルギー広がり

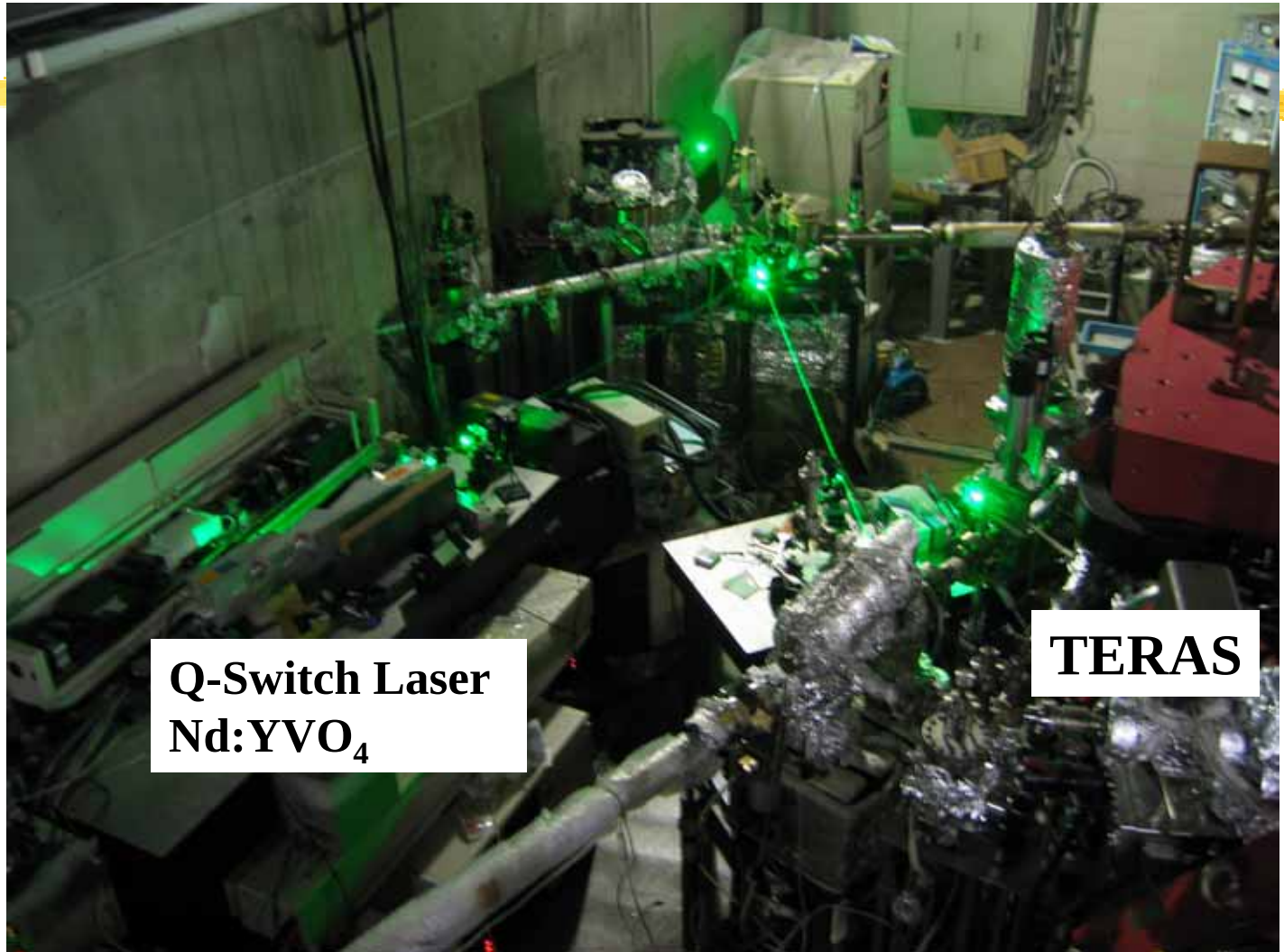
$$\Delta E/E \cong \sqrt{\left(2 \frac{\Delta E_e}{E_e}\right)^2 + (\gamma \Delta \theta)^4}$$

$$\Delta \theta^2 = \theta_e^2 + \theta_c^2$$

電子ビームの角度分散

コリメーターの角度広がり

レーザーシステム

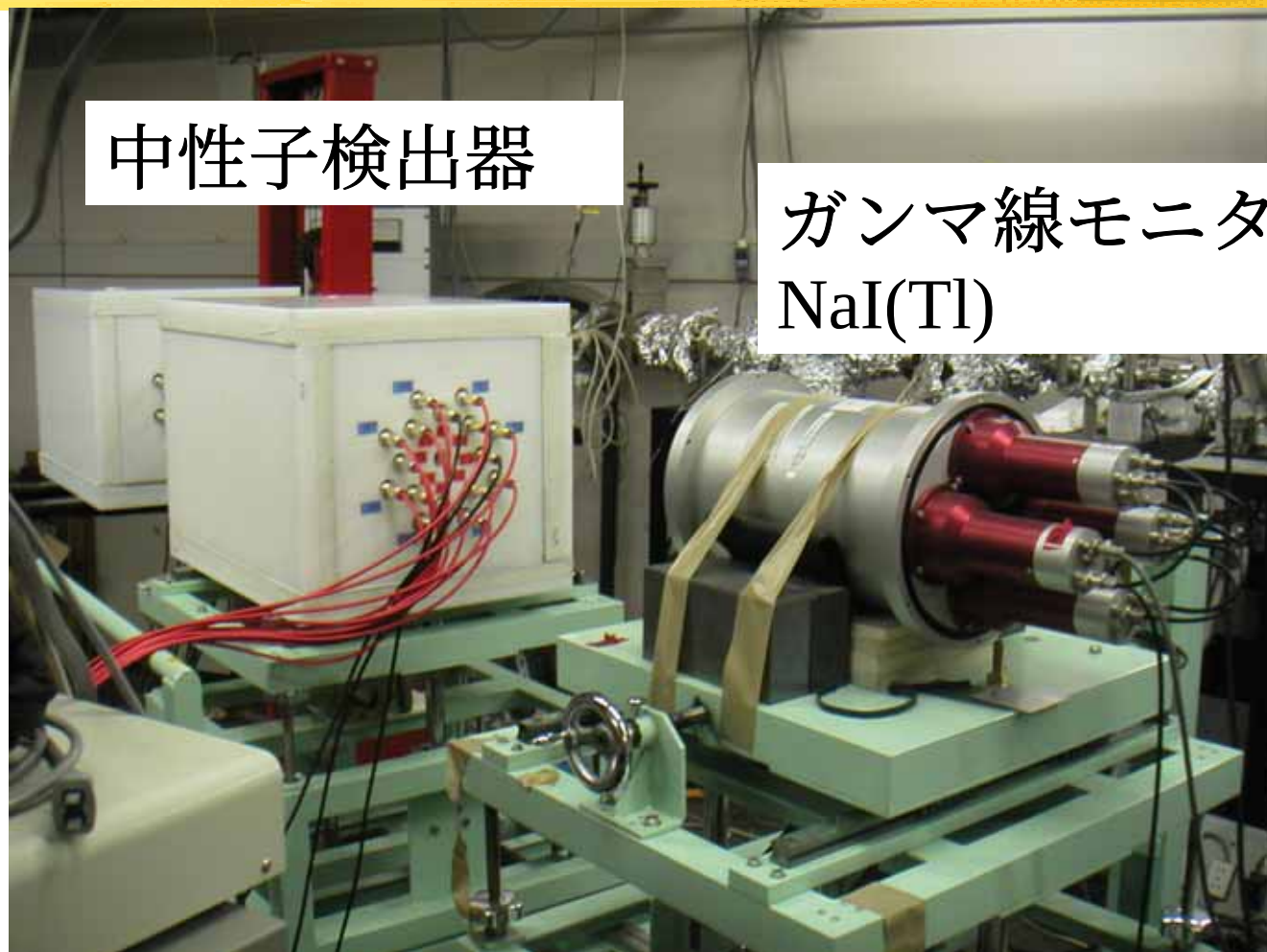


Q-Switch Laser
Nd:YVO₄

TERAS

トリプルリング中性子検出器

20 ^3He counters (4 x 8 x 8)



中性子検出器

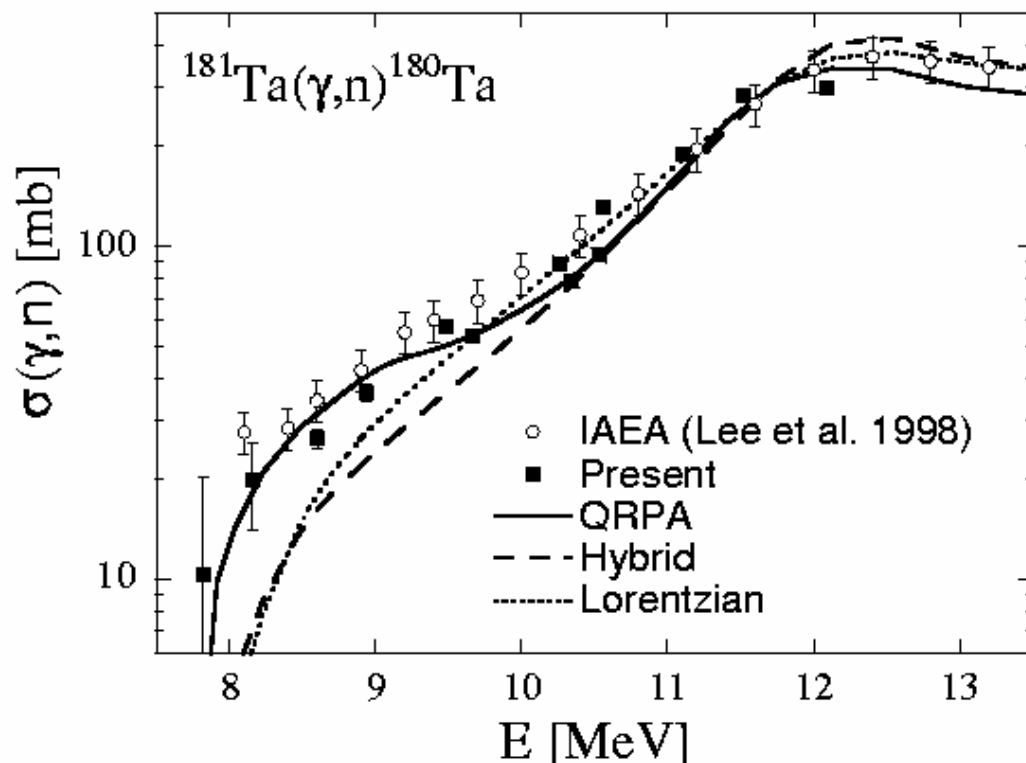
ガンマ線モニター
NaI(Tl)

^{180}Ta (奇奇核)

天然に存在する唯一の核異性体
最稀少同位体

$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ 生成断面積の測定

H. Utsunomiya *et al.* 2003
Phys. Rev. C63, 018801



甲南大学の産総研での研究実績と予定

⌘ (γ, n) 反応

実績 13核種 D, Be-9, Se-80, Zr-91, -94, Pd-108, La-139,
Pr-141, Sm-152, Ta-181, W-186, Re-187, Os-188

予定

Zr全安定5核種(Zr-90, 91, 92, 94, 96)

Se全安定6核種 (Se-74, 76, 77, 78, 80, 82)

Pd核種(いくつか)

Nd全安定7核種(Nd-142, 143, 144, 145, 146, 148, 150)

その他

測定が困難な核種：Ta-180, La-138等（存在量が少ない）

測定が困難な反応：(γ, α)(γ, p)反応（反応断面積が小さい）

光源の属性



- ⌘ 1 強度
- 2 単色性
- 3 エネルギー可変性
- 4 偏光性
- 5 際立った個性 SCW黒体放射光

三大光源と研究スタイルの比較

⌘ 制動放射光 (bremsstrahlung)

TU-Darmstadt, Stuttgart等

高強度連続光

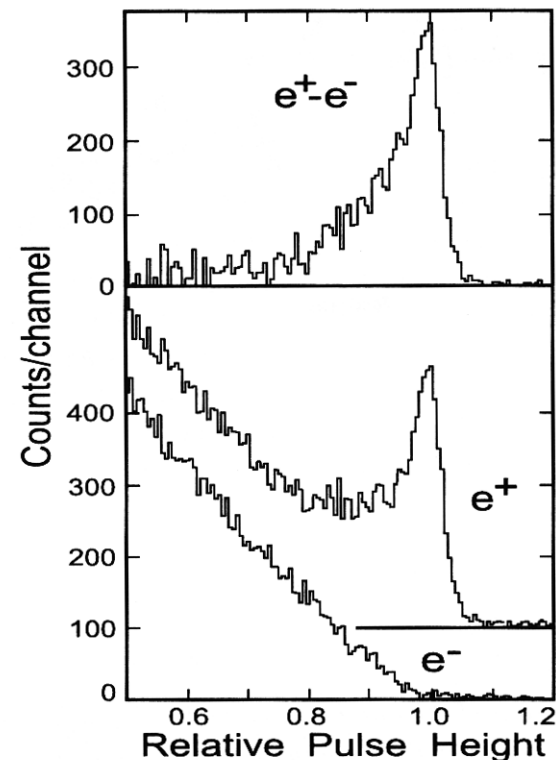
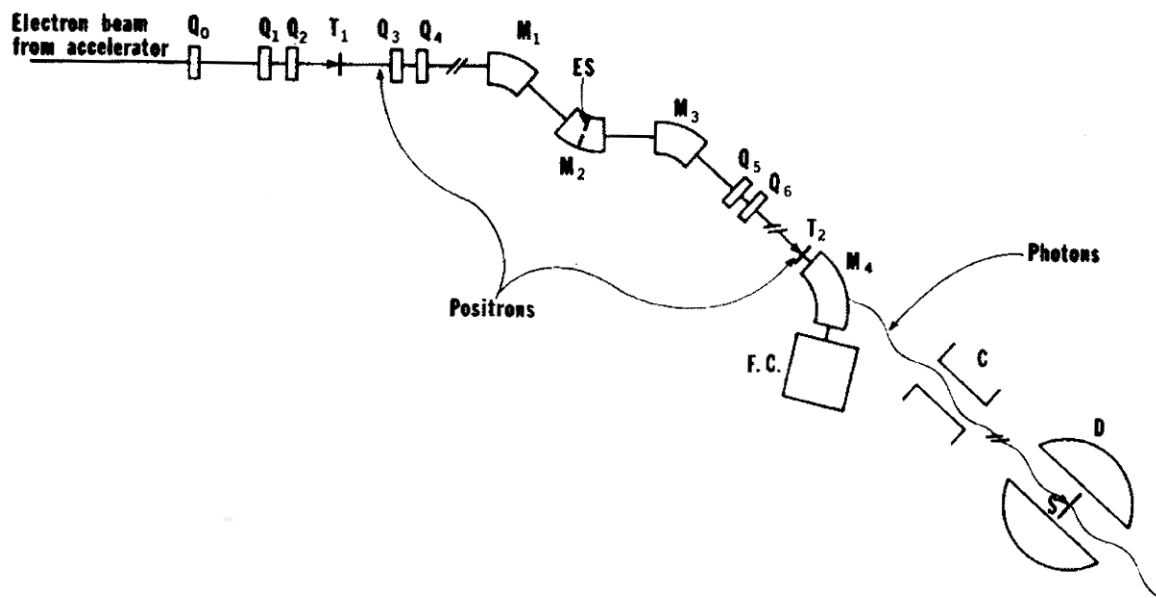
原子核物理研究専用施設として現役であり、研究の生産性を維持している。

$\int n(E) \sigma(E) dE$ をunfoldingするいろいろなデータ処理法が開発されているが、光核反応断面積の励起関数測定には本来不向き。

(γ, γ') NRF実験と放射化実験が中心

⌘ 飛行陽電子対消滅ガンマ線

ローレンスリバモア，サクレ研究所
準単色エネルギー可変
陽電子制動放射のバックグラウンド
1960-80に巨大共鳴の研究で功績を
上げたが現役引退。



⌘ レーザー逆コンプトンガンマ線

産総研，HIGS（Duke大），ニュースバル，佐賀

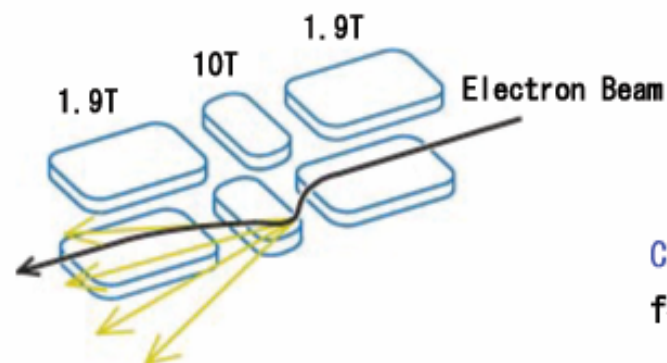
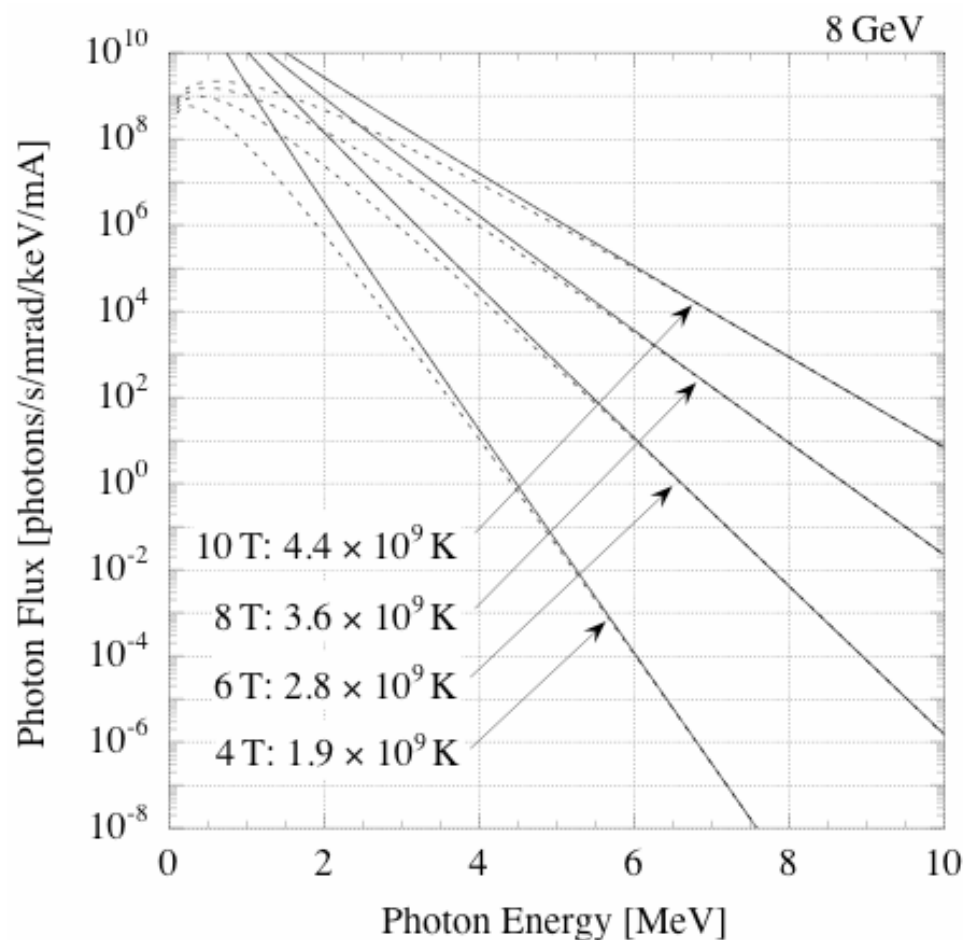
現役でもっとも有力なガンマ線源

準単色エネルギー可変低バックグラウンド 100%偏光

- ・放射光施設内ではマイナーな存在
- ・産総研は第1世代LCSガンマ線、研究実績がある。
- ・NEW SUBARU，SAGAは第2世代LCSガンマ線。本格利用に向けて開発が進められている。
- ・HIGSはFEL逆コンプトンガンマ線を供給。世界で唯一の原子核物理研究専用施設であるが、ビームの安定供給と研究者の体制に問題がある？

⌘ Spring-8 超伝導ウィグラー (SCW) 黒体放射光 オンリーワン (唯一無二の光源)

Utsunomiya et al., 2005
NIMA538, 225



^{180}Ta の光消滅反応

$^{180}\text{Ta}[0.012\%](\gamma, n)^{179}\text{Ta}[T=1.82 \text{ y}]$

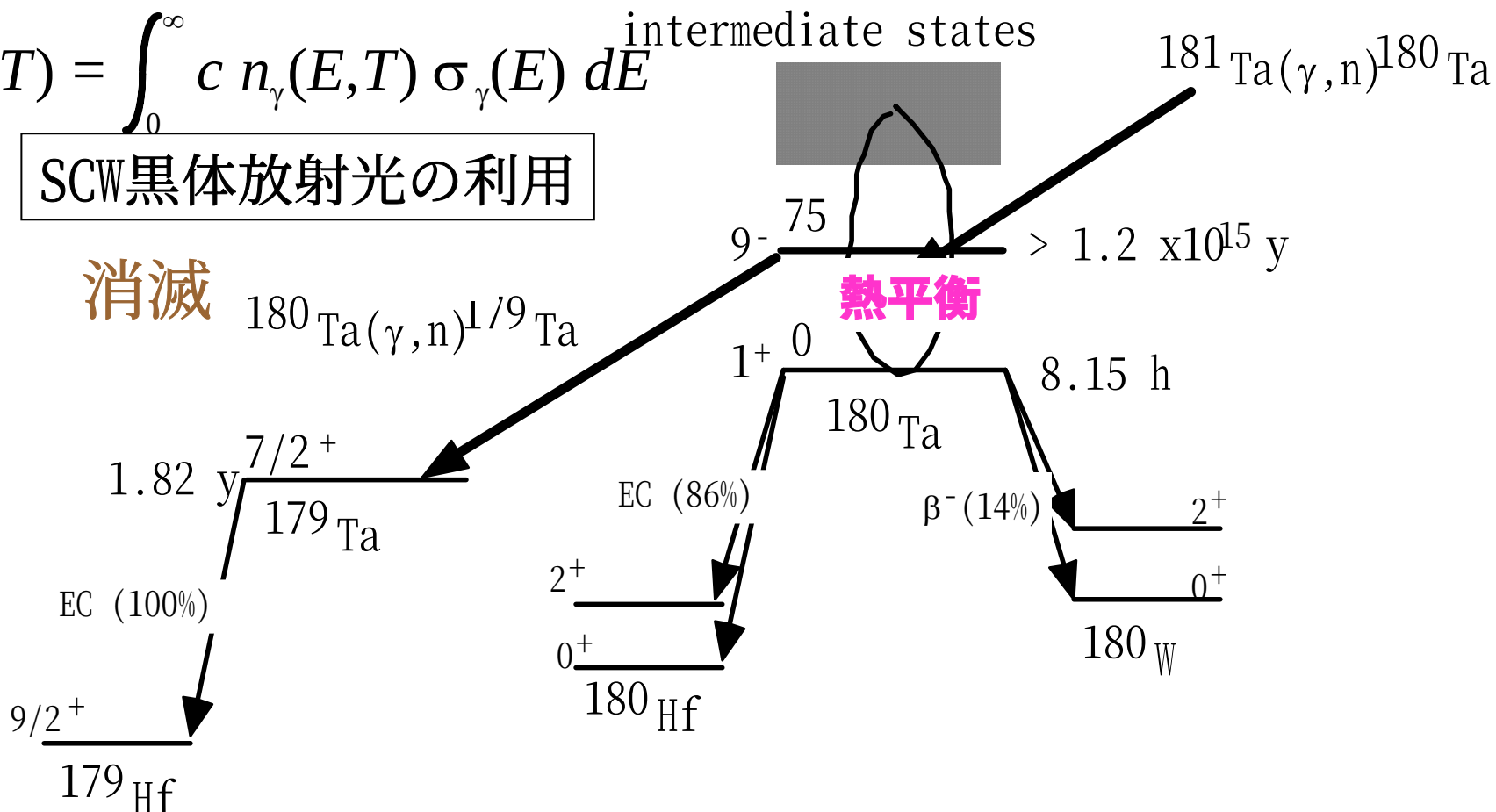
産総研ガンマ線の利用

生成

$$\lambda(T) = \int_0^\infty c n_\gamma(E, T) \sigma_\gamma(E) dE$$

SCW黒体放射光の利用

消滅

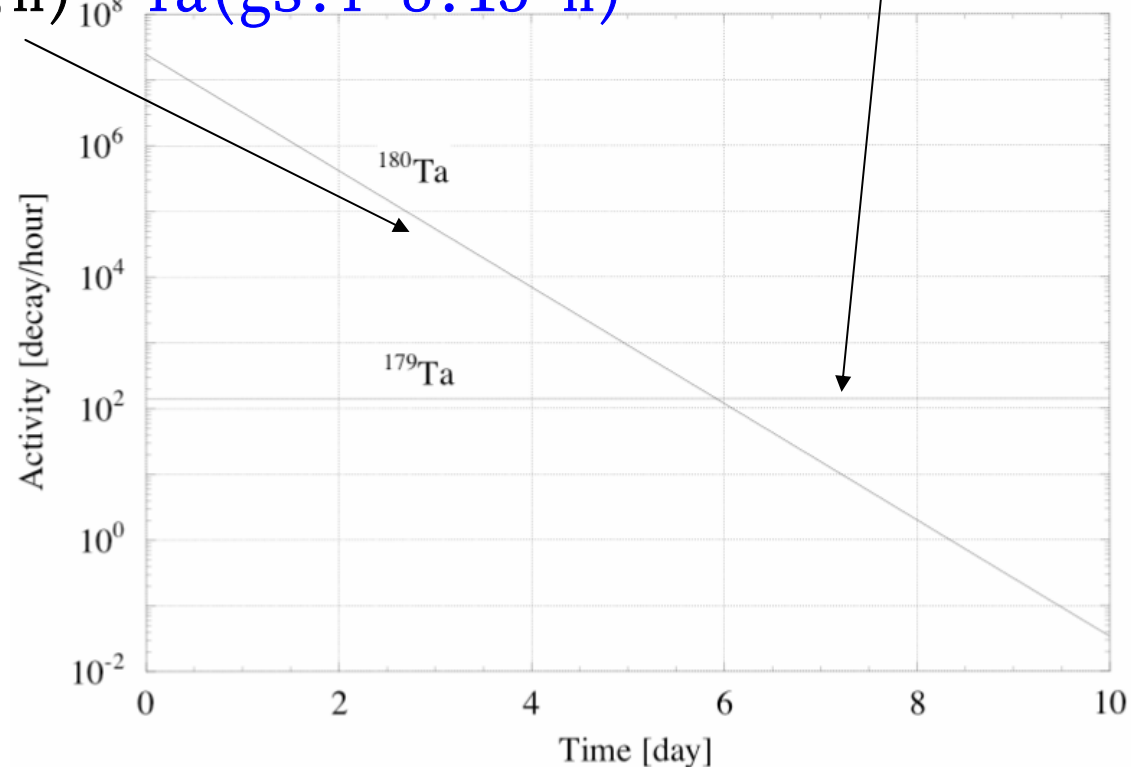


測定の困難な反応

SCW黒対放射光によるTa-180の光消滅

^{180}Ta [0.012%] (γ, n) ^{179}Ta [T=1.82 y]

^{181}Ta [99.988%] (γ, n) ^{180}Ta (gs: T=8.15 h)



測定の困難な反応

SCW黒体放射光による (γ, α) (γ, p) 反応の測定

⌘ **Rauscher&Thielemann ADNDT2004に収録された 2**

3 3 種の光核反応を対象に実験のフィージビリティを調べた結果、

イベントレート $> 10^{1-3}/\text{時間}$

⌘ 35個の (γ, α) 反応が測定可能

⌘ 36個の (γ, p) 反応が測定可能

α, p の直接測定が必要。

宇宙光核物理学の新展開（アフロディテ）：
核反応実験から宇宙物理モデル構築まで

Advances in Astrophysical Photoreactions and Disintegrations (APHRODITE):
from nuclear reaction experiments to astrophysical modeling

研究課題

-  1 宇宙光核反応実験
-  2 新光源開発と実験技術
-  3 核反応理論と宇宙物理モデル

 拠点形成型

 世界戦略型への準備
となる共同研究

ベルギー拠点 
ブリュッセル自由大学 

アメリカ拠点 
デューク大学 

その他の共同研究

ノルウェー オスロ大学 
ギリシャ デモクリトス 
ハンガリー アトムキ 

   甲南大学（日本拠点）

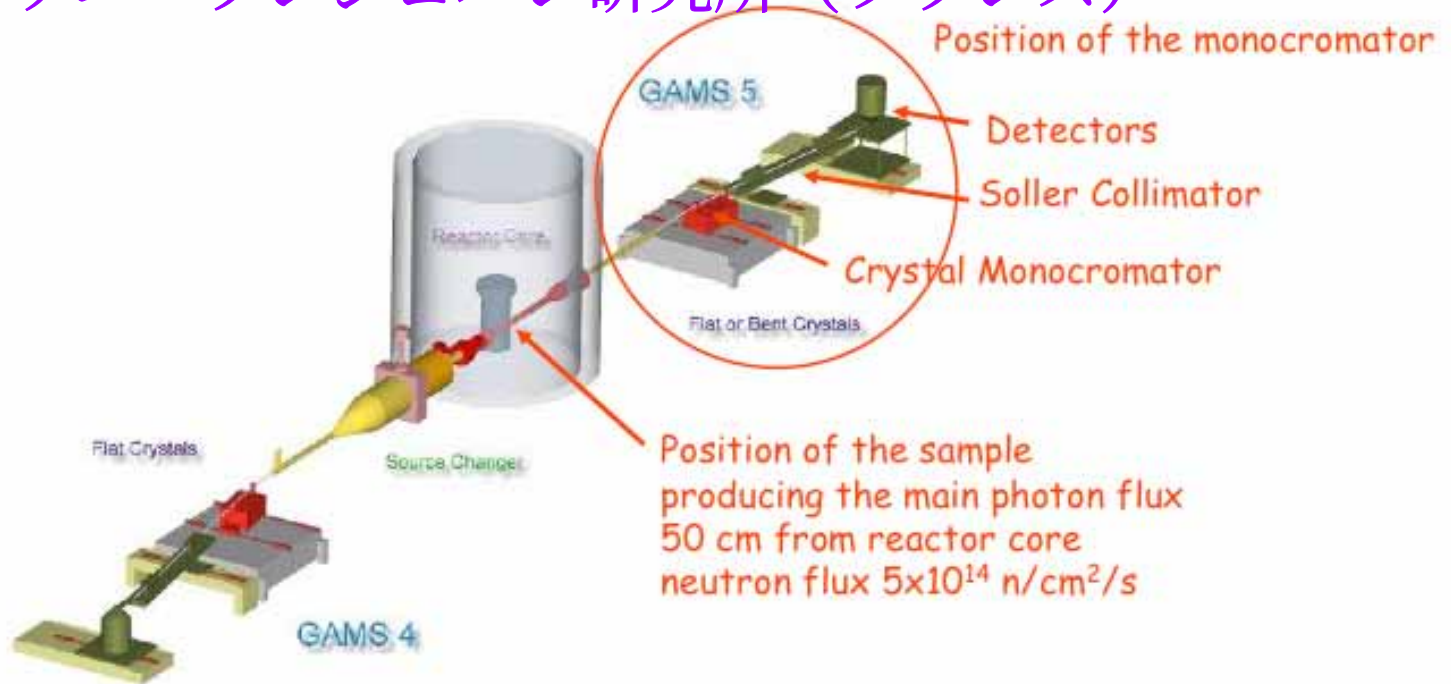
 産総研
 スプリング8
 九州大学

ドイツ拠点 
ローゼンドルフ研究所 

フランス拠点 
ラウエ・ランジュバン研究所 

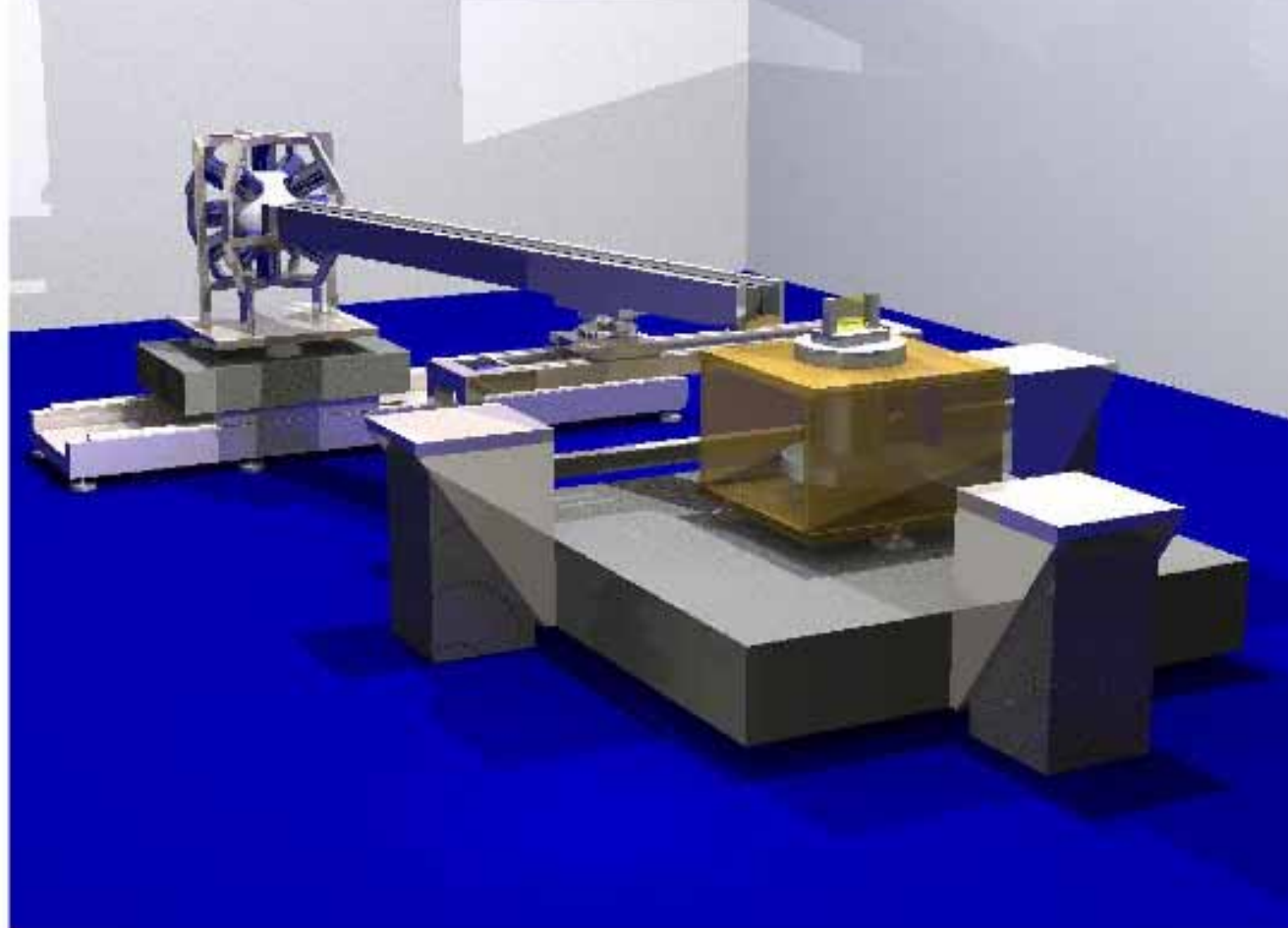
単色中性子捕獲MeVガンマ線

ILL: ラウエ・ランジュバン研究所 (フランス)



開発中: Jentschel, Mutti & Boerner

MeVガンマ線用モノクロメーターとコリメーター系



✂ 展望

- 1 新光源の開発により光核反応研究の新たな展開が期待できる。

個性的な光源

SCW黒体放射光 (SPring-8)

単色MeVガンマ線 (ラウエ・ランジュバン研究所)

- 2 日本では、今後5年が第1世代LCSガンマ線から第2世代LCSガンマ線への転換期: NEW SUBARUとSAGA

強度と単色性。エネルギー可変性 波長可変OP0レーザー。

- 3 SPring-8にSCW黒体放射光ビームラインが稼働し、NEW SUBARUとSAGAの放射光施設に第2世代LCSガンマ線ビームラインが稼働すれば、日本が従来の原子核物理研究の壁を打ち破って光核反応の研究をリードすることができる。

高い研究の生産性を誇る複数の研究グループが形成されること。

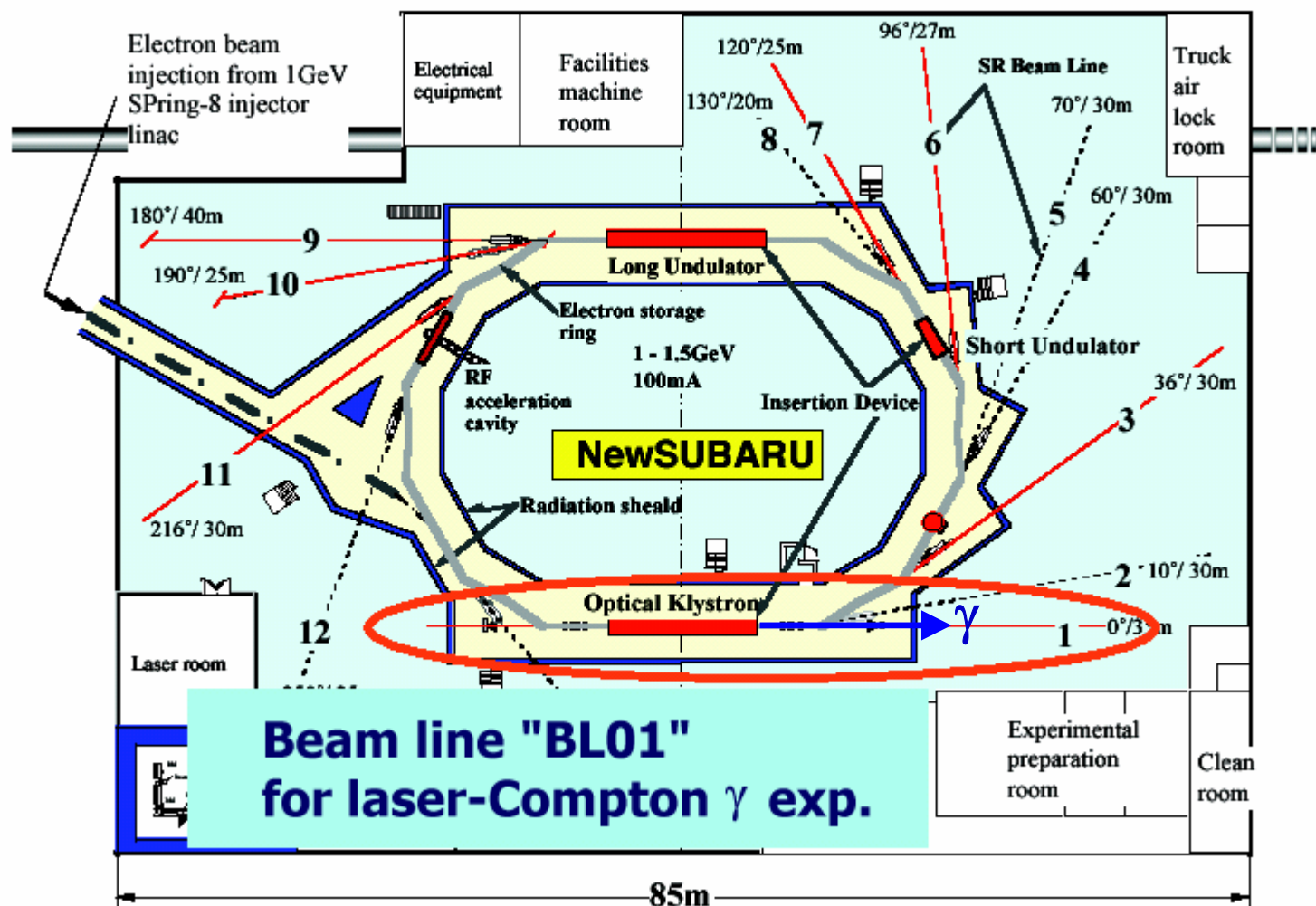
人材育成がカギ。物理で済み分け (天体核、原子核、原子力核データ)。

共同研究者

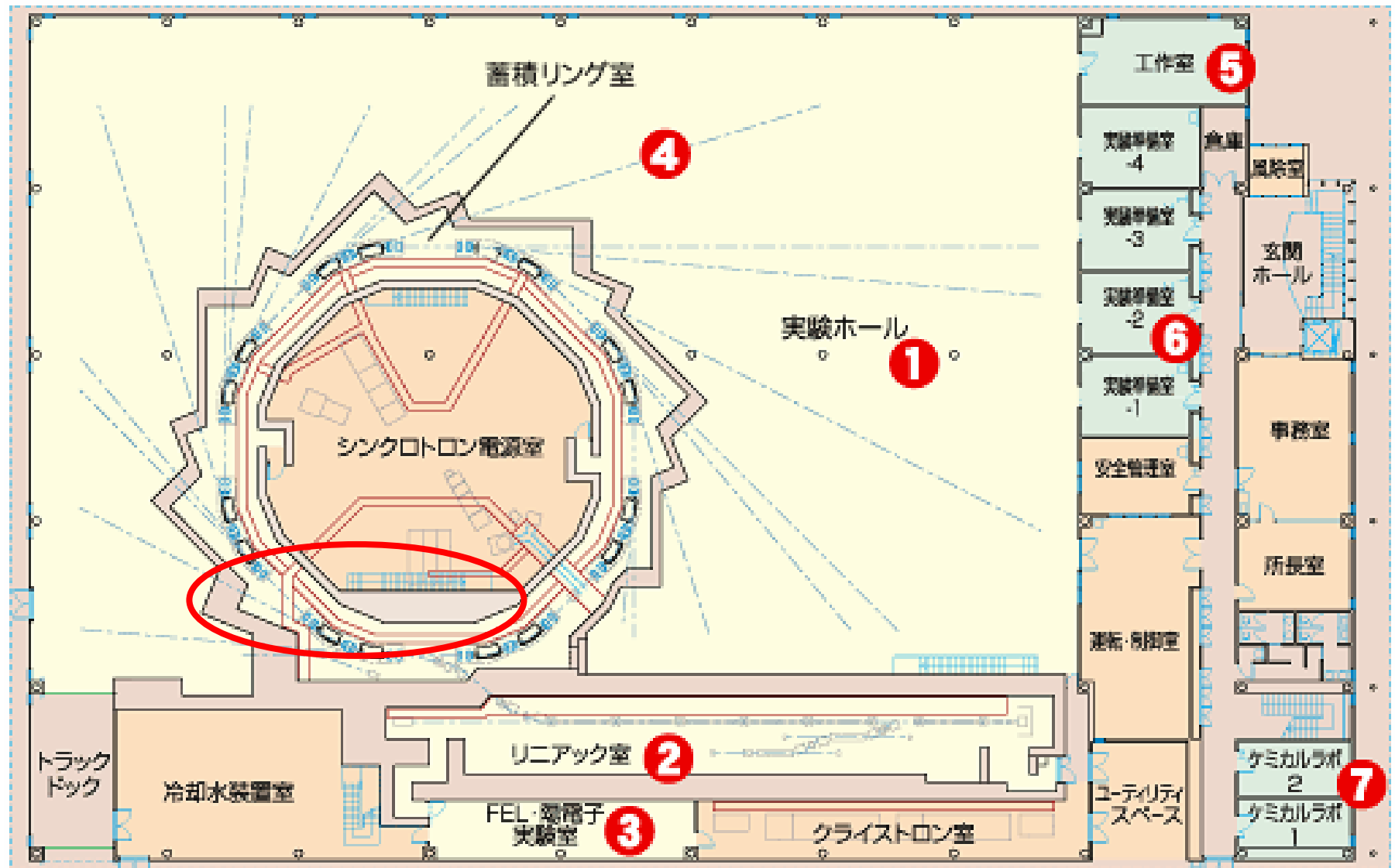


- 1) <Konan> S. Goko, A. Makinaga, H. Akimune, T. Kaihori, S. Houhara
- 2) <AIST> H. Toyokawa, K. Kudo, A. Uritani, Harano, T. Matsumoto
- 3) <Kyoto> H. Ohgaki
- 4) <Numazu> K. Sumiyoshi
- 5) <NAO> T. Kajino
- 6) <Darmstadt> P. Mohr
- 7) <SPRING-8> H. Yonehara, K. Soutome, N. Kumagai, H. Ohkuma,
- 8) <Texas A&M> Y.W. Lui
- 9) <Univ. Libre de Bruxelles> M. Arnould, S. Goriely, M. Rayet
- 10) <Orsay> E. Khan
- 11) <JAEA> H. Harada, F. Kitatani, K.Y. Hara, T. Hayakawa, H. Shizuma

ニュースバル レーザー逆コンプトンガンマビームライン



佐賀リングでのLCSガンマビームライン構想



天体光核反応率

熱的に励起された原子核

$$\lambda_{\gamma n}^*(T) = \frac{\sum_{\mu} (2J^{\mu} + 1) \lambda_{\gamma n}^{\mu}(T) \exp(-\varepsilon^{\mu}/kT)}{\sum_{\mu} (2J^{\mu} + 1) \exp(-\varepsilon^{\mu}/kT)}$$

(nucleus in state μ)

$$\lambda_{\gamma n}^{\mu}(T) = \int_0^{\infty} c n_{\gamma}(E, T) \sigma_{\gamma n}^{\mu}(E) dE$$

γ 透過係数

Hauser-Feshbach model cross section

$$\sigma_{\gamma n}^{\mu}(E) = \pi \chi_j^2 \frac{1}{(2J_i^{\mu} + 1)(2J_j + 1)} \sum_{J^{\pi}} (2J + 1) \frac{T_{\gamma}^{\mu}(J^{\pi}) T_n(J^{\pi})}{T_{\text{tot}}(J^{\pi})}$$

$$T_n(J^{\pi}) = \sum_{\nu=0}^{\omega} T_{\nu n}^{\nu}(J^{\pi}) + \int_{\varepsilon^{\nu}}^{\varepsilon^{\text{max}}} \int_{J^{\nu}, \pi^{\nu}} T_{\nu n}^{\nu}(\varepsilon^{\nu}, J^{\pi}) \rho(\varepsilon^{\nu}, J^{\nu}, \pi^{\nu}) d\varepsilon^{\nu} d\pi^{\nu} dJ^{\nu}$$

中性子透過係数

核準位密度