

2. IAEA 2nd International Conference on Nuclear Data for Reactors

田中 茂也(原研)

表記のコンファレンスは1970年6月15日~19日にフィンランド・ヘルシンキ郊外の Otaniemi で開催された。参加者の総数は約170名, その内米国から22名で最も多く, それ以外では英国, フランス, 西ドイツ, スウェーデンからの参加者が多く, 各々10数名を数えた。日本からは原研の西村氏と私, 東電の大井氏の3名が出席した。その他, ENEA/OECD, EURATOM IAEA, JINP の組織から24名が参加した。

参加者の総数が比較的にじままりしている割には, 投稿された論文の数は可成り多く, 座長は会議中, 時間の超過を常に気にしていた。内容は, 次のような Session, および Topic に分けられ, ウラニウム・プルトニウムに関する核データが可成り多く報告された。

- Session I Topic a. General Aspects of the Needs and Uses
for Nuclear Data (5)
- Session II Topic a. continued (1)
Topic b. Cross Sections and Techniques for High
Precision Neutron Data Measurements (8)
- Session III Topic c. Nuclear Data in the Thermal and Resonance
Energy Regions $A > 220$ (8)
- Session IV Topic c. Continued (3)
Topic c. Nuclear Data in the Thermal and Resonance
Energy Region $A < 220$ (8)
- Session V Topic d. Nuclear Data Above the Resonance Energy
Region $A > 220$ (11)
- Session VI Topic d. Continued (1)
Topic f. Nuclear Data Above the Resonance Energy
Region $A < 220$ (8)
- Session VII Topic g. Relationships of Microscopic and
Integral Data (11)
- Session VIII Topic h. Evaluation Problems and Methods (10)

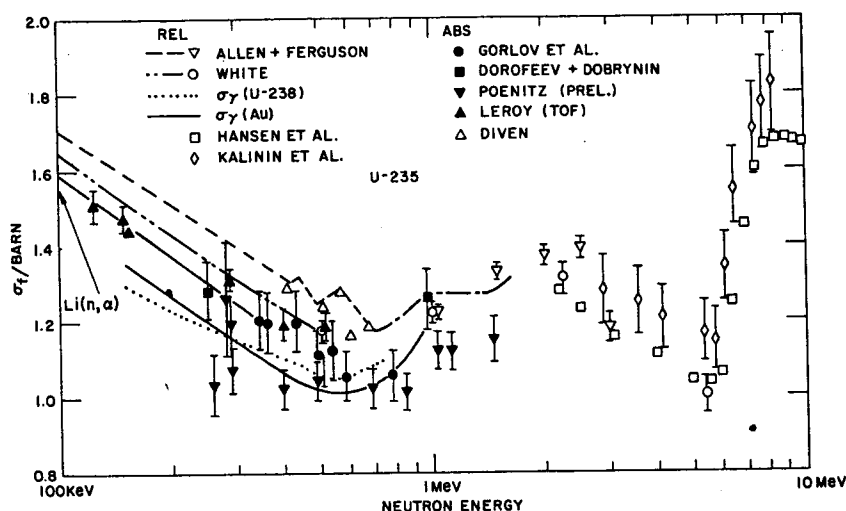
(上記カッコ内の数字は、oral presentation の数である。一つの oral presentation で数個の投稿論文について発表する場合があるから、論文の数はもつと多くなる。)

西村氏もこのコンファレンスに関する記事を書かれる予定なので、ここでは主に Session III~VI について述べ、更にその他の Session について私の興味を引いた 2, 3 のトピックスについて述べることにする。必ずしも Session の順序通りでないことをおわびする。最後に、コンファレンスの終了後に訪問したカールス・ルーエ研究所とハーウエル研究所で見聞したことなどを簡単に述べる予定である。

Topic d. Nuclear Data Above the Resonance Energy Region

A > 220

ここでは先ず Poenitz によつて "Recent Experimental Data of Heavy Nuclei" (CN-26/111) という表題で、最近のこの方面の研究の survey talk がなされた。全般に、可成り多くのデータが報告されているにもかかわらず、異つた測定者間のデータのバラつきは大きい。例えば ^{235}U の核分裂断面積 (CN-26/111, Fig. 15) は彼自身 260keV ~ 1.6MeV 領域で、今までの値よりも 25% 近い小さい値を出して問題を提起した。 $\bar{\nu}$ のエネルギー依存性については、数 100keV あたりにあると思われている構造が話題となつた。(CN-26/111, Fig. 17) これに対する理論的解釈はまだなされていないようである。しかしながら、測定値自体も、異つた測定者間のデータのバラつきは大きい。



CN-26/111

Fig. 15. The Fission Cross Section of U-235 above 100 keV

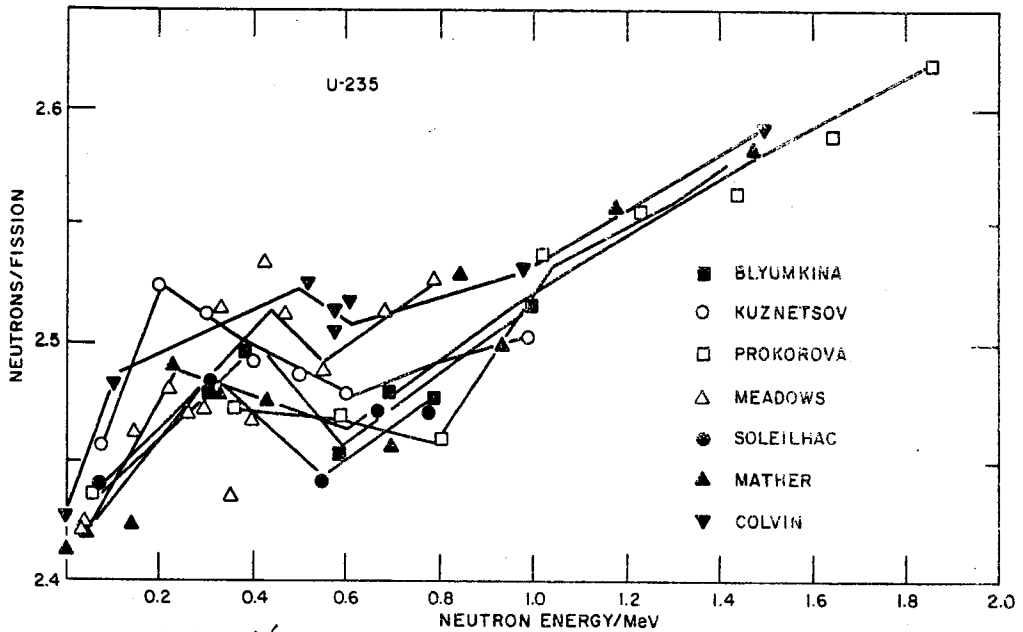
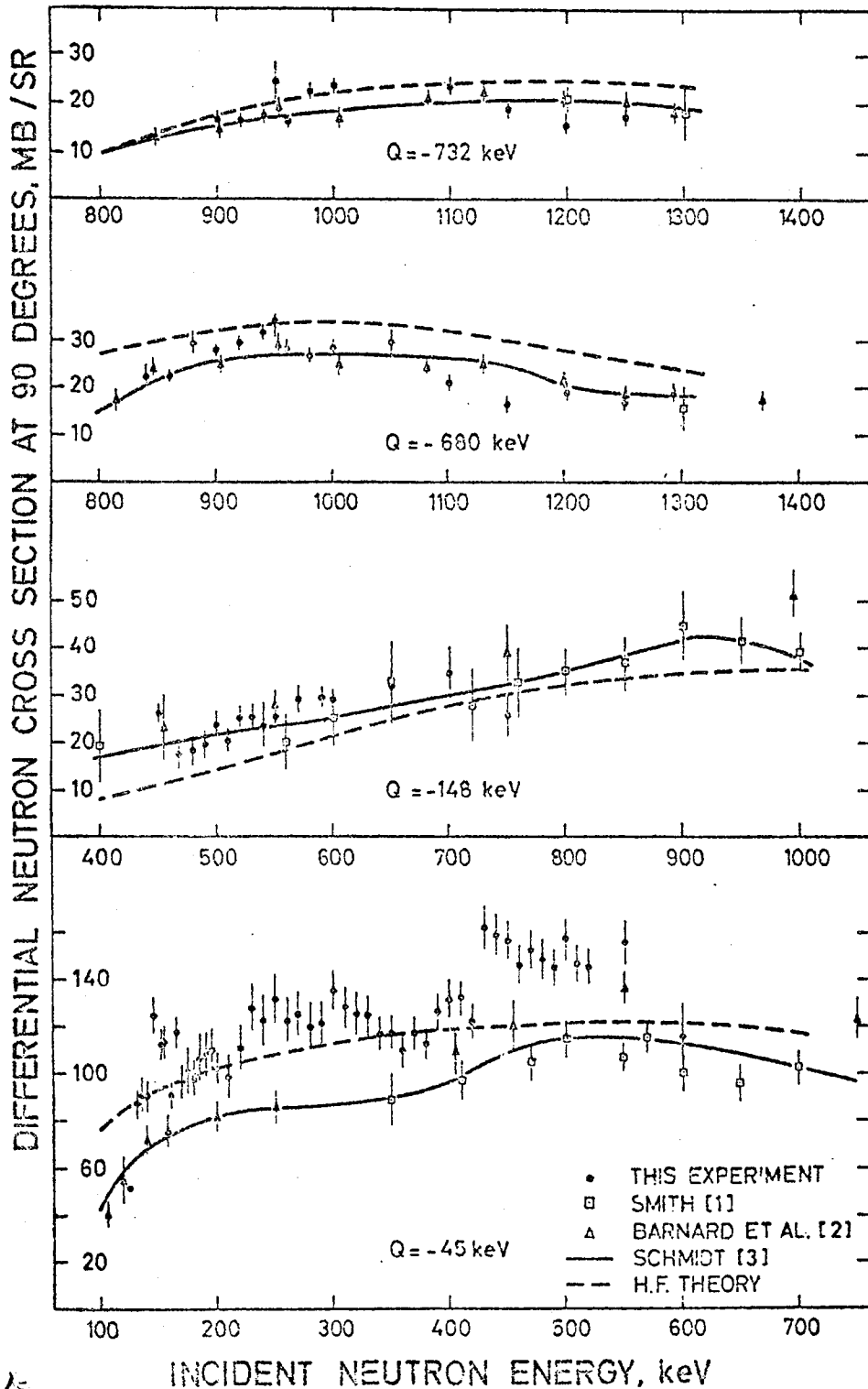


Fig. 17. The Energy Dependence of $\bar{\nu}$ (U-235)

データの不一致の問題は Reitmunn によつて報告された ^{238}U の非弾性散乱のデータ (CN-26/5, Fig. 1) に対しても起つている。彼らは ^{238}U の 45 keV レベルに対する 90° 方向の中性子非弾性散乱に対して、今までの Smith や Barnard et al. の値よりも 40% 程度大きな値を与えた。

その他の報告としては、Soleilhac ら (CN-26/68) や Kopsch ら (CN-26/12) による ^{235}U , ^{238}U に対する全断面積の測定では、可成り分解能をあげるることによつて、fluctuation が観測されたことを報告した。Bowman ら (CN-26/41) は ^{235}U の核分裂断面積の絶対値よりはむしろ分解能に留意して、 $E_n = 1.5 \sim 200$ keV の範囲で実験を行なつた。そして intermediate structure とみなされる非常に多くの構造を見出した。

この Session は Davey による "Status of Important Heavy Element Nuclear Data Above the Resonance Energy Region" (CN-26/112) によつて締め括られた。彼は ^{235}U の核分裂断面積の値の重要性、 ^{238}U の吸収断面積の必要性を強調し、更に ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu の σ_{nr}/σ_{nf} の値がまだ不明であること、またこれらの Pu 同位体の 1.5 MeV 以下の $\bar{\nu}$ の値に対しても、 ^{235}U の $\bar{\nu}$ にみられるような構造 (上記 Poenitz の

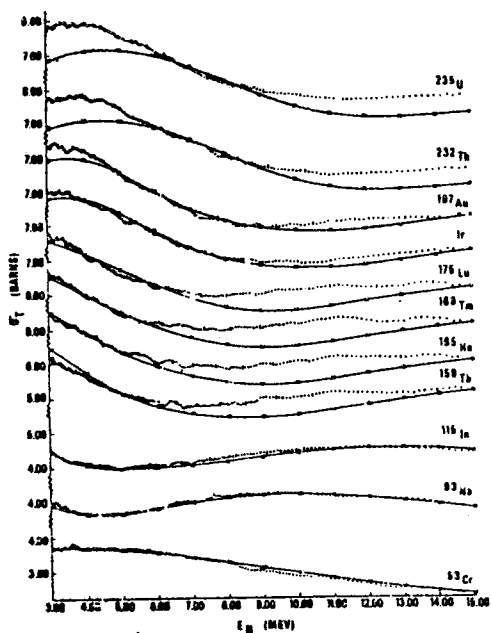


CN-26/5

Fig. 1 Differential inelastic scattering cross sections at 90° for four levels in ²³⁸U.

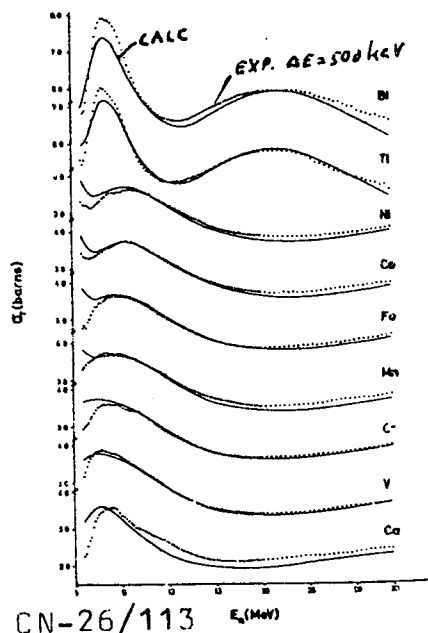
survey talk の節参照)があるかどうかを確かめるべきだといっている。

Topic f. Nuclear Data Above the Resonance Energy Region :
 A < 22 : "Introductory I" (CN-26/113) として KFK の Cierjacks による最近のこの方面の報告が survey された。全断面測定には Linac, cyclotron などを用いて連続スペクトルを持つた中性子源を用い time-of-flight 法によるものが大部分である。最近の傾向としては高分解能化, 中性子エネルギーの高エネルギー化が目立っている。CN-26/113, Fig. 7, Fig. 8 は多くの核種に対する全断面積を通常の光学模型の計算結果と比較したもので, 非球形核に対しては, 実験値との大きな不一致が見られる。これらと原子核の deformation を考慮した結合チャンネル理論による計算と比較したら, 更に興味ある結果が得られよう。CN-26/113, Fig. 11, A. B. Smith らによる ANL の 51V に対するデータである。これらは励起函数における fluctuation に対して, door-way state に関するパラメータを光学模型理論にとり入れた "intermediate optical model" で適合させる試みを行なっている。



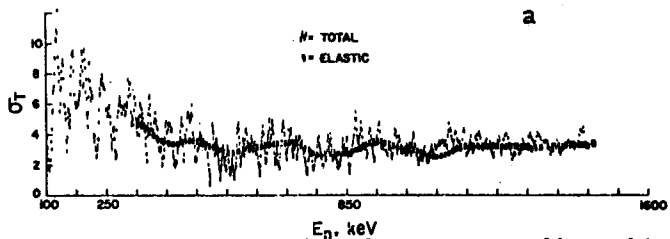
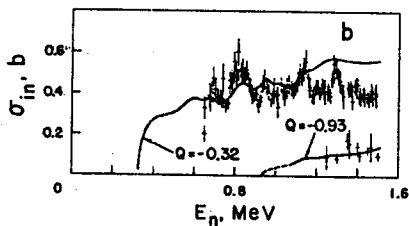
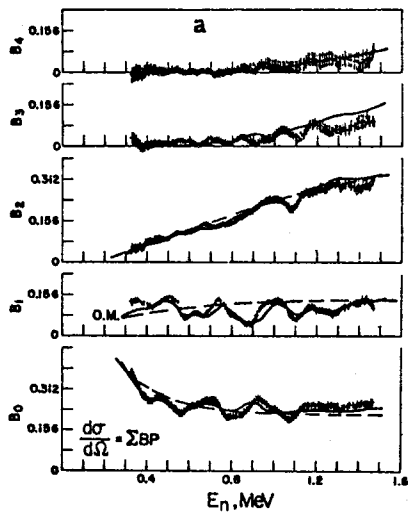
CN-26/113

Fig. 7 Comparison of total cross sections with the non-local optical model predictions



CN-26/113

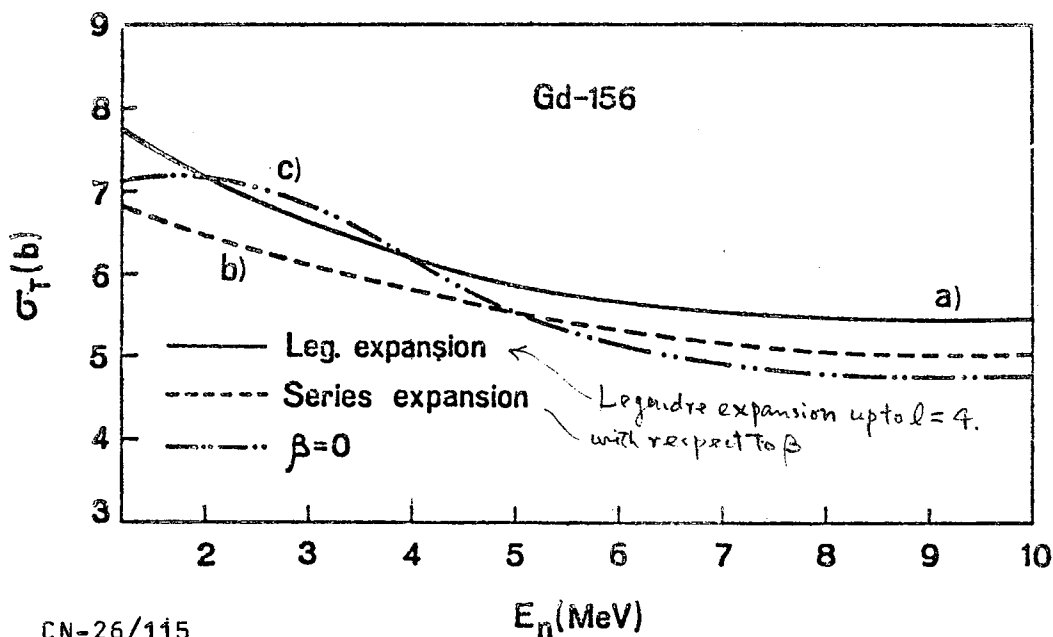
Fig. 8 ibid.



CN-26/113 a) Some neutron scattering data on vanadium obtained by A.B.Smith
 Fig.11 b) Inelastic scattering cross sections of ^{51}V for the excitation of the 0.32 and 0.93 MeV levels. Curves are calculated with an intermediate optical potential modified by the presence of two energy dependent factors classifying door-way states. See also Fig. 12.

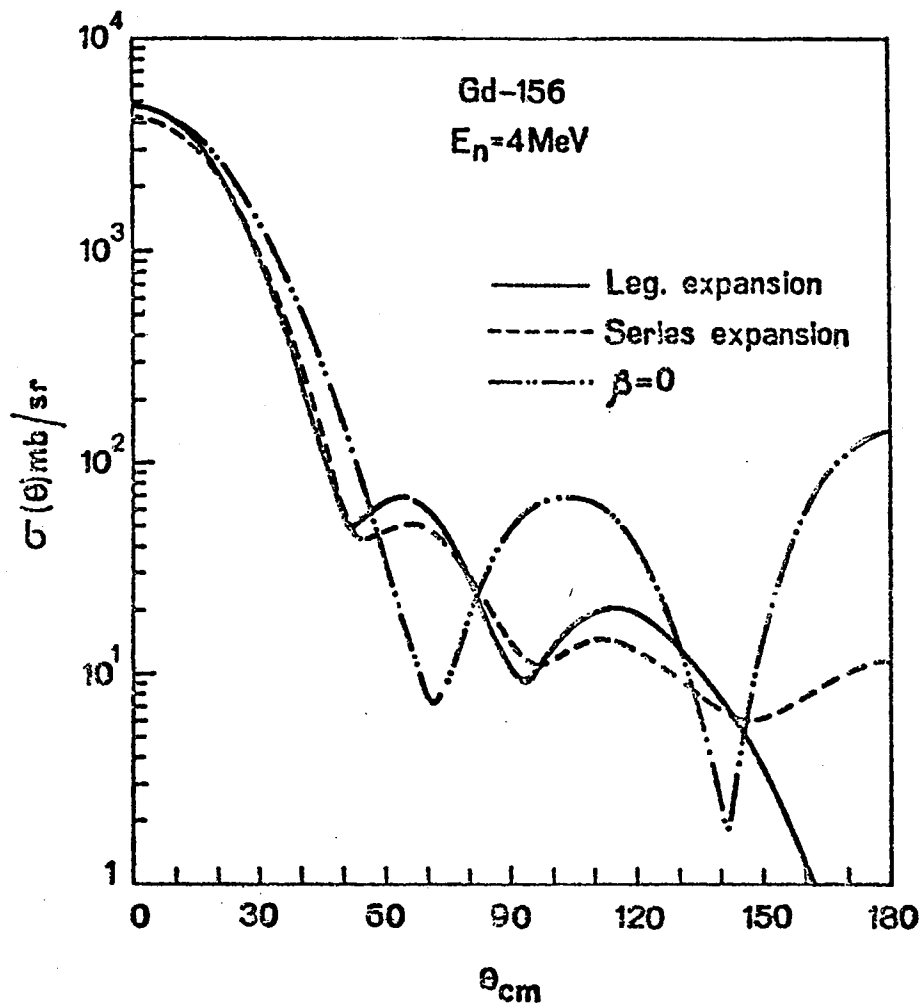
この Session にはわれわれの中性子散乱に関する報告 (CN-26/29, 30, 31) やスウェーデンの Wiedling らによる中性子散乱によるもの (CN-26/53, 54, 55, 56) も含まれている。理論的解析として、われわれは非弾性散乱に対する直接過程と複合核過程との競争、複合核過程反応に対する level-width fluctuation and resonance interference effect の有無、および door-way state resonance を含む可能性のある intermediate structure について報告したのに対し、スウェーデンの人達は主に光学ポテンシャルのパラメータ・サーチ、それによる Hauser-Feshbach 理論を用いた計算の非弾性実験データへの fit を報告した。

最後に Benzi によつて彼の計算結果の報告 (CN-26/115) が行なわれた。彼は結合チャンネル理論を用いて ^{156}Gd に対する全断面積 (CN-26/115, Fig. 1) 弾性散乱 (CN-26/115, Fig. 2), 非弾性散乱 (CN-26/115, Fig. 3, Fig. 4) を計算し、これらの計算結果は、計算に用いるパラメータ、計算の条件に大きく依存することを指摘した。(ただし Fig. 4 に示したように、光学ポテンシャルの虚部の深さと diffuseness Wd, b のとり方の違いによる結果は非常に小さい場合もある。)



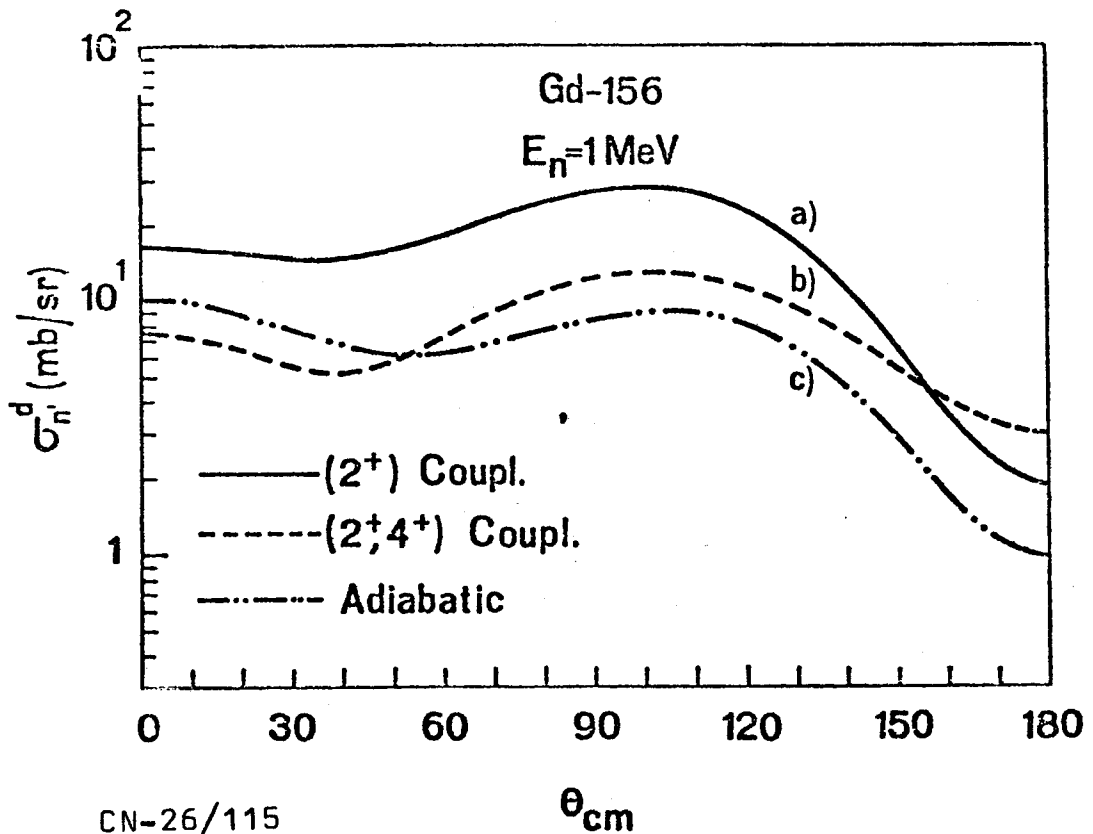
CN-26/115

Fig. 1 Theoretical total cross sections of ^{156}Gd calculated with the same set of parameters, but assuming different approximations for the generalized optical-model potential. Optical parameters are the same as those adopted by Abee and Resen. $\beta_2=0.35$.



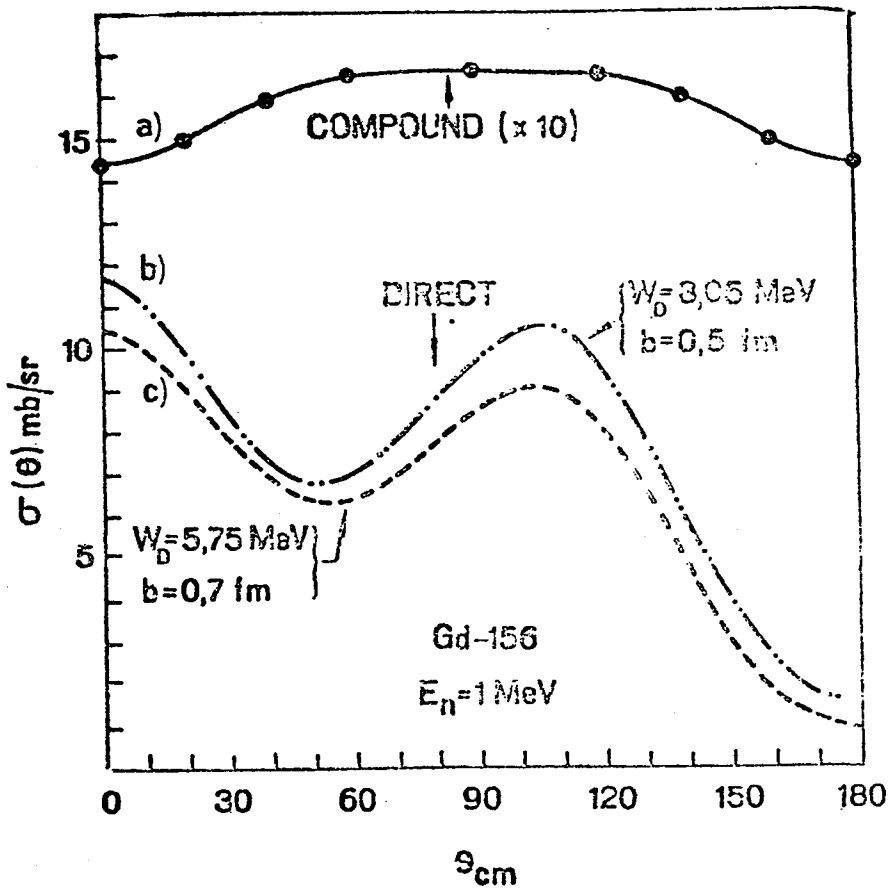
CN-26/115

fig. 2 Theoretical shape elastic cross sections of ¹⁵⁶Gd at 4 MeV.



CN-26/115

Fig. 3. Theoretical direct inelastic scattering angular distributions for ^{156}Gd at 1 MeV. The curves were obtained under different hypotheses concerning the channel coupling.



CN-26/115

fig. 4 An example of the effects of the "geometrical ambiguity" on the calculation of the inelastic scattering cross sections. The results are identical up to the 3rd significant figure.

これらの結果から、彼は実験値のないところの断面積を計算によつて estimate することは、可成り系統的な広範囲の計算を行なつた上で estimation を行なうといふのでなければ、非常に危険であることを警告した。

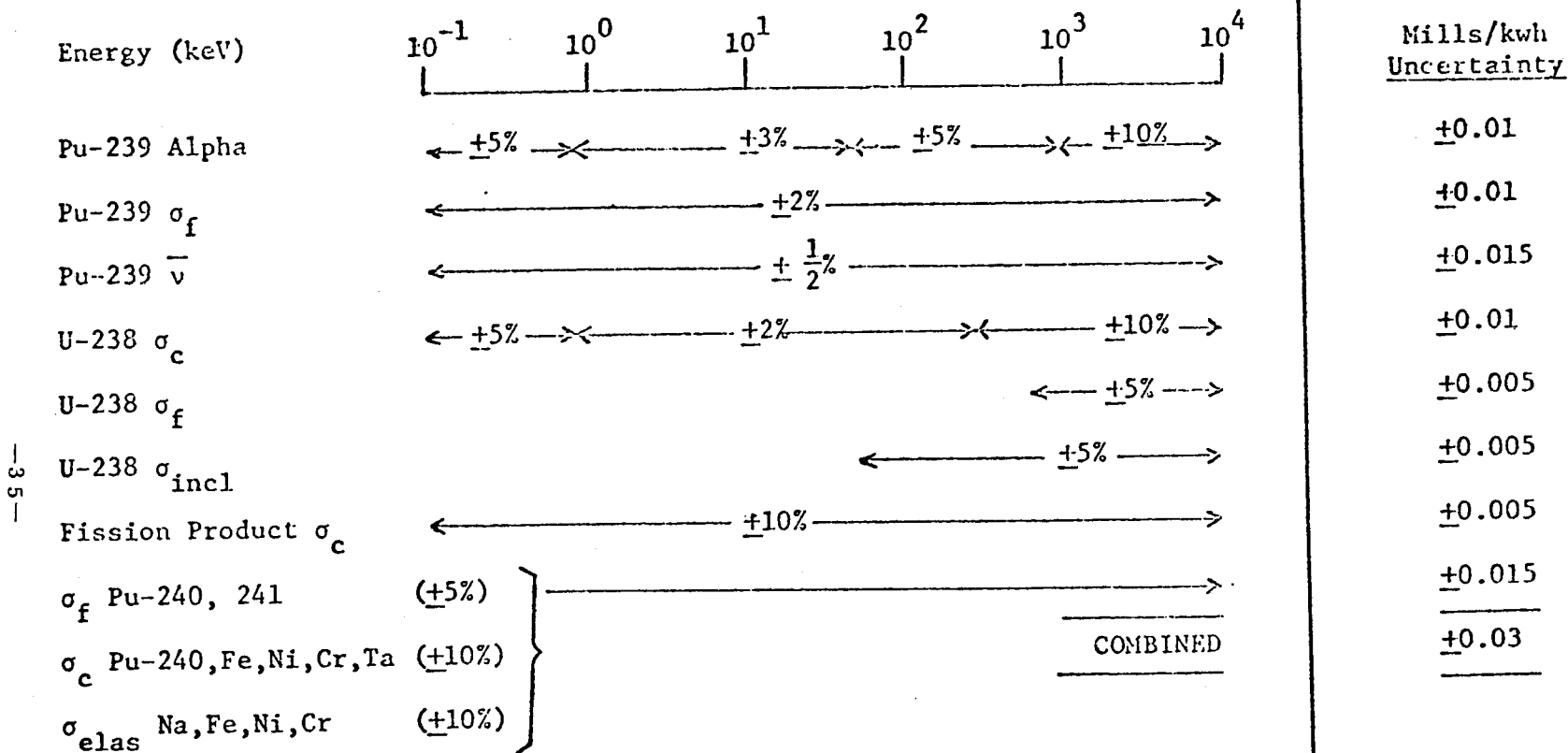
Topic c. Nuclear Data in the Thermal and Resonance Energy Region : $A > 220$ この Session では先ず James (Harwell) による review talk (CN-26/107) が行なわれた。CN-26/107, Fig. 1 は plutonium fuelled fast reactor の fuel cost の不確定さを 0.03 mill/kwh におさめるために要求されるミクロな核データの精度を示す。これに対して、例えば ^{239}Pu の核分裂断面積は $E_n \leq 20\text{keV}$ の範囲で CN-26/107, Table III に示すような値が報告されていて、9 グループによる測定値の機械的な平均を行つたときの誤差でも 2% という値よりは可成り大きいことがわかる。

CN-26/107, Fig. 3, Fig. 4 は ^{230}Th に対する核分裂断面積および分裂片の角分布を示す。これらは fission potential barrier に於ける second minimum に関する研究である。 ^{230}Th の場合には浅い second minimum の中に undamped vibrational level を設定することによつて説明出来る。(Fig. 3 の実線) 角分布の方からは second minimum のところで大きく deform した核の慣性能率の値を求めることが出来る。この値は基底状態における核の慣性能率の約 5 倍であると estimate された。(Fig. 4 の実線) CN-26/107, Fig. 5 は ^{234}U に対する核分裂巾 (Γ_f) のエネルギー依存性を示す。こゝで実線は 700 eV 以下の個々の Γ_f から deduce された平均の巾 (Γ_f) の Lorentzian energy dependence を示す。この研究によつて fissioning isomer level の compound-nucleus level への結合の強さが議論された。

この Session で、その他の興味ある報告の例として、地下核爆発によるキューリウム同位体や ^{239}Pu の、核分裂、吸収、散乱、全断面積の精度よい測定 (CN-26/45, 46) や、Rae (Harwell) らによる $^{238}\text{U}(n, \gamma)$ 反応による ^{239}U の isomeric level の寿命の測定 (CN-26/36) などが挙げられるが、こゝでは説明を省略する。

Topic a. General Aspects of the Needs and Uses for Nuclear Data の最後に Lynn による "Progress in understanding neutron interactions with nuclei" という題名で、理論的な話があつた。彼は実験値を再現する理論計算について、先ず歴史的発展に振れ、更に従来の Hauser-Feshbach 理論による

TARGETS FOR DATA ACCURACY



-35-

CN-26/107

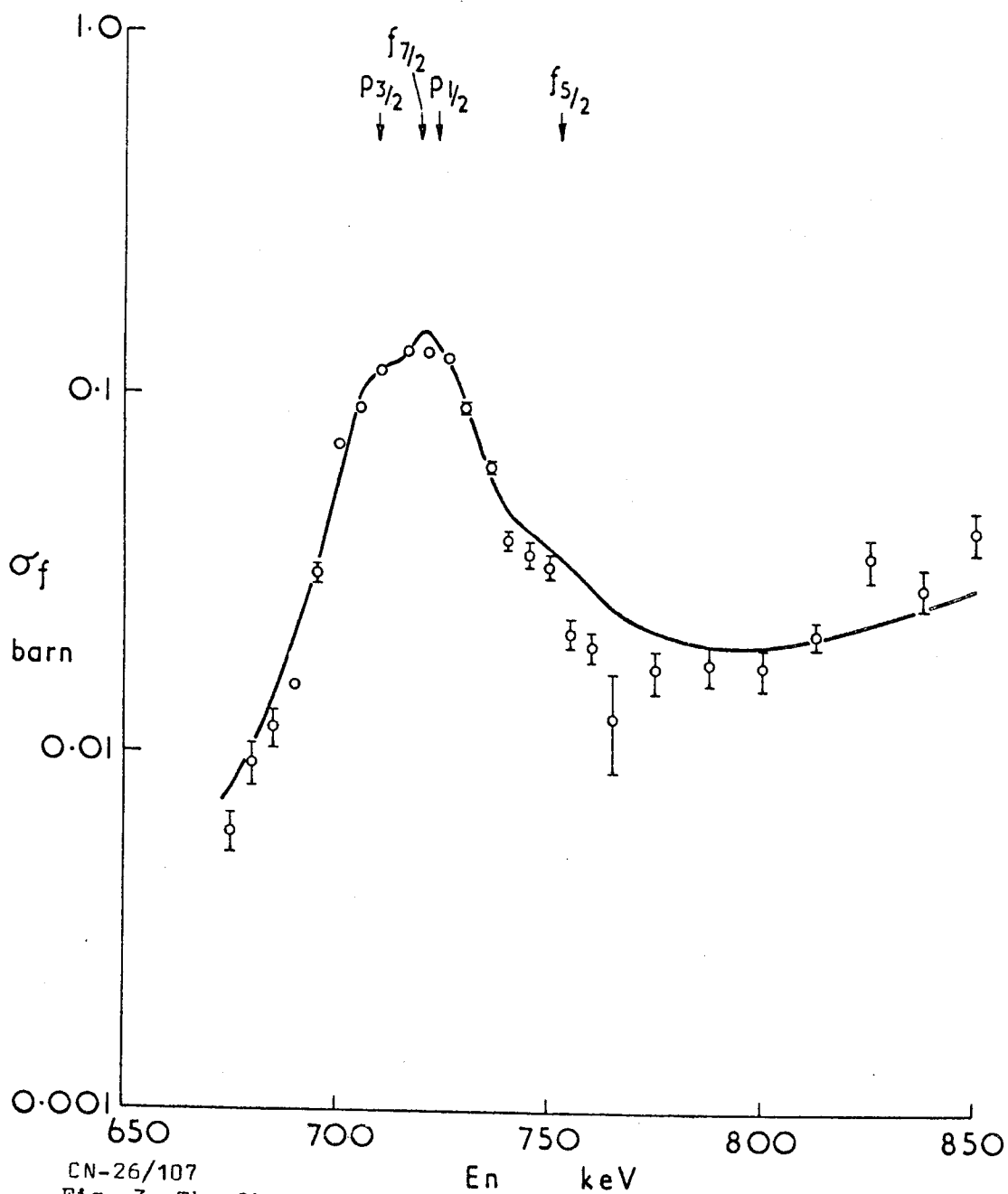
Fig. 1 A diagram showing the accuracy requirements which will bring the fuel cost uncertainty of plutonium fuelled fast reactors to 0.03 mill/kwh. This shows the relevance of heavy element cross sections in the resonance region. Taken from Greebler et al.

CN-26/107 Table III
²³⁹Pu fission cross-section data from 10 eV to 20 keV^(a)

Energy range keV		1	2	3	4	5	6	7	8	9	< σ_f >	Error %
10	20	3.065			2.213		1.688	1.885	1.713	1.82	2.064	10.4
9	10	2.334			2.137		2.006	1.979	1.833	1.90	2.031	3.6
8	9	2.066			2.462		2.347	2.481	2.221	2.22	2.299	2.8
7	8	1.912			2.232		2.210	1.997	2.243	2.15	2.124	2.6
6	7	2.693			2.203		1.980	2.012	1.947	2.17	2.167	5.2
5	6	2.793	3.207		2.710		2.194	2.206	2.383	2.18	2.525	5.9
4	5	2.665	2.919		2.313		2.343	2.376	2.512	2.39	2.503	3.3
3	4	3.490	3.381		2.744		2.782	3.089	2.799	3.22	3.072	3.7
2	3	3.363	3.864		2.641		2.896	3.355	3.288	3.32	3.247	4.5
1	2	3.979	5.410		3.832		3.706	4.535	4.251	4.49	4.315	5.1
0.9	1	7.703	8.108		8.278		7.025	8.689	7.425	8.28	7.930	2.7
0.8	0.9	6.212	6.029		4.360		4.119	5.190	5.046	5.13	5.155	5.7
0.7	0.8	5.517	6.357		5.195		4.756	6.033	5.966	5.43	5.608	3.7
0.6	0.7	3.715	5.252		3.941		3.688	4.779		4.54	4.319	6.0
0.5	0.6	10.75	16.12		14.66		13.80	15.75	16.93	15.43	14.77	5.2
0.4	0.5	10.05	10.61		9.105		8.175	9.849	9.941	9.60	9.619	3.1
0.3	0.4	9.822	12.85		8.352		7.217	9.037	10.54	8.63	9.493	7.2
0.2	0.3	17.47	20.82		18.25		15.59	18.02	20.46	18.06	18.38	3.7
0.1	0.2	19.61	21.65	21.92	17.82	21.78	17.07	19.18	21.80	18.09	19.88	3.3
0.09	0.1	27.68	37.42	35.71	26.10	35.35		31.74	34.93		32.70	5.0
0.08	0.09	66.35	80.40	73.16	61.48	72.69		69.03	66.89		70.00	3.3
0.07	0.08	63.52	70.20	68.22	59.54	67.80		65.57	64.71		65.65	2.0
0.06	0.07	53.81	63.96	60.24	54.92	59.75		57.25			58.32	2.6
0.05	0.06	71.81	77.36		72.32	75.53		77.94	72.78		74.62	1.5
0.04	0.05	26.14	28.47	27.25	24.62	27.17			25.99		26.61	2.0
0.03	0.04	3.798	2.679	3.802	2.156	3.337			4.586		3.39	10.5
0.02	0.03	32.81	36.46	33.39	42.07	32.53			31.24		34.75	4.7
0.01	0.02	103.82		109.17		105.97					106.32	1.5

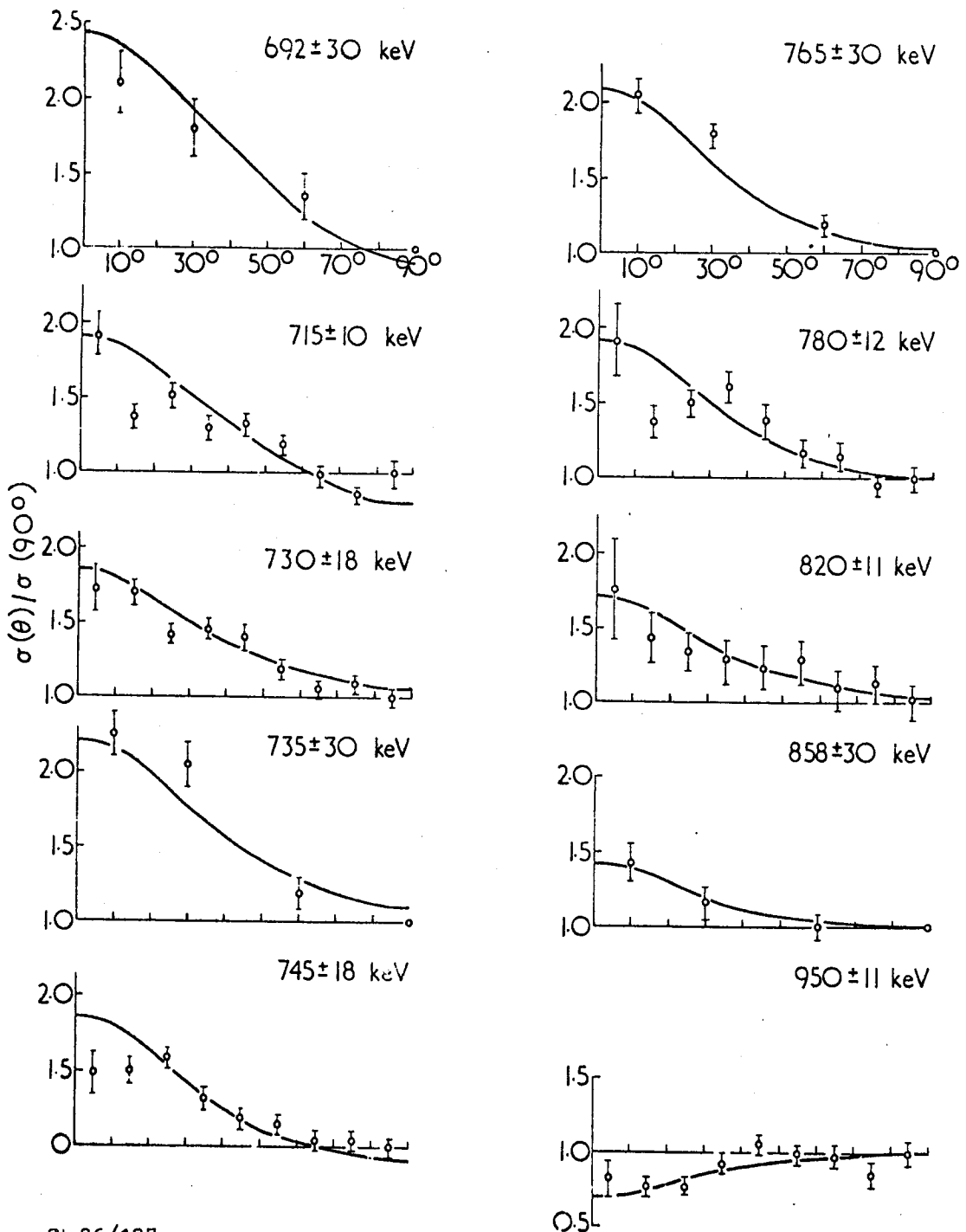
(a) This table gives energy weighted average fission cross-sections for the energy ranges shown.

Column number	SCISRS key or reference	Column number	SCISRS key or ref.
1	TF ANLGEN2 15*127 58I	6	TF HAR EAN UK 96 68J
2	SGS SACCSAL SM60/13 65C	7	TF SAC CR 267 901 68J
3	GS SACWBLONS ET AL.66B	8	James - to be published
4	TF LASCNCS FF12 66C	9	Gwin. et al. ORNL TM 2598
5	5TF-SACCPAR ND 70 66J		



CN-26/107

Fig. 3 The fission cross section of ^{238}Th between 600 and 850 keV measured with an energy resolution of 5 keV. The resonance at 715 keV is attributed to a vibrational level in the second fission potential barrier minimum and the solid line is a theoretical fit based on the rotational band structure indicated.



N-26/107

Fig. 4 Fission fragment angular distributions for $^{230}\text{Th}(n,f)$ between 692 and 950 keV. Distributions with four data points are the measurements of Vorotnikov et al. The solid lines is a theoretical fit for the rotational band structure indicated in Fig. 3. These results are from James et al. and provide an estimate of the moment of inertia.

結果の不確さを指摘し, fine structure resonanceの reduced width 間の相関の程度によつて約2倍の違いを生ずることを計算で例示した。(CN-26/105, Fig. 2 参照)

Topic g. Relationships of Microscopic and Integral Data では integral data の重要性が強調された。しかしながら, microscopic cross section の測定はまだまだ, integral data の測定にも増して, 重要であるという反論があつた。

Topic h. Evaluation Problem and Method でも可成り多くの報告がなされた。原研・核データ研究室からの evaluation work 2つ (CN-26/28, 27) もここに含まれている。この Session で理論計算を用いた仕事としては, Prince (CN-26/91) のものと, Eriksson (CN-26/52) のものが挙げられる。前者は結合チャンネル理論を用いて fissile および fertile isotopes に対する可成り多くの計算結果を報告した。後者は (n, p) , (n, α) 反応の断面積計算に必要なレベル密度を, BCS法をとり入れた shell model に基づいて計算するという方法を試みた。この計算はまだ断面積を求めるに到っていないが, 取り上げる核種の選択が適当であれば, よい結果が得られよう。

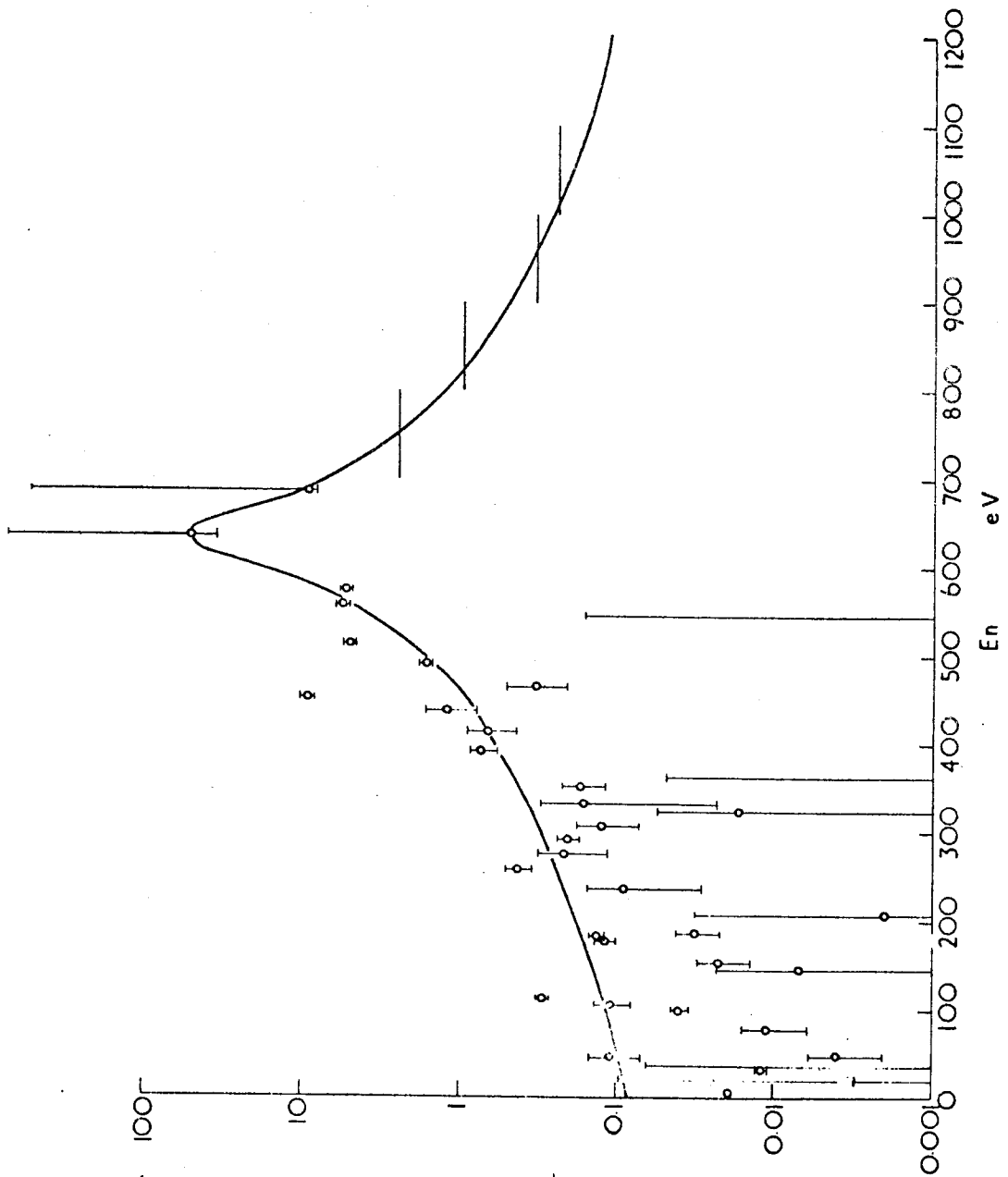
最近非常に多くの核データが報告され, 漸次精度のよいものが得られるようになったが, 一般に未だ異つた測定者間のデータのバラつきは大きいことをあらためて痛感する。精度の一層の改善のためには, 新しい測定法の開発, standard cross section の精度の向上, absolute flux の測定などが挙げられた。また気附いていない系統的誤差を取り除くという意味で, 異つた実験者によつて異なつた測定法によつて, 同じ量を測定して比較してみることが recommend された。

また最後の concluding talk で Taschek (LASL) は将来の thermonuclear reactor の設計に必要なと思われる核データとして, 軽い原子核の断面積を挙げていたことを追記する。

A カールス・ルーエ研究所で

(1) AVF cyclotron 関係

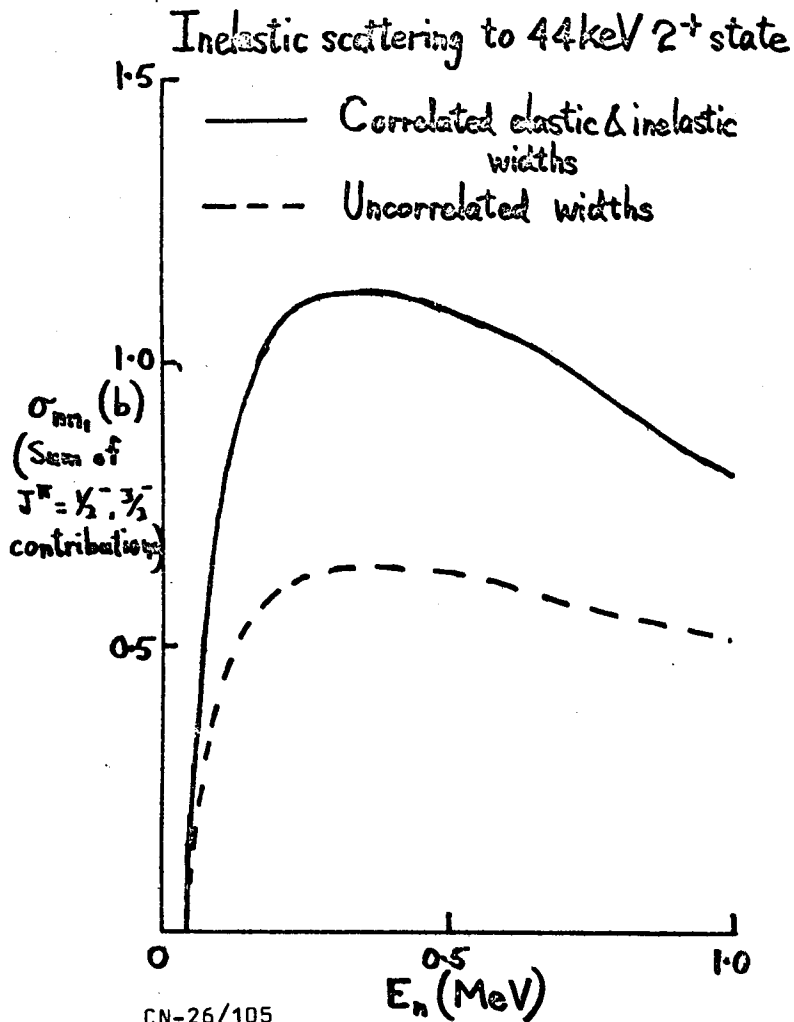
これは重陽子で 50 MeV, α 粒子で 100 MeV まで加速出来る装置である。switching magnet によつて数本のチャンネルに分け荷電粒子反応による実験を行なつている。主なる実験を挙げると, ion implantation, α 粒子の後方散乱の測定 (Glory effect



CN-26/107

$\Lambda_{ew} \beta_j$

Fig. 5 The energy dependence of the observed fission widths of ^{234}U resonances within the narrow intermediate structure resonance centered at 638.4 eV. The solid line shows a Lorentzian energy dependence of the mean fission width deduced from the individual fission widths below 700 eV. It is seen that average fission widths over 100 eV intervals between 700 and 1100 eV are also by this curve thus confirming the choice of resonance energy at 638.4 eV.



CN-26/105

Fig. 2. Contributions to inelastic scattering to the 44 keV (2^+) state of ^{238}U from the compound states of $J^\pi = 1/2^-$ and $3/2^-$ under the assumption a) that the elastic and inelastic widths are uncorrelated and b) that they are fully correlated.

の研究), 粒子アナライザーを用いた高分解能の実験, Spin-flip magnet を用いた
偏極の実験, isomer level に対する spin assignment などを行なっている。

このサイクロトロンは, 160m の飛行管を用いた time-of-flight 法による中性子
の全断面積, 吸収断面積, 核分裂断面積などの測定も行なっている。(上記 Cierjacks の
survey talk [CN-26/113] 参照) この特徴は通常 Linac を用いて行なりこの種
の実験に比べて, 中性子エネルギー領域が高いことである。

(2) 3 MV VDG 関係

ブルトニウムの実験を行なっていたので近寄ることは出来なかつた。しかし, Dr. Fröhner
は約4時間程, くわしい説明をしてくれた。

こゝでは, 次の2点を remark するに留める。吸収断面積の測定では, 非常に多くのピー
ク(彼らの言葉でいえば semi-infinite number of peaks) が観測され,
computer なしには解析不可能とのこと, また最近 counter telescope を用いて中
中性子の absolute flux の測定を試み, まだ preliminary な結果ではあるが, ²³⁵U
の核分裂断面積に対して, Poenitz の値と, 他の人達の値との丁度中間の値を得たとのこ
とであつた。(上記 Poenitz の survey talk [CN-26/111] 参照)

B ハーウエル研究所で

(1) 6 MV VDG (英国製) について

現在この機械は核物理以外, すなわち固体物理, Radiology などの研究に用いられて
いる。

(2) 3 MV VDG with a Mobley buncher

この機械を用いて, 最近は主に核分裂の研究を行なっている。fissioning isomer
の寿命測定のために, clear-cut pulse を得る目的で, 通常の Mobley buncher
の他にもう一つデフレクターを取りつけてあつた。

Time-of-flight 法による高速中性子散乱用の検出器としては, 最近 RCA から市販
されはじめた, GaP ダイノードを持つた photomultiplier を採用したとのことであ
つた。これによつて, その low noise 特性を利用して, 例えば (n-r) discrimi-
nator を併用した場合, 中性子検出の threshold を 70keV 位まで下げることが出来た
とのことであつた。

こゝの On-line computer は非常によく完備していた。例えば, メモリ数 32KWord

を持っている。light penを活用出来る。計算センターのIBM360/75とのケーブル連絡がついている。等々

(2) その他の加速器, Vertical tandem VDG, Linac については説明を省略する。