

# 遮蔽性能評価の実験的研究

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1987年 3月



東京大学原子核研究所

## 目次

	Page
I 章 はじめに	1
II 章 高感度ボナーボール検出器の整備	2
1 節 ボナーボール検出器の概要	
2 節 応答関数の計算	
3 節 国家標準場における応答関数の実験的評価	
4 節 計算と実験による応答関数の比較と評価	
III 章 JASPER 実験への適用	6
1 節 C/E 値、およびアンフォールディングによる実験と計算の比較	
2 節 ボナーボールカウンタ使用条件の検討	

## I章 はじめに

1986年から実質的に開始されたオークリッジ国立研究所(ORNL)、タワー シールディング施設(TSF)におけるJASPER実験は、その測定が主に減速型中性子スペクトロメータ、通称ボナーボール検出器によって行われている。この検出器は古い歴史を持ち、またORNLはボナーボール検出器の開発にも先駆的な働きをし、彼らの持つ検出器システムの信頼性は極めて高い。ボナーボール検出器の応答関数は、実験的、又は計算によって求められる。しかし熱中性子から十数MeVにわたる広い範囲で単色中性子を得ることは不可能で、わずかに熱中性子と、数十keVから十数MeVの範囲の単色中性子校正場が得られるにすぎない。しかもこれらの校正場を多数用いて測定することは大きな労力を要し、事実上はほとんど行われていないのが現状である。一方計算による応答関数導出も、日進月歩で精度が向上してゆく核反応断面積データに依存している。

東大・核研では近年よく用いられるようになった球形<sup>3</sup>He比例計数管を内蔵した高感度ボナーボール検出器を開発した。我々はこの検出器を、電子技術総合研究所に設置されている中性子国家標準場において、熱中性子及び144keVから15.2 MeVの範囲の単色中性子を用いた標準校正を行った。この結果はANISN共役計算値とも比較されている。

ボナーボールスペクトロメータの応答関数を求める手法は完全に確立されているとは言えない。従って全く同一の原理を用いた検出器とは言え、ORNLと東大・核研のボナーボール検出器を併用することは、互いの用いている応答関数をクロスチェックするため、また実験データを全くORNLに依存しないためにも重要であると思われる。

本報告では現在JASPER実験で用いられている東大・核研製のボナーボール検出器の構造、各材料の組成、応答関数について詳しく述べる。また本検出器によって得られたデータをアンフォールディングし、計算スペクトルと比較する。JASPER実験では実験体系に接近して検出器を置くなど通常と異なる使用をしているので、そのことの影響も評価してみる。

## II章 高感度ボナボール検出器の整備

### II-1 ボナボール検出器の概要

図1に $^3\text{He}$ 検出器を内蔵したボナボール検出器の断面図の概観を示す。詳細な製作図面は図2 a~eに示した。TSFで行われたJASPER実験ではポリエチレンモデレータの外側に図3に示した、1mm厚さの円筒形カドミウムカバーをかぶせて測定している。モデレータの中心に置かれている $^3\text{He}$ 熱中性子比例計数管は米国LND社製で、直径5.08cmのステンレス球に10気圧(22℃において)の $^3\text{He}$ ガスが封入してある。ポリエチレン球の半径はそれぞれ4.1, 5.6, 7.6, 11.6cmである。ポリエチレンの密度は、半径7.6cmでは $0.954\text{g/cm}^3$ 、他は $0.928\text{g/cm}^3$ である。それぞれの物質の原子密度を表1に示した。モデレータは比例計数管の高電圧を落とさずに交換できるように設計されている。(残念ながらカドミウムカバーはそのように配慮されていない。)球形状のモデレータは加工時にやや費用を要するが、円筒形モデレータに比べ方向依存性が小さく、また軽量である。

### II-2 応答関数の計算

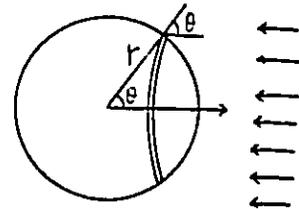
応答関数の測定に用いることが可能な単色中性子のエネルギー範囲は、およそ50keV~15MeVと熱中性子に限られる。従って実験のみで全エネルギー領域の応答関数を求めることは不可能で、計算に頼らざるを得ない。応答関数計算の手順を以下に述べる。(図4)

ENDF/B-IVの断面積をSUPERTOG-JRで処理して、無限希釈の中性子100群群定数を作成した。エネルギー領域は熱~14.9MeVで、群構造は表2に示した。熱群の断面積はモデレータの厚さによって変化する。従来のTHERMOSコードに球形状を扱える機能を加えたTHERMOS-Qコードを用いて、熱群断面積を計算して群定数に組み入れた。中性子エネルギーが高くなると弾性散乱による反跳 $^3\text{He}$ 原子核による電離もn- $\gamma$ ディスクリミネーションレベルを越えて計数される可能性が高くなるため、1.02MeV以上ではANISN共役計算の線源には、 $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ 反応断面積に弾性散乱断面積を加えて入力した。ここで1.02MeV以上では、反跳 $^3\text{He}$ の最大エネルギーは $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ 反応のQ値を越える。

ANISN共役計算の、検出器表面での中性子束を $\phi^+(E, \Omega, r)$ とすれば、検出器を中性子束 $\phi(E, \Omega, r)$ の場に置いた時の計数率Rは下記の式で計算できる。

$$R = \int_S ds \int_0^\infty dE \int_{4\pi} d\Omega \phi^+(E, \Omega, r) \phi(E, -\Omega, r) \cdot (n \cdot \Omega) \quad (1)$$

ここで $\int_S ds$ は検出器の表面積、 $n$ は微小面積 $ds$ の単位法線ベクトルである。いま仮に、 $\phi(E, \Omega, r)$ を右図のように平行一様ビームとすれば、(1)式は



$$\begin{aligned} R &= \int_0^\infty dE \int_0^\pi 2\pi r^2 \sin\theta d\theta \phi^+(E, \theta) \phi(E) \cdot \cos\theta \\ &= \int_0^\infty dE \cdot \phi(E) \int_0^\pi 2\pi r^2 \sin\theta \cos\theta \phi^+(E, \theta) d\theta \\ &= \int_0^\infty dE \cdot \phi(E) \cdot 4\pi r^2 \int_0^\pi \cos\theta \phi^+(E, \theta) \frac{\sin\theta d\theta}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

$\frac{\sin\theta d\theta}{2}$  はSn計算の角度メッシュのウェイトに相当するから、(2)式は

$$R = \int_0^\infty dE \phi(E) \cdot 4\pi r^2 \sum_{i(\mu_i > 0)} \mu_i \phi^+(E, \mu_i) w_i \quad (3)$$

(3)式の・より右の項が[カウント・中性子<sup>-1</sup>・cm<sup>2</sup>]の単位で表した応答関数であり、またこれはANISN共役計算の Right Leakage として出力される値である。(3)式の導出には中性子束を平行一様ビームと仮定したが、検出器の置いてある領域で中性子束が一様なら(角度分布も含めて)、入射する中性子束は平行一様ビームの重ね合わせとして考えることができ、応答関数は同じになる。

前述のように求めた100群の応答関数は、アンフォールディング操作には詳し過ぎるため、1/E+核分裂スペクトルで21群に縮約して用いた。

### II-3 国家標準場における応答関数の実験的評価

電子技術総合研究所に設置されている熱中性子と144keV~15MeVの単色中性子標準場において応答関数の測定を行った。単色中性子場は一辺11.3mの立方体の室の中心部で発生され、作業用のアルミ製格子状の床が底面から4.5mの位置に設置されている。この構造のため、中性子の室内散乱によるバックグラウンドの影響が

小さくなっている。単色中性子はPeletonタイプ4UH-HCバンデグラーク型静電加速器を用いた、 $p-L$ ,  $d-D$ ,  $d-T$ 反応によって発生させた。ターゲットは格子状の床から1.5mの位置にある。単色中性子場に関するパラメータを表3に示した。

室内散乱線は、ターゲットと検出器の間にシャドーコーンを置き直接線を遮蔽して評価した。シャドーコーンは線源側に20cmの鉄と30cmの厚さの10%天然ホウ素を含んだパラフィンで作られている。室内散乱線と直接線の比は、5MeVや565keVに対する厚いモデレータの場合の数%から、15.2MeVに対する半径4.1cmの場合の84%までの範囲である。なおターゲットと検出器中心の距離は1mで測定した。15MeV中性子はターゲットで等方に発生し、また直接線に比べ減速された散乱線は薄いモデレータの検出器には高感度であるため室内散乱線成分が大きくなる。

$^{252}\text{Cf}$ や $^{241}\text{Am-Be}$ 線源から放出される中性子を、幅2.3m、高さ1.9m、奥行1.9mの黒鉛バイルで減速して標準熱中性子場は作られる。バイル中の熱中性子束は金フイルの放射化によって0.9%の精度で決定されている。バイル中に $\text{BF}_3$ カウンターを挿入し、 $\text{BF}_3$ カウンターをまず校正し、校正されたカウンターで黒鉛バイル周辺の熱中性子束場を測定して、ボナボール検出器の校正に供した。大きなポリエチレン球を黒鉛バイルに挿入することは困難であるし、また中性子束のディプレッションを発生させるための正確な校正が不可能になるため、バイルからの漏洩中性子束を利用したのである。漏洩中性子線の強度はおよそ $10^2 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であった。熱外中性子の寄与は、検出器にカドミウムカバーをとりつけて測定したが、その寄与は0.4~8.6%の範囲であった。

電子技術総合研究所では、ボナボールはカドミウムカバーをつけない裸の状態  
で校正実験を行った。

#### II-4 計算と実験による応答関数の比較と評価

計算と実験によって求められた中性子に対する応答を図5に示した。表4にはそれぞれの数値、およびその比(C/E値)を示した。15.2MeV中性子に対する応答は計算されていないので、代わりに14.2MeVの値を表4に示した。 $^{252}\text{Cf}$ 核分裂中性子に対する測定値も示したが、これは平均エネルギー2.35MeV中性子に対する応答と見ることもできる。15.2MeV中性子の実験では室内散乱成分の割合が他のエネルギーでの実験に比べ大きい。そしてこれが15.2MeVでのC/E値を1より小さくして

いる原因かもしれない。他のポリエチレン減速材が付けられている検出器ではC/E値の平均は-6%から+10%の範囲内にある。

ANISNコードを用いた共役計算では、減速材付きの検出器でも全て $^3\text{He}$ 検出器部分から計算を始めている。従って裸の検出器の熱中性子に対するC/E値が1より28%大きいのにに対し、ポリエチレン減速材付きの検出器に対するC/E値が平均で±10%以内にあるのは、 $^3\text{He}$ ガスでのANISN計算は過大評価になるのにに対しポリエチレン透過計算では逆に過小評価をし、結果として誤差が相殺されている可能性がある。そこで以下のような修正を計算値に加えることを試みた。裸の検出器の熱中性子に対するC/E値、1.28は全ての計算に係わると考え、一度全計算値に $1/1.28$ を乗ずる。するとすべての点でC/E値は1より小となるので、応答関数曲線をグラフ上で、なめらかにめこので実験値と整合するように修正する。このめこのによる修正は高エネルギー側では小さいが、熱中性子に対しては最大50%近い大きな修正になる。しかし減速材付きの検出器はカドミウムカバーをかけて使用するため、熱中性子に対する感度は無視できるほど小さくなり、この熱中性子に対する修正は大きな意味を持たない。計算値に乗じた最終的な修正計数を図6に示した。この修正を施すと、C/E値はほぼ1になる。

検出器にカドミウムカバーを付けると、熱中性子に対する感度は極めて小さくなるが、逆に高エネルギー側では $\text{Cd}(n,2n)$ 反応のために感度は大きくなる。この効果をあらかじめANISNコードで計算しておき、図6の修正を加えた応答関数にさらに修正を加えた。結果を図7に、また数値を表5に示した。

### III章 JASPER実験への適用

#### III-1 C/E値、及びアンフォールディングによる実験と計算の比較

T S Fで行われた実験のうちV-A, D, G, J体系の測定結果とカウントレートの計算値を表VI、VIIに示す。表VIの計算値は三菱総研、角田、佐藤両氏により提供されたDOTによる2次元輸送計算による検出器位置(3a位置)における中性子束(100群)と、ANISN計算による検出器の応答関数とを乗じて求めた結果である。表VIでは一般に、半径の小さなボナーボールのC/E値が大きく、V-D体系では1.8にもなっている。一方表VIIの計算値は同じDOTによる中性子束と図7に示した電総研における実験値に一致するように修正した応答関数を用いた結果である。修正の結果C/E値は大きく改善され、V-D体系の値でも約1.4になっている。

図8には修正前の、図9には修正後の応答関数を用いてアンフォールディングした結果(太い実線)を示す。それぞれの細い実線は同じものであるが、三菱総研による計算値で、アンフォールディングにおける初期値にも用いている。図8の細い一点鎖線は3b位置の測定値をアンフォールディングした結果である。応答関数の修正によってC/E値が大きく改善されたのと同様に、アンフォールディングしたスペクトルでも修正による効果は大であり、図9ではMeV領域でやや計算値は小さめであるが群構造の違いによる差の他はほとんど差異は見られない。V-D, G, J体系の同様なアンフォールディング結果を、それぞれ図10~12に示した。V-D体系では計算値は10keV以下で低め、eV領域で高めの結果を示している。V-J体系ではMeV領域の一致は極めてよい。V-G, J体系ではeV, keV領域でアンフォールディング結果はスペクトルの構造がやや鈍った形をしている。

ボナーボールのカウントに大きく影響する中性子エネルギーを明らかにするため、単位レサジーあたりのカウントの占める割合、すなわち

$$R(u)\phi(u) / \int_{\text{thermal}}^{\infty} R(u)\phi(u) du$$

を図13に示した。ここで $R(u)$ はレサジー $u$ における応答関数、 $\phi(u)$ はV-A体系の中性子束である。大きな半径のボナーボールほど高エネルギー側に占める割合が大きいが、V-A体系のように柔らかいスペクトルの場ではeV領域

の占める割合が極めて大きい。

電総研における標準較正実験がなされたのは熱中性子と144keV~15MeVの範囲であり、図13からカウントに大きく占める中性子エネルギーは較正されている領域以外であることがよく判る。しかし較正点を滑らかに結ぶことによって修正された応答関数を用いるとC/ε値やアンフォールディング結果が改善され、真の応答関数に近づいたように思われるのは興味深い。

### III-2 ボナーボールカウンタ使用条件の検討

II章2節で述べたようにボナーボール応答関数の計算は図14Aに示すように平行ビームを条件にしている。多方向からやってくる中性子場でも、その分布(角度分布も含めて)が検出器の大きさの領域で変化しない場合は、平行ビームの重ね合わせと解釈できるのでこの条件は成立する。(図14B)しかしJASPER実験では遮蔽供試体に接近して検出器を置いているので、いずれの条件とも異なり、求めた応答関数が使えない可能性がある。(図14C)そこで以下に述べるような検討を行った。

JASPER V-A体系で2次元Sn計算を行い、体系後端面角度束を求める。次に検出器を置く場をボイドで表現し2次元Sn計算を行い、検出器周りの角度束を計算する。検出器は球対称であるので表面のどこに入射したかには無関係で、どういう角度で入射したかによって計数率が依存する。従ってこのデータを積分処理して検出器に入射する中性子の、検出器表面に立てた法線に対する角度分布を求める。以上の計算は三菱総研、佐藤氏が行ってくれた。半径11.5cmのボナーボールの結果を図15に示した。図ではMeV領域中性子の入射角度分布(ウエイト当り)を破線で、keV領域を点線で、eV領域を一点鎖線で、熱中性子を実線で示した。比較のために平行ビームの分布を細い実線で示したが、すべてのヒストグラムはほぼ重なっている。他のボナーボールの結果も同様であった。従ってJASPER実験においても、評価されたボナーボールの応答関数が充分適用可能であることがわかった。

謝辞

私の依頼に対し最新の計算結果を送って頂き、また検出器周り角度分布の煩雑な計算を快く引き受けて下さいました三菱総研の佐藤氏、角田氏のご協力に、この報告をまとめるに当り厚く感謝いたします。

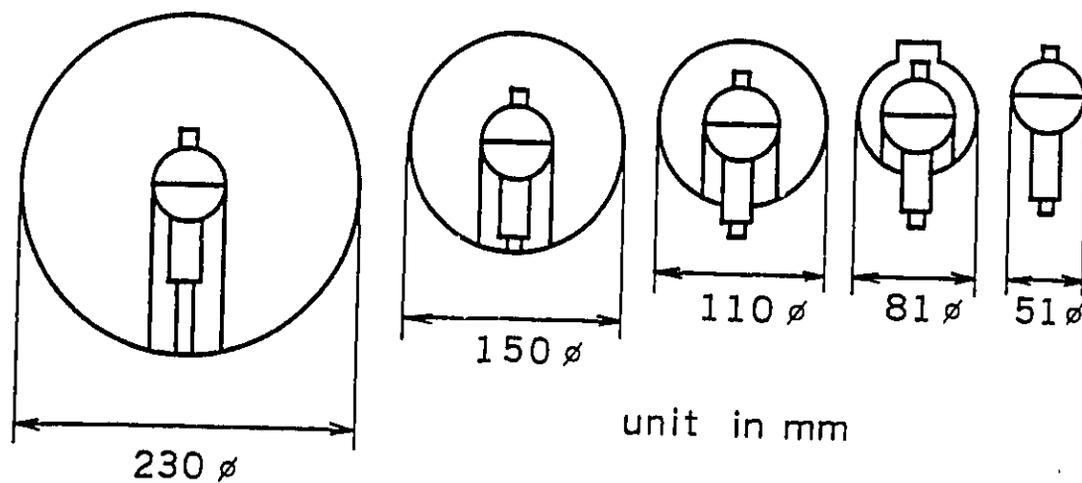


Fig. 1 Cross sectional view of the multi-sphere moderated  $^3\text{He}$  proportional counter.

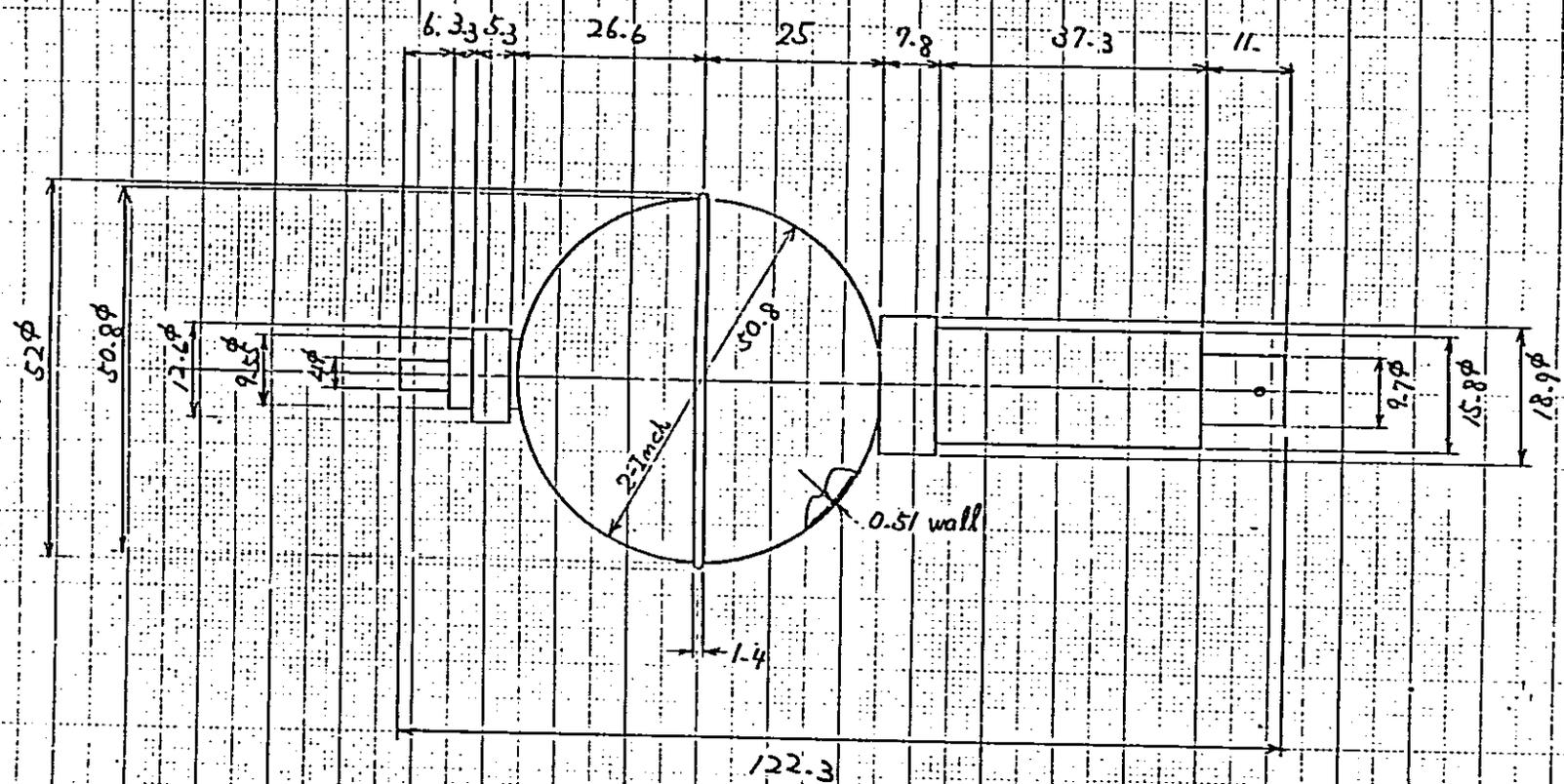


Fig. 2a

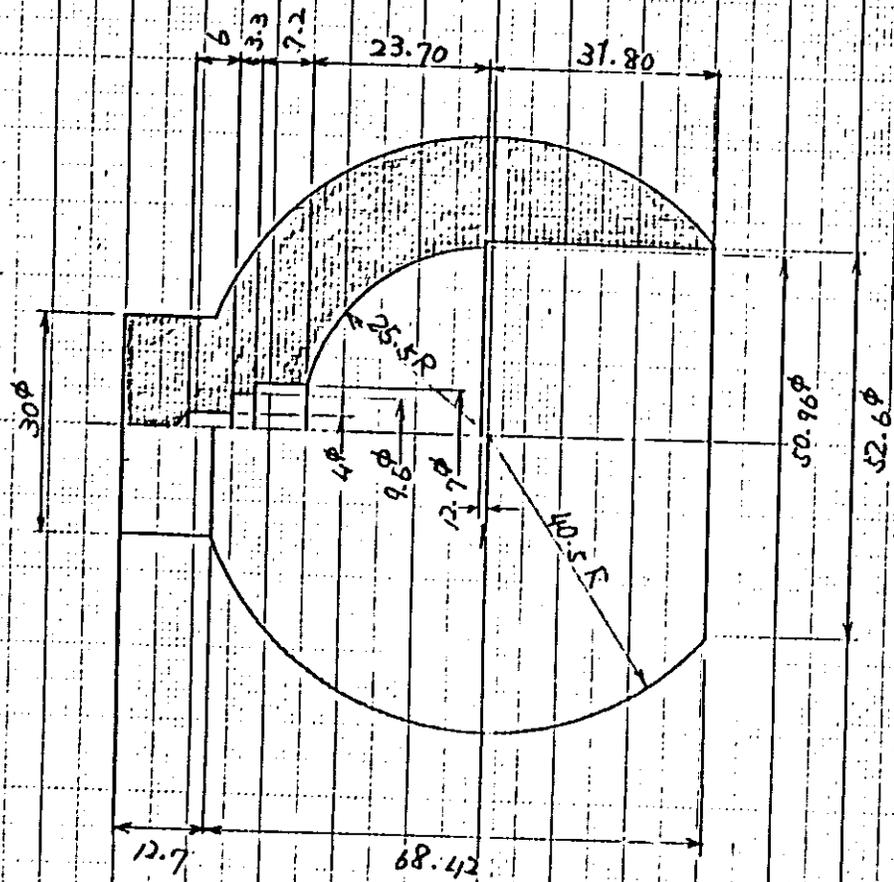


Fig. 2b

15mm厚ホリイ化ニ球形モデルヲ 部B1  
材質 ホリイ化  
個数 1  
縮尺 1/1  
上巻 58年7月13日

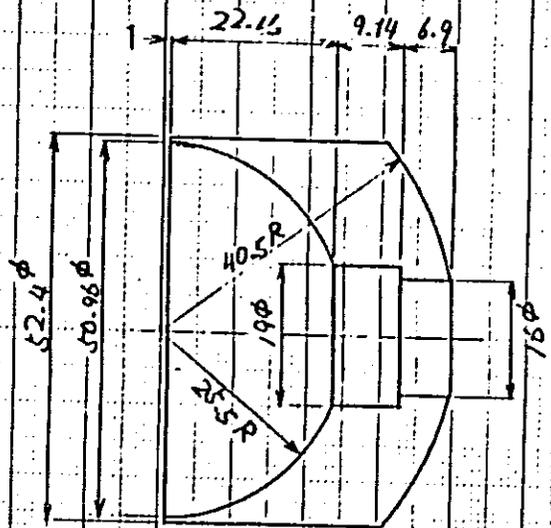
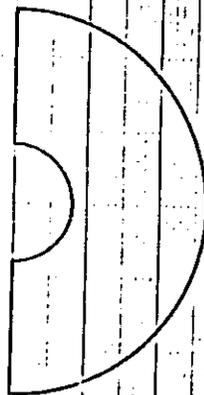


Fig. 26



15mm厚ホリイ462成形モデルタ 部品 2

材質 ホリイ462

個数 2

縮尺 1/1

上巻 58年1月13日



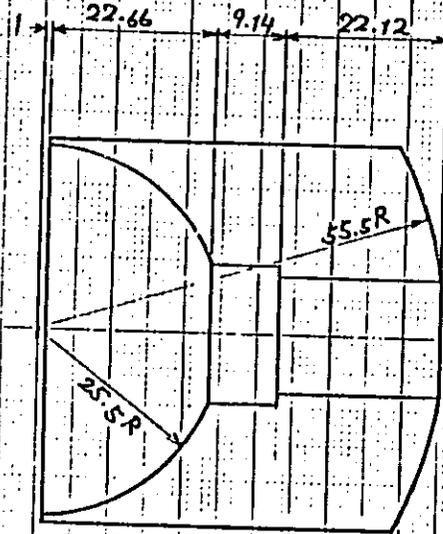
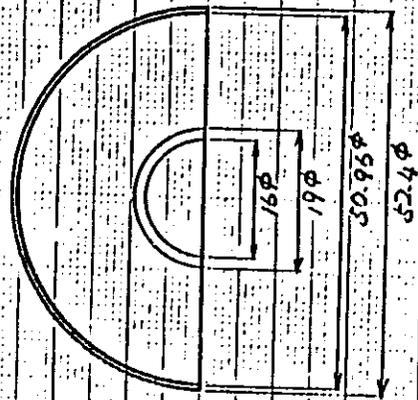


Fig. 2c'

30mm厚:ホリイレン 球状モデルタ 部品 2  
材質:ホリイレン  
個数:2  
縮尺:1/1  
上巻:58年1月13日

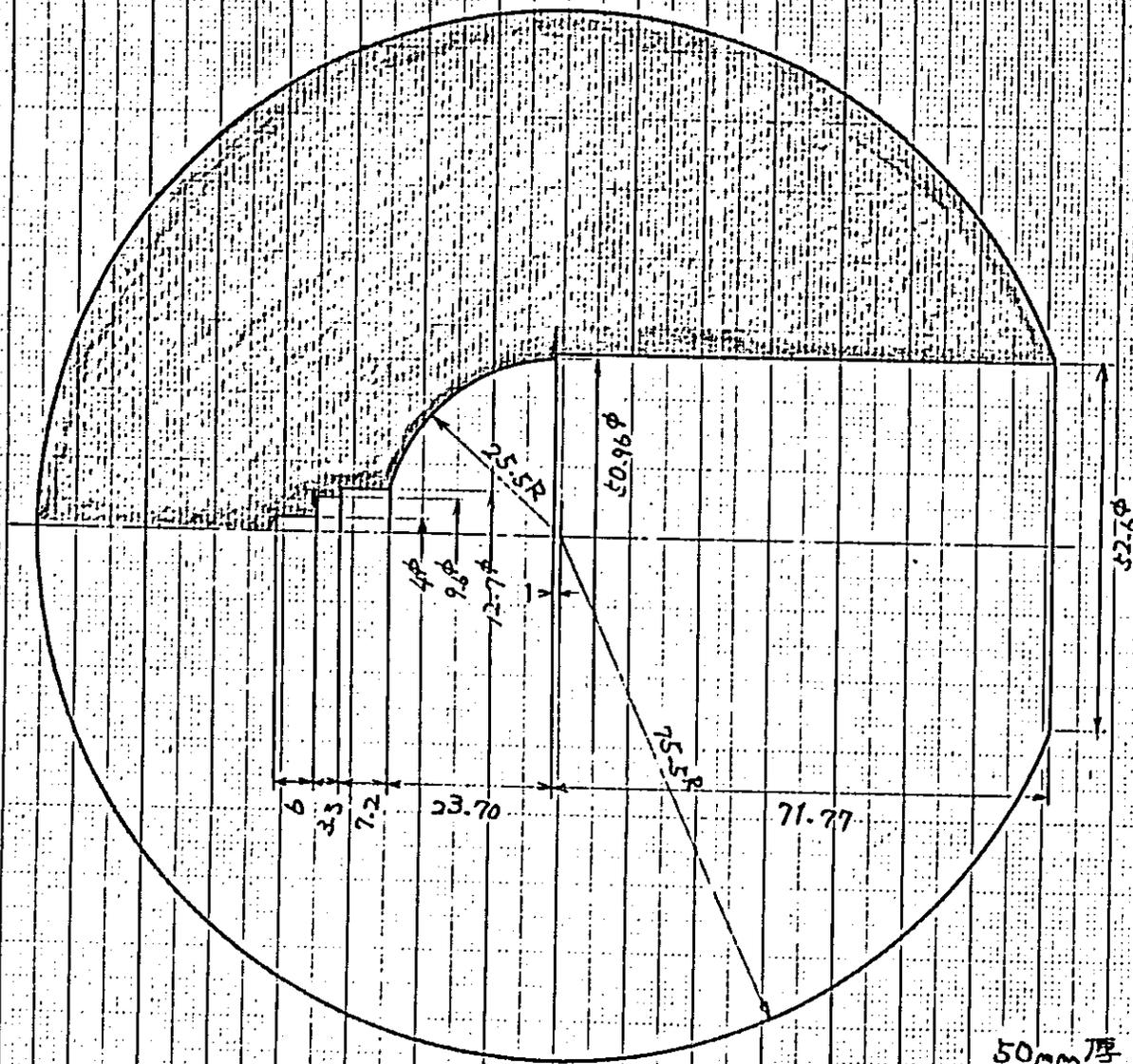


Fig. 2d

50mm厚 ホリエルン球形モデルの 部D  
材質 ホリエルン  
個数 1  
縮尺 1/1  
上巻 52年1月13日

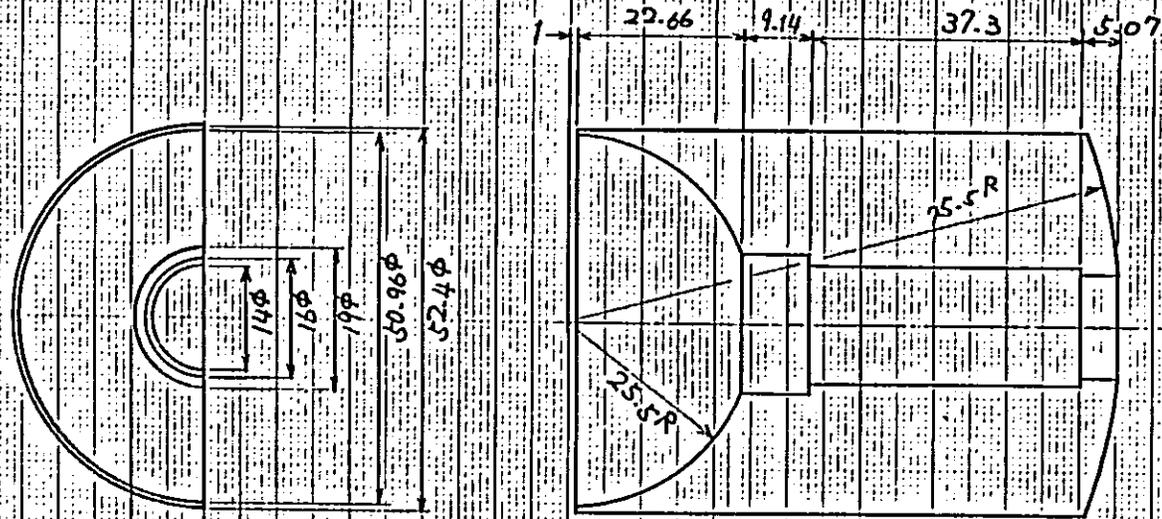


Fig. 2d'

50mm厚 ポリエチレン球形モデル 部 2  
材質 ポリエチレン  
個数 2  
縮尺 1/1  
上表 58年1月13日

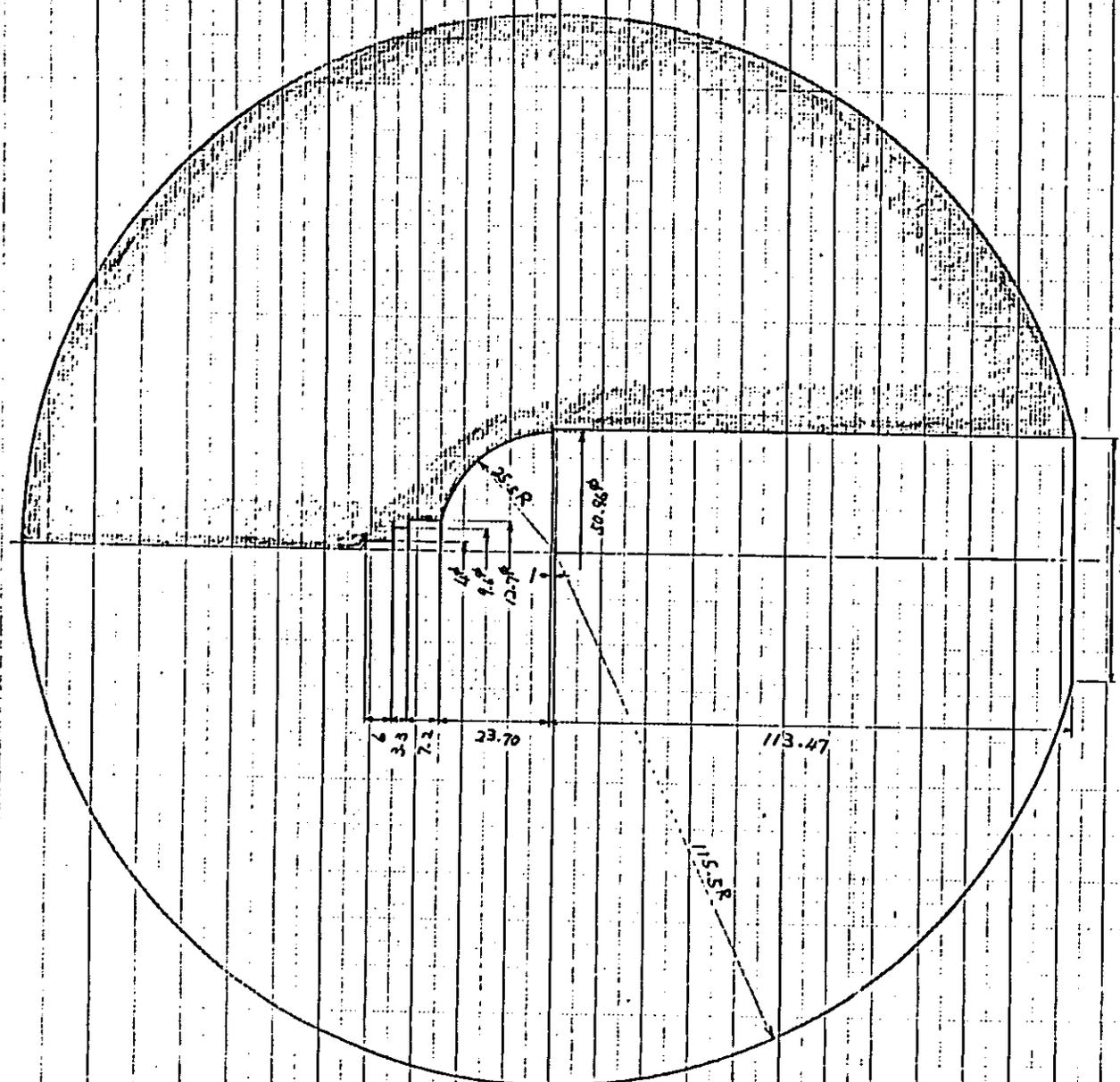


Fig. 2e

90mm厚 ホリユレン、球形マテラータ 部品1  
材質 ホリユレン  
倍率 1  
縮尺 1/1  
上巻 52年1月13日

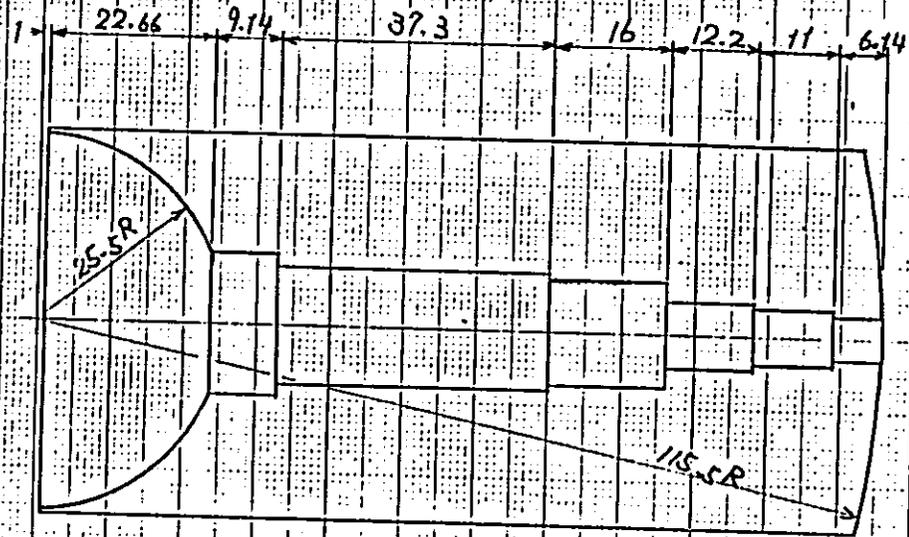
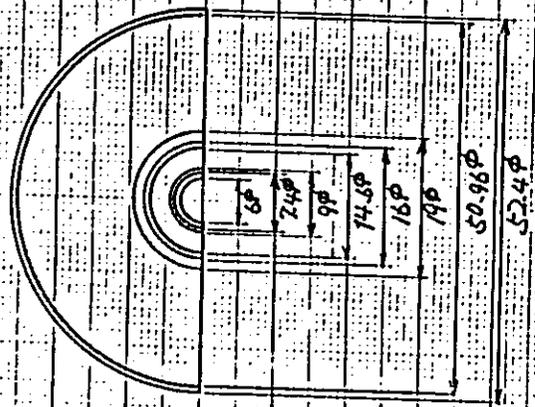
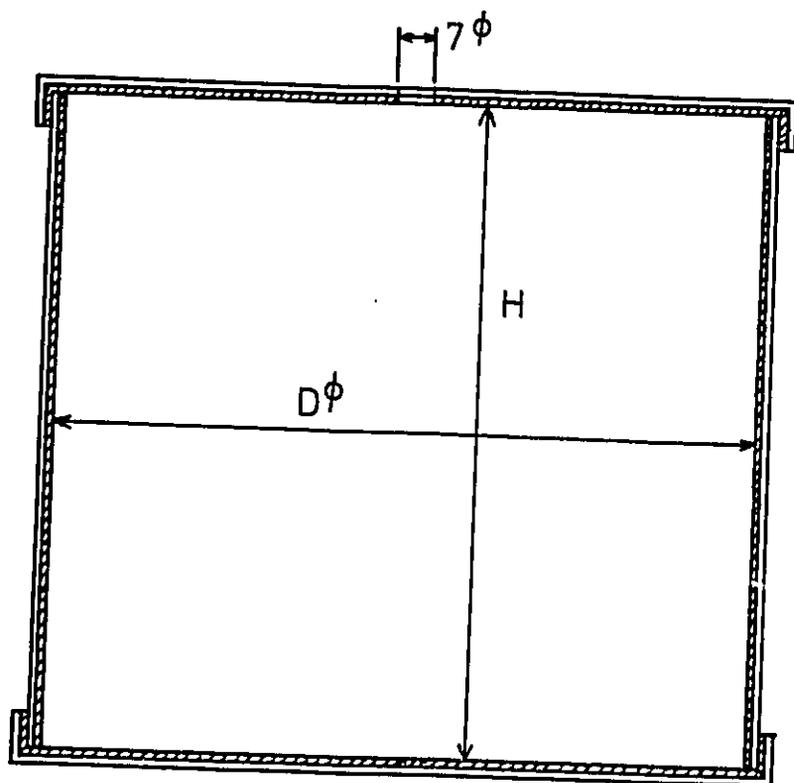


Fig. 2er

90mm厚ホリイレン球形モデル-9 部品 2  
材質 ホリイレン  
個数 2  
縮尺 1/1  
上巻 58年1月13日



□ Aluminum, 1 mm thick.

▨ Cadmium, 1 mm thick.

D	H	in mm
82	145	
111	152	
151	171	
231	231	

Fig. 3 Cross sectional view of cadmium cover.

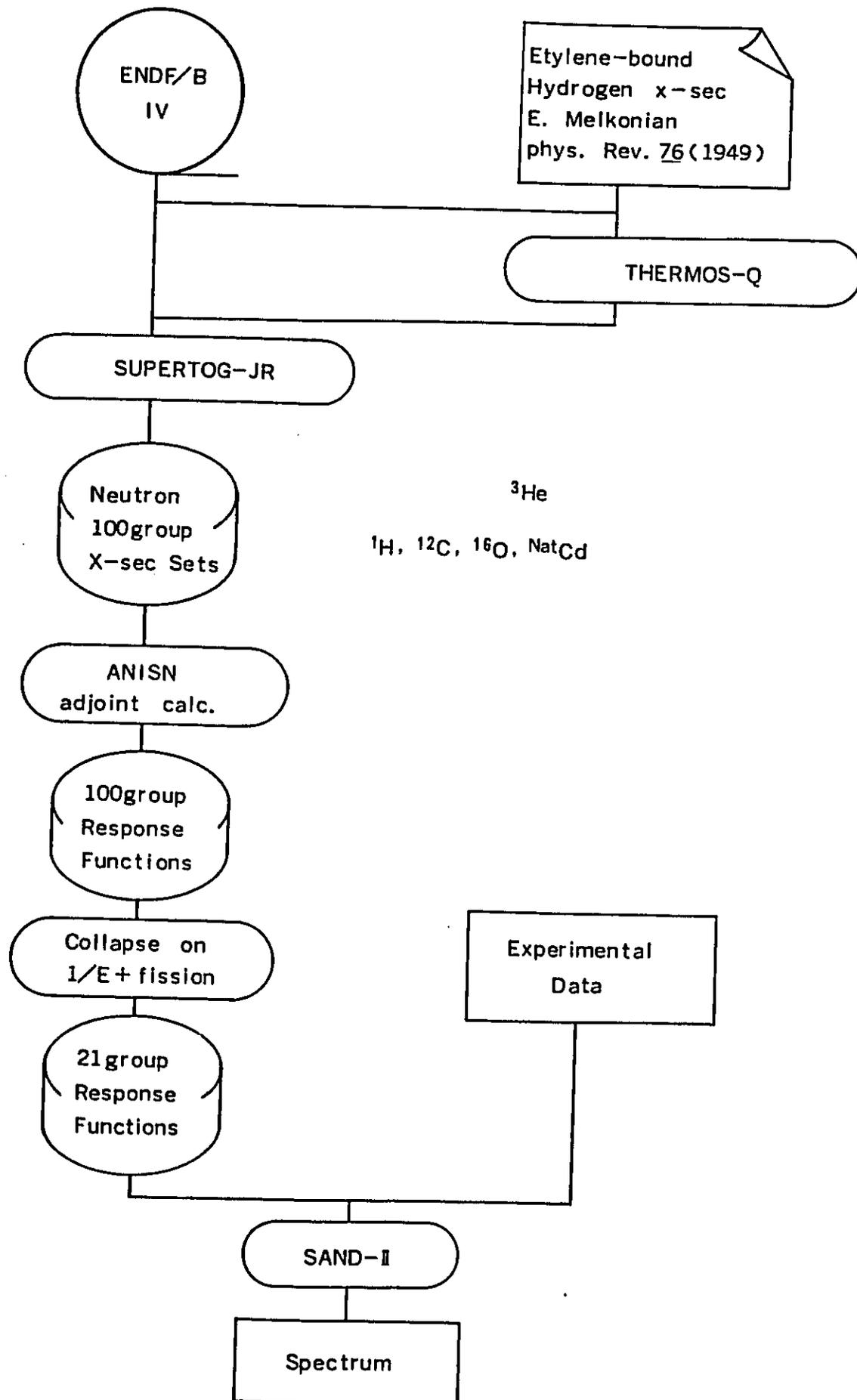


Fig. 4 Calculational procedure of Bonner ball response functions.

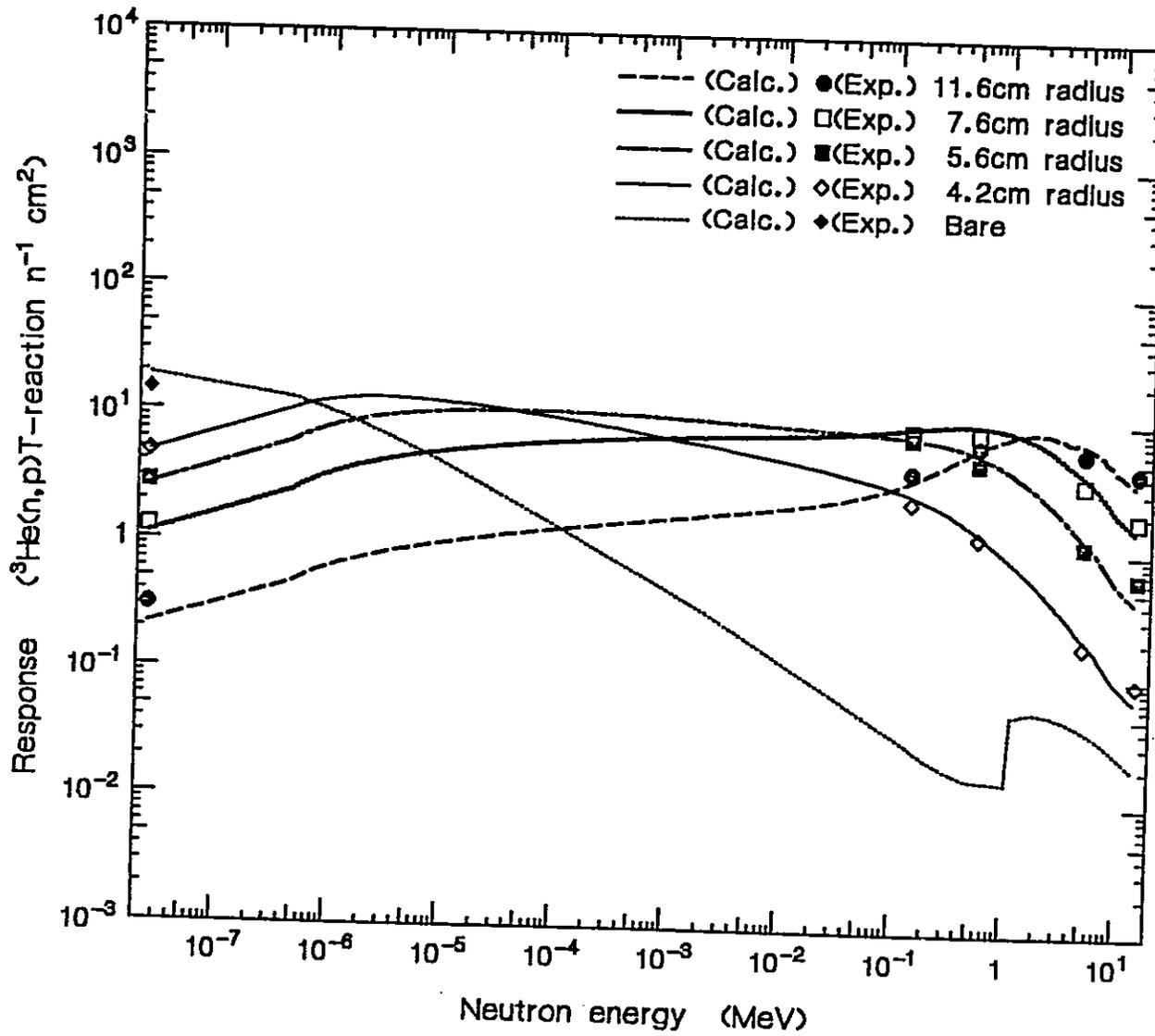


Fig.5 Measured and calculated response functions of the multi-sphere moderated He-3 counter.

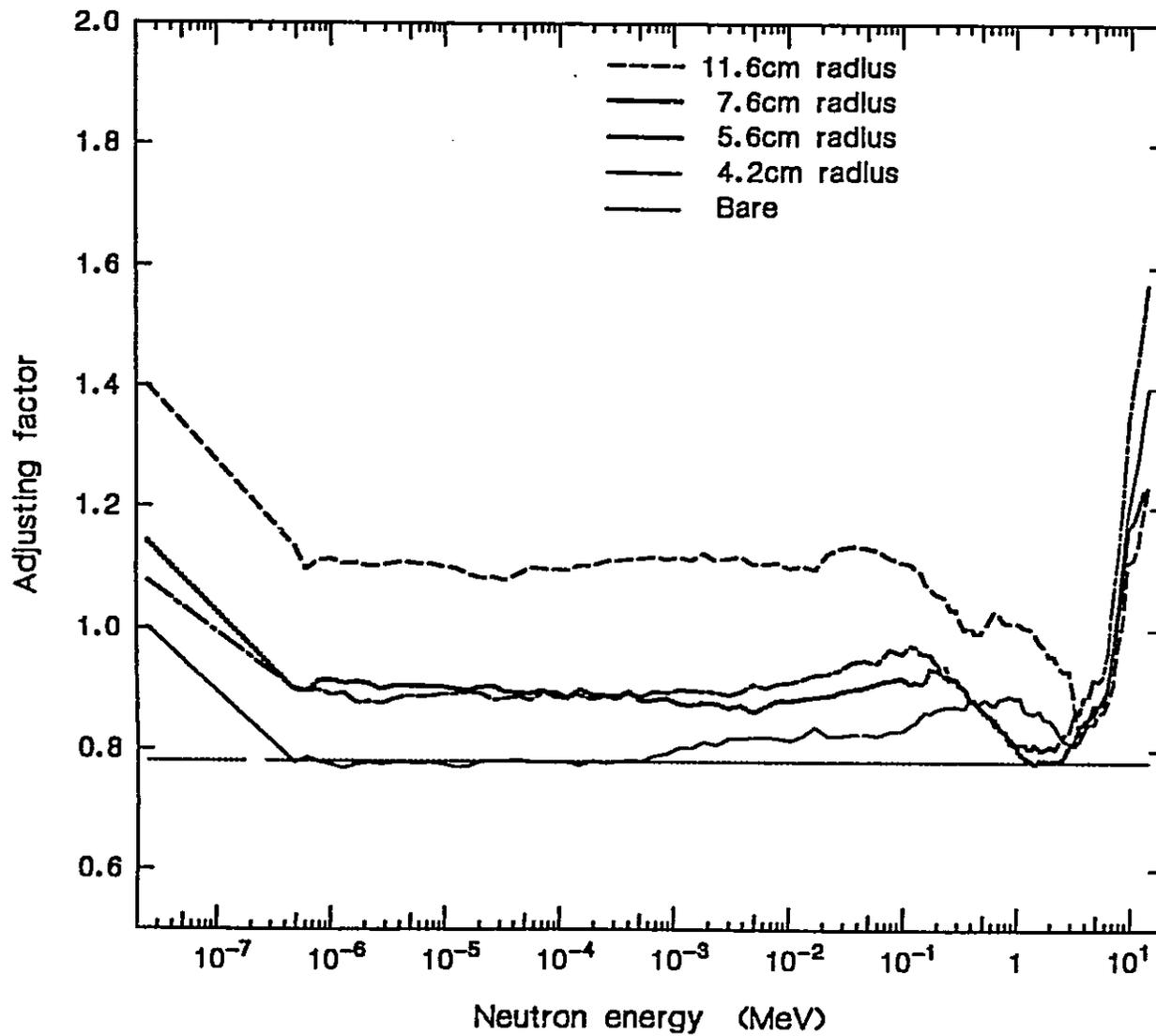


Fig.6 Response-fuction adusting factor of the multi-sphere moderated He-3 counter.

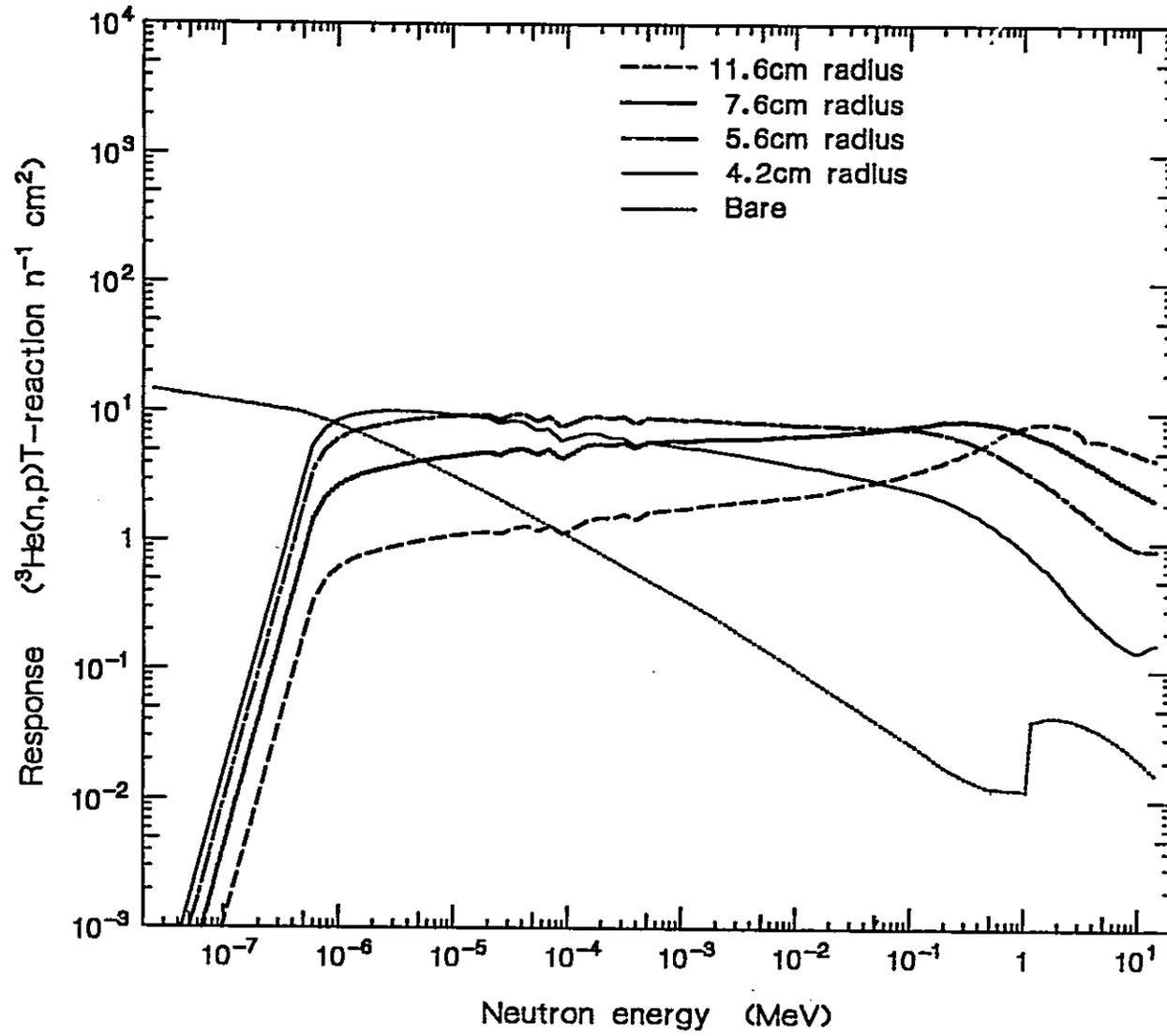


Fig.7 Adjusted response functions of the multi-sphere moderated He-3 counter.

JASPER V-A Geom. Pos. 3a(solid) and 3b(dashed), Calc.3a(thin solid)

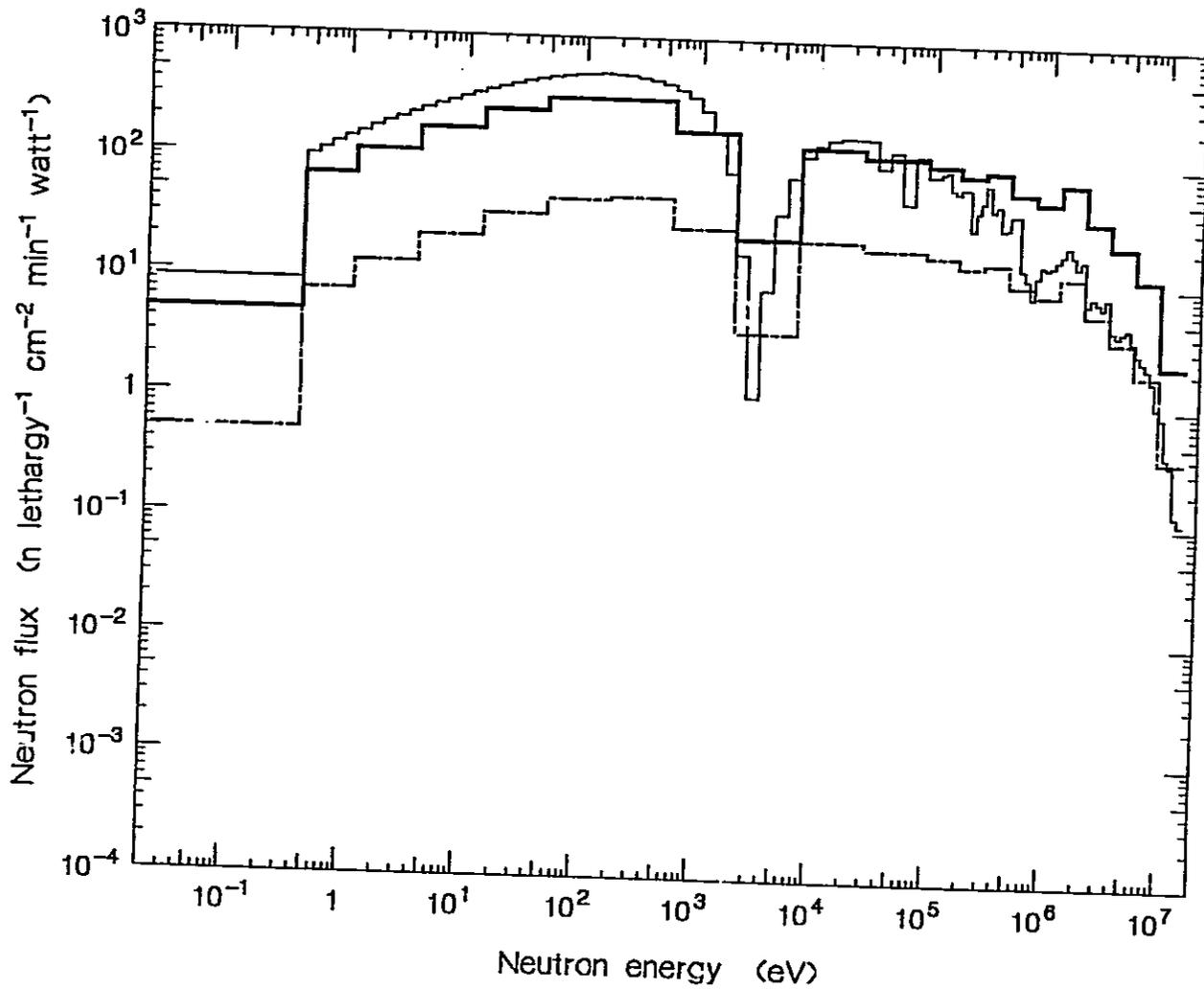


Fig. 8 Unfolded and calculated neutron spectra of the V-A geometry. The response functions used in the unfolding are not adjusted to the measurement at the ETL neutron standard field.

JASPER V-A Geometry at 3a point; thick:measured(new) thin:calculated

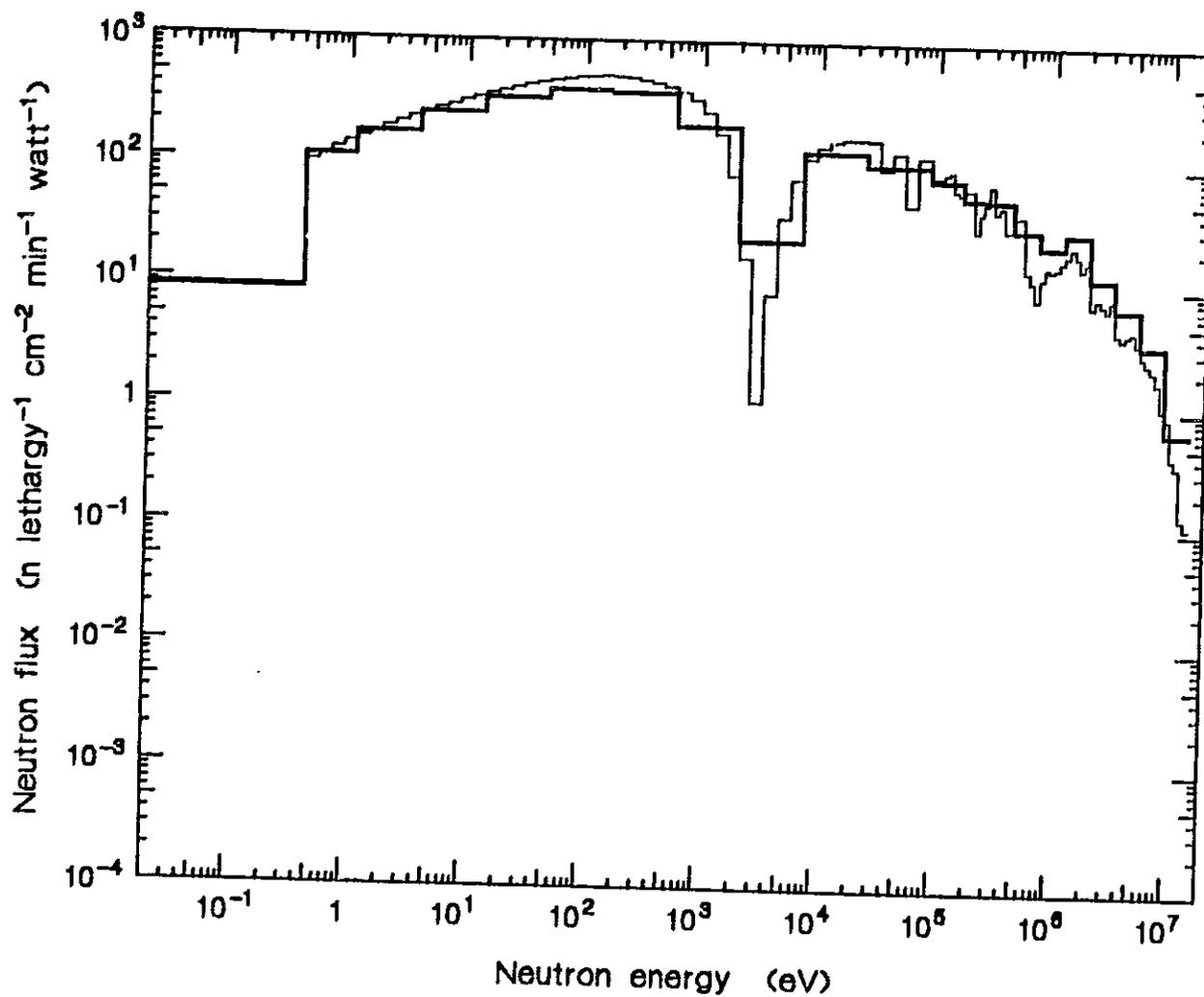


Fig. 9 Unfolded and calculated neutron spectra of the V-A geometry. The response functions used in the unfolding are adjusted to the measurement at the ETL neutron standard field.

JASPER V-D Geometry at 3a point; thick:measured(new) thin:calculated

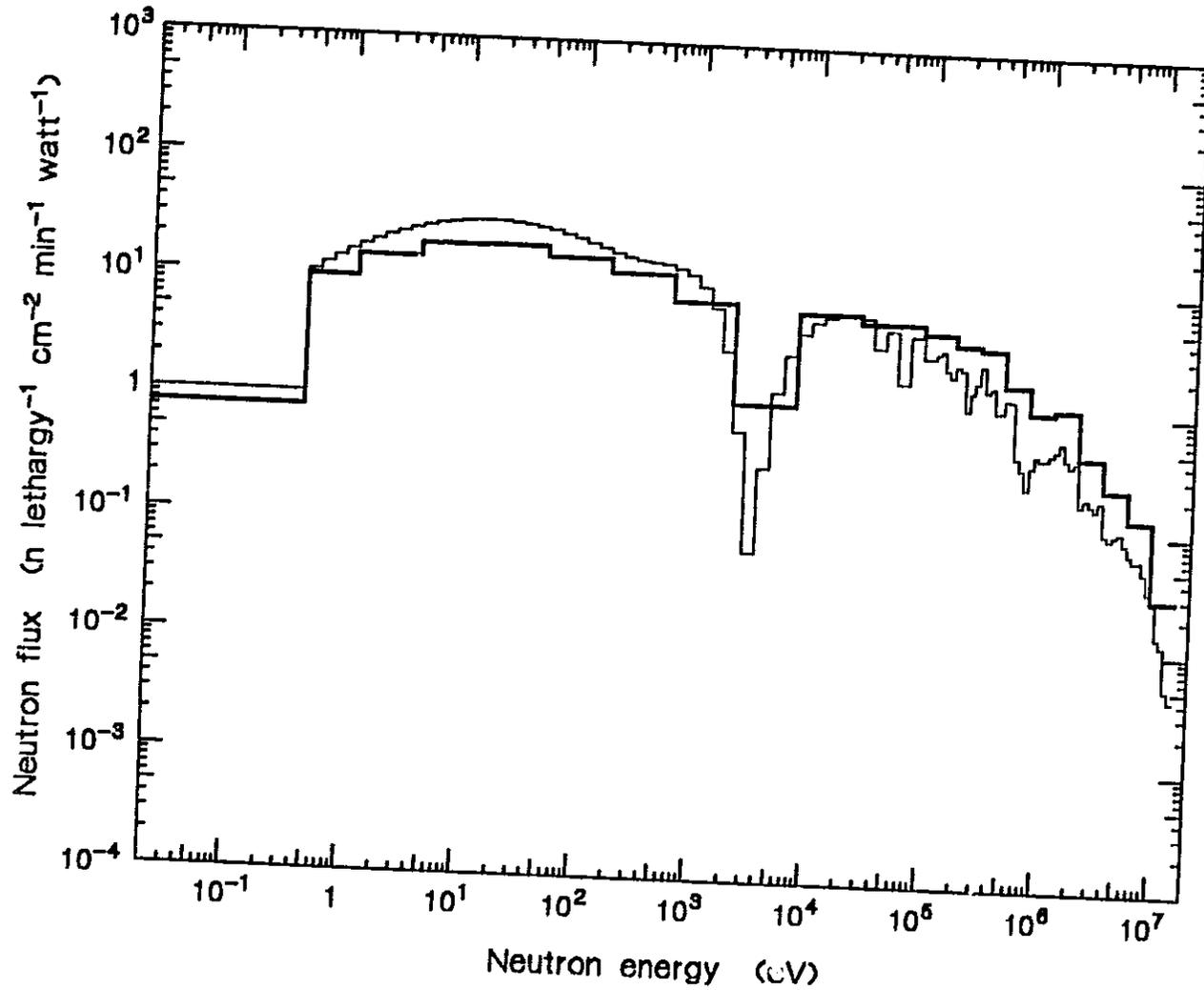


Fig. 10 Unfolded and calculated neutron spectra of the V-D geometry. The response functions used in the unfolding are adjusted to the measurement at the ETL neutron standard field.

JASPER V-G Geometry at 3a point; thick:measured(new) thin:calculated

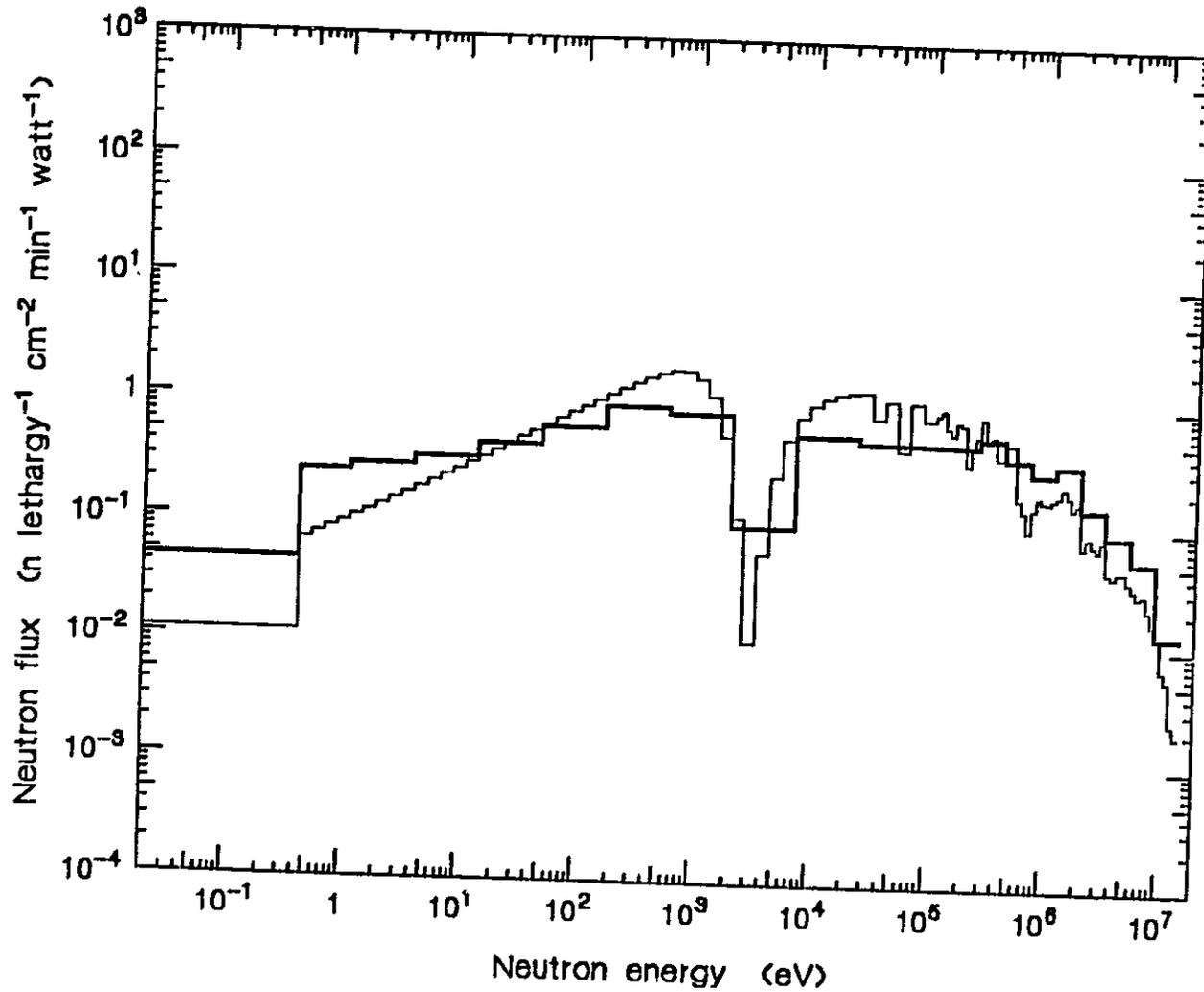


Fig. 11 Unfolded and calculated neutron spectra of the V-G geometry. The response functions used in the unfolding are adjusted to the measurement at the ETL neutron standard field.

JASPER V-J Geometry at 3a point; thck:measured(new) thln:calculated

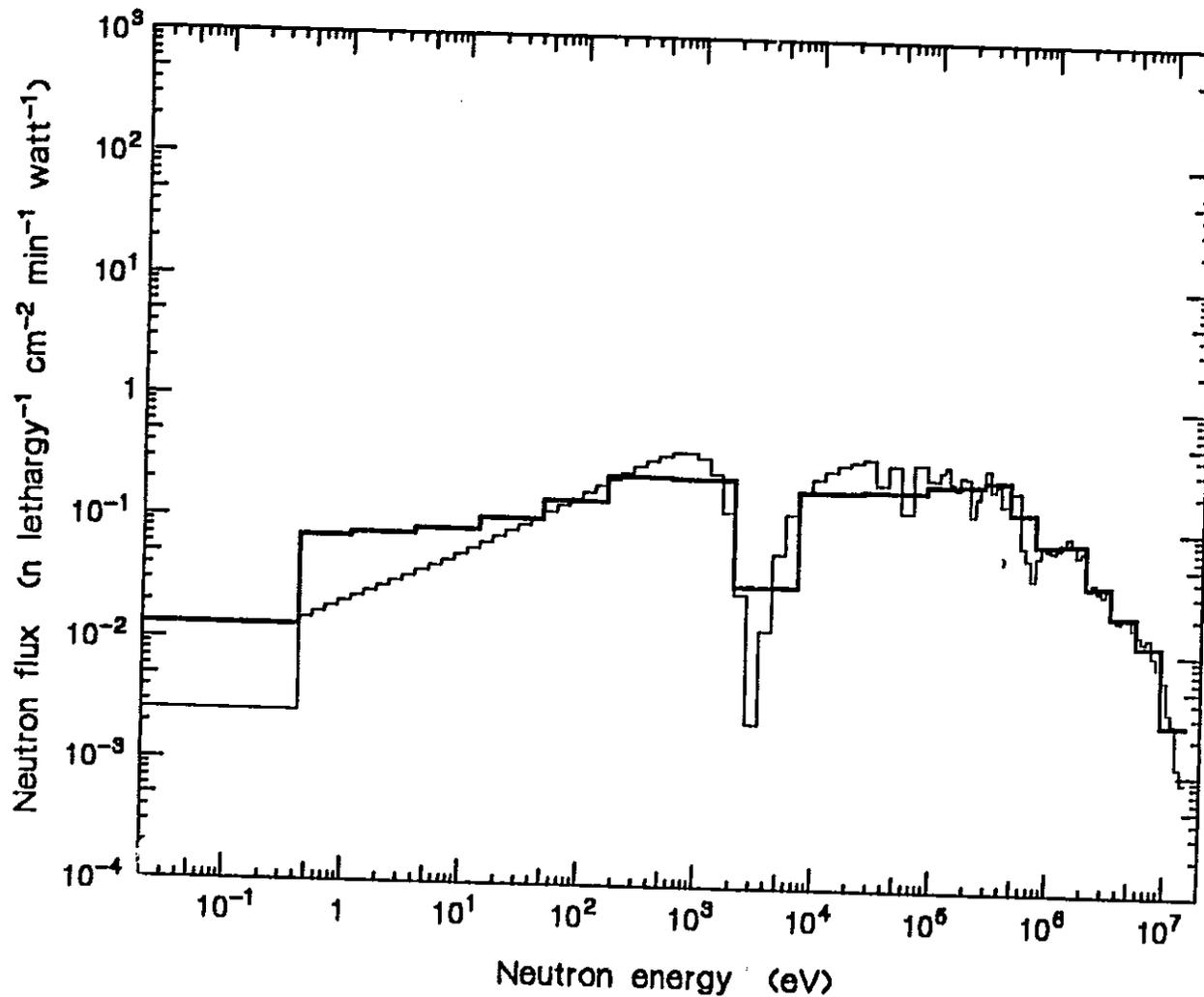


Fig. 12 Unfolded and calculated neutron spectra of the V-J geometry. The response functions used in the unfolding are adjusted to the measurement at the ETL neutron standard field.

Importance 11.6r(solid) 7.6r(dashed) 5.6r(dotted) 4.2r(thin solid) V-A Geom.

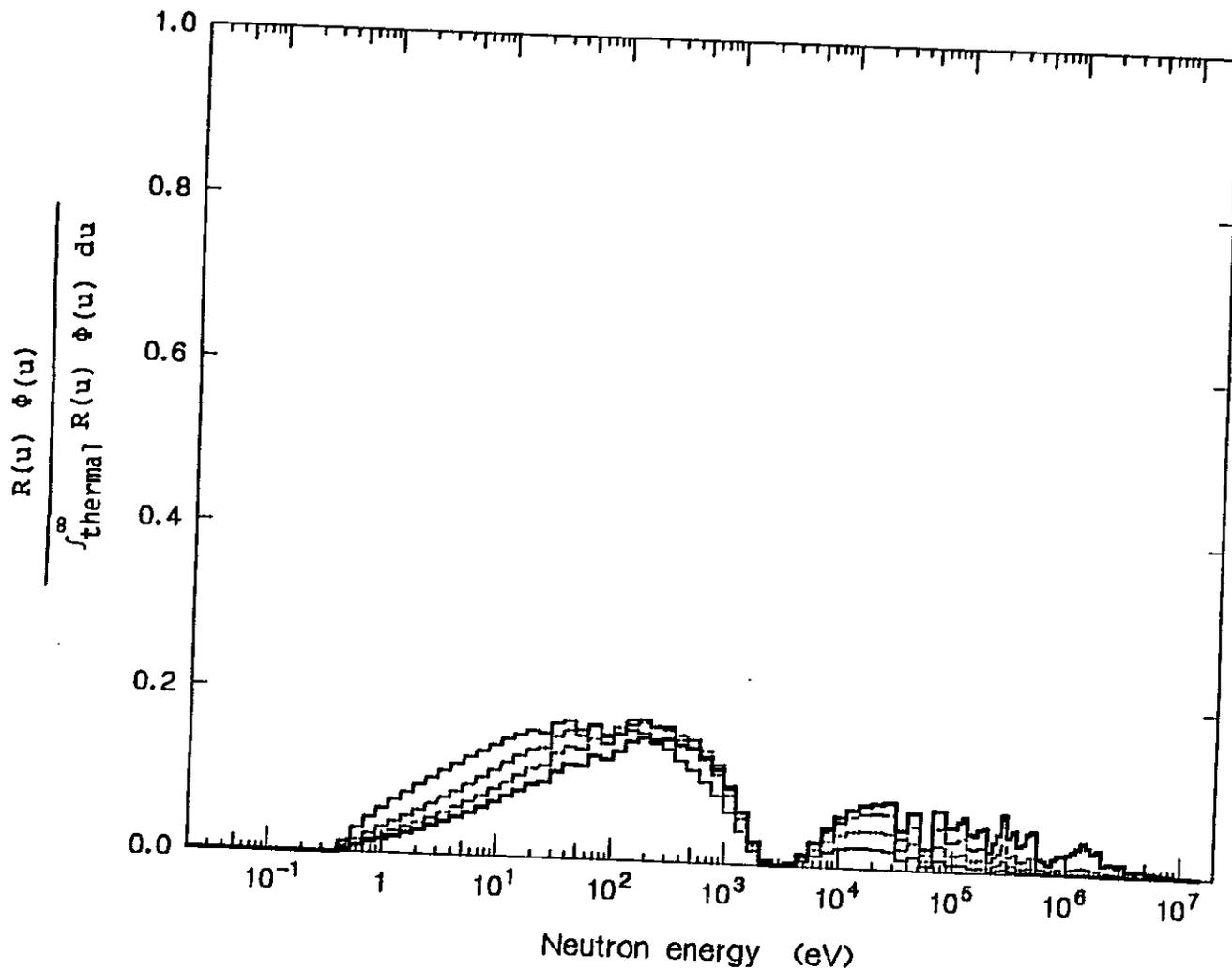


Fig. 13 Importance function of the Bonner ball count rate. Contribution of the keV and MeV energy neutrons to the count rate are much smaller than that of the eV neutrons.

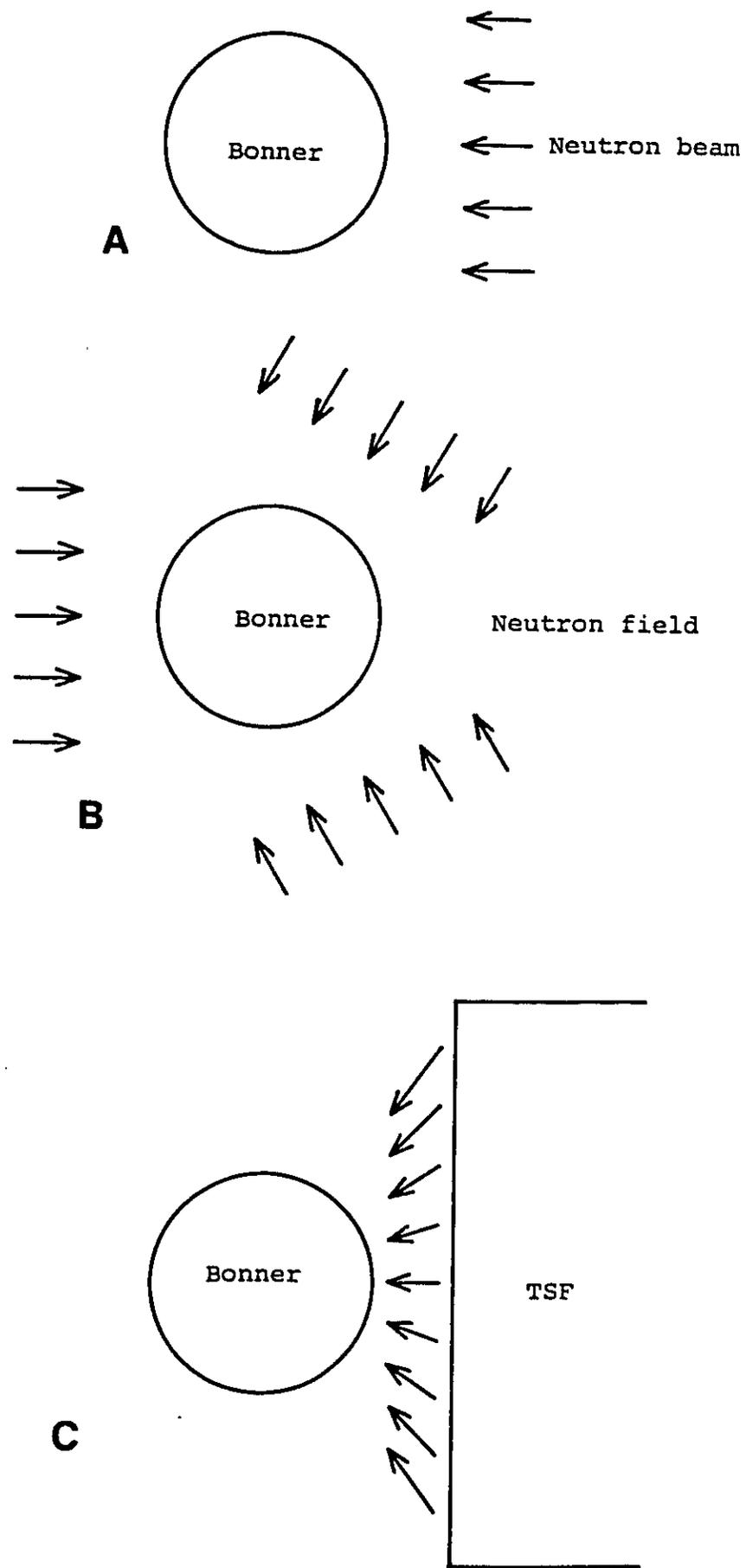


Fig. 14 Three types of Bonner ball counting conditions.  
 A: Parallel beam, B: Space independent omnidirectional field, C: JASPER experiment.

INS r=11.6cm Bonner ball counter

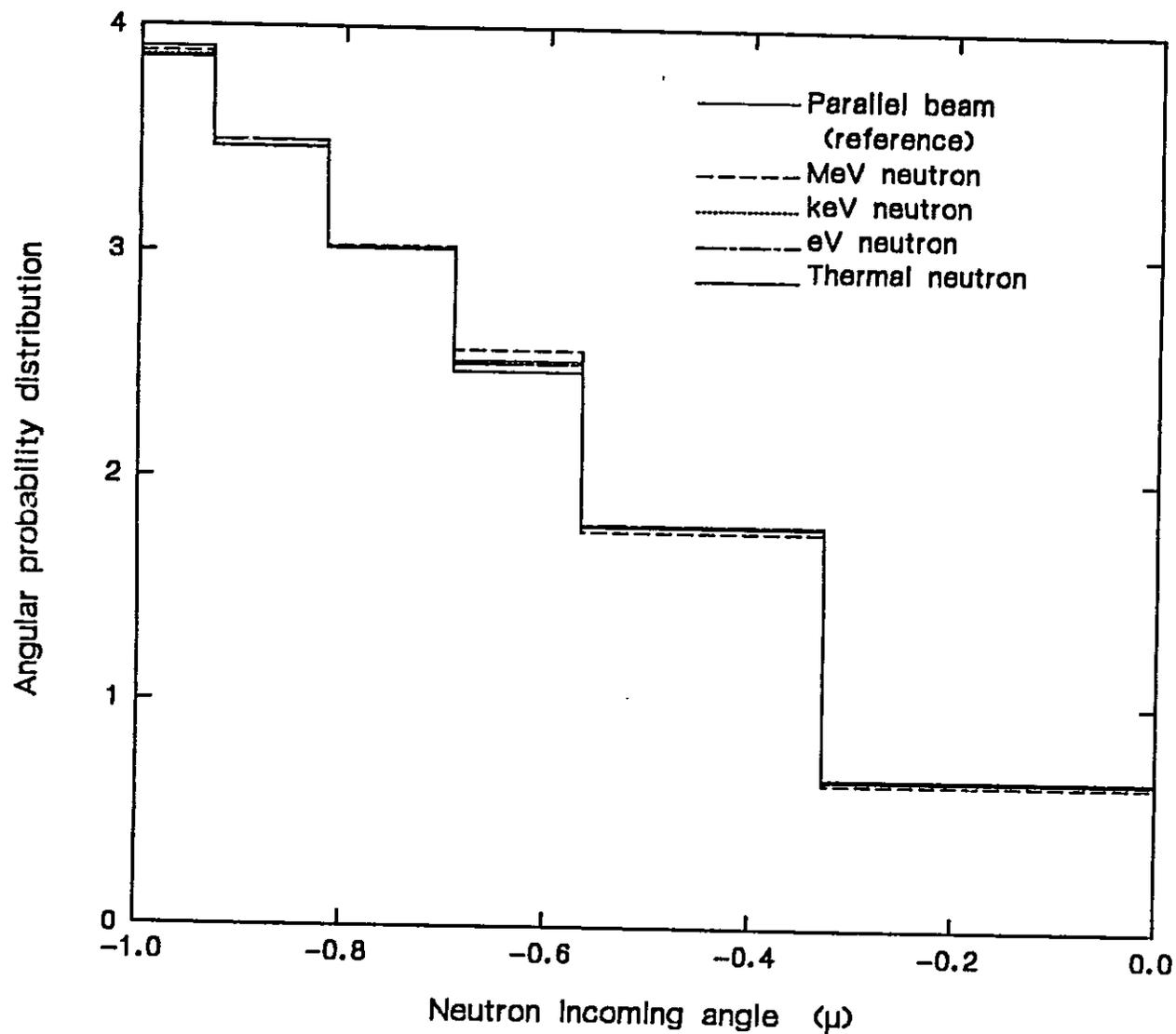


Fig. 15 Angular probability distribution of neutrons incoming into 11.6-cm-radius Bonner sphere surface.

Table I Atomic densities of materials used for multi-moderator spectrometers.

Material	Density	$^1\text{H}$	$^3\text{He}$	$^{12}\text{C}$	$^{16}\text{O}$	Nat Cd
Indium oxide	1.73 <sup>a)</sup>	-	-	-	1.13+22 <sup>b)</sup>	-
Helium-3(10atm)	0.00124	-	2.50+20	-	-	-
Acryl	1.19	5.73+22	-	3.58+22	1.43+22	-
Polyethylene <sup>c)</sup>	0.954	8.27+22	-	4.09+22	2.15+18	-
Polyethylene <sup>d)</sup>	0.928	8.05+22	-	3.98+22	2.09+18	-
Cadmium	8.64	-	-	-	-	4.63+22

a) [ $\text{g cm}^{-3}$ ]

b) Read as  $1.13 \times 10^{22}$  [ $\text{atom cm}^{-3}$ ]

c) Used for the 7.6-cm-radius moderator.

d) Used for the moderators other than 7.6-cm radius.

Table IIa Group structure of 100 group Bonner ball response functions.

Grp.	Upper E. (eV)	Lower E. (ev)	Grp.	Upper E. (eV)	Lower E. (eV)
1	1.49180E+07	1.34990E+07	51	8.65170E+04	6.73800E+04
2	1.34990E+07	1.22140E+07	52	6.73800E+04	5.24750E+04
3	1.22140E+07	1.10520E+07	53	5.24750E+04	4.08680E+04
4	1.10520E+07	1.00000E+07	54	4.08680E+04	3.18280E+04
5	1.00000E+07	9.04840E+06	55	3.18280E+04	2.47880E+04
6	9.04840E+06	8.18730E+06	56	2.47880E+04	1.93050E+04
7	8.18730E+06	7.40820E+06	57	1.93050E+04	1.50340E+04
8	7.40820E+06	6.70320E+06	58	1.50340E+04	1.17090E+04
9	6.70320E+06	6.06530E+06	59	1.17090E+04	9.11880E+03
10	6.06530E+06	5.48810E+06	60	9.11880E+03	7.10180E+03
11	5.48810E+06	4.96590E+06	61	7.10180E+03	5.53090E+03
12	4.96590E+06	4.49330E+06	62	5.53090E+03	4.30740E+03
13	4.49330E+06	4.06570E+06	63	4.30740E+03	3.35460E+03
14	4.06570E+06	3.67880E+06	64	3.35460E+03	2.61260E+03
15	3.67880E+06	3.32870E+06	65	2.61260E+03	2.03470E+03
16	3.32870E+06	3.01190E+06	66	2.03470E+03	1.58460E+03
17	3.01190E+06	2.72530E+06	67	1.58460E+03	1.23410E+03
18	2.72530E+06	2.46600E+06	68	1.23410E+03	9.61120E+02
19	2.46600E+06	2.23130E+06	69	9.61120E+02	7.48520E+02
20	2.23130E+06	2.01900E+06	70	7.48520E+02	5.82950E+02
21	2.01900E+06	1.82680E+06	71	5.82950E+02	4.54000E+02
22	1.82680E+06	1.65300E+06	72	4.54000E+02	3.53580E+02
23	1.65300E+06	1.49570E+06	73	3.53580E+02	2.75370E+02
24	1.49570E+06	1.35340E+06	74	2.75370E+02	2.14450E+02
25	1.35340E+06	1.22460E+06	75	2.14450E+02	1.67020E+02
26	1.22460E+06	1.10800E+06	76	1.67020E+02	1.30070E+02
27	1.10800E+06	1.00260E+06	77	1.30070E+02	1.01300E+02
28	1.00260E+06	9.07180E+05	78	1.01300E+02	7.88930E+01
29	9.07180E+05	8.20850E+05	79	7.88930E+01	6.14420E+01
30	8.20850E+05	7.42740E+05	80	6.14420E+01	4.78510E+01
31	7.42740E+05	6.72060E+05	81	4.78510E+01	3.72670E+01
32	6.72060E+05	6.08100E+05	82	3.72670E+01	2.90230E+01
33	6.08100E+05	5.50230E+05	83	2.90230E+01	2.26030E+01
34	5.50230E+05	4.97870E+05	84	2.26030E+01	1.76040E+01
35	4.97870E+05	4.50490E+05	85	1.76040E+01	1.37100E+01
36	4.50490E+05	4.07620E+05	86	1.37100E+01	1.06770E+01
37	4.07620E+05	3.68330E+05	87	1.06770E+01	8.31530E+00
38	3.68330E+05	3.33730E+05	88	8.31530E+00	6.47600E+00
39	3.33730E+05	3.01970E+05	89	6.47600E+00	5.04350E+00
40	3.01970E+05	2.73240E+05	90	5.04350E+00	3.92790E+00
41	2.73240E+05	2.47240E+05	91	3.92790E+00	3.05900E+00
42	2.47240E+05	2.23710E+05	92	3.05900E+00	2.38240E+00
43	2.23710E+05	2.02420E+05	93	2.38240E+00	1.85540E+00
44	2.02420E+05	1.83160E+05	94	1.85540E+00	1.44500E+00
45	1.83160E+05	1.64730E+05	95	1.44500E+00	1.12540E+00
46	1.64730E+05	1.49960E+05	96	1.12540E+00	8.76440E-01
47	1.49960E+05	1.35690E+05	97	8.76440E-01	6.82570E-01
48	1.35690E+05	1.22770E+05	98	6.82570E-01	5.31590E-01
49	1.22770E+05	1.11090E+05	99	5.31590E-01	4.14000E-01
50	1.11090E+05	8.65170E+04	100	4.14000E-01	1.00000E-04

Table IIb Group structure of 21 group Bonner ball response functions.

Grp.	Upper E. (eV)	Lower E. (eV)
1	1.49180E+07	9.04840E+06
2	9.04840E+06	5.48810E+06
3	5.48810E+06	3.32870E+06
4	3.32870E+06	2.01900E+06
5	2.01900E+06	1.22460E+06
6	1.22460E+06	7.42740E+05
7	7.42740E+05	4.50490E+05
8	4.50490E+05	2.73240E+05
9	2.73240E+05	1.64730E+05
10	1.64730E+05	8.65170E+04
11	8.65170E+04	2.47880E+04
12	2.47880E+04	7.10180E+03
13	7.10180E+03	2.03470E+03
14	2.03470E+03	5.82950E+02
15	5.82950E+02	1.67020E+02
16	1.67020E+02	4.78510E+01
17	4.78510E+01	1.37100E+01
18	1.37100E+01	3.92790E+00
19	3.92790E+00	1.12540E+00
20	1.12540E+00	4.14000E-01
21	4.14000E-01	1.00000E-04

Table III Neutron energy, generating method and maximum intensity of the monoenergetic neutron standard field used at the Electrotechnical Laboratory.

Energy	Emission angle	Reaction	Impinging particle energy	Maximum intensity	Accuracy of monitored intensity
$144 \pm 10$ keV	0 deg	${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	p:1.945 MeV	$5. \cdot 6^{-7} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$	3 %**
$565 \pm 9$ keV	0	${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	p:2.301	$2. \cdot 7$	2
$5.00 \pm 0.04$ MeV	0	$\text{D}(d,n){}^3\text{He}$	d:1.82	$9. \cdot 6$	3
$15.2 \pm 0.3$ MeV	0	$\text{T}(d,n){}^4\text{He}$	$d_2:0.66$	$3. \cdot 7$	2

\* Read as  $5. \cdot X 10^6$

\*\* The neutron intensity is monitored by a long counter.

Table IV Measured and calculated neutron responses of the multi-moderator spectrometer with a helium-3 counter. Measured responses to californium-252 fission neutrons are also listed.

Energy		Moderator radius(cm)				
		11.6	7.6	5.6	4.1	Bare
Thermal	Exp.	0.309*	1.257	2.76	4.73	14.69
	Calc.	0.217	1.103	2.62	4.72	18.81
	C/E	0.703	0.877	0.949	0.997	1.280
144keV	Exp.	4.10	8.47	7.52	2.39	-
	Calc.	3.62	9.12	7.69	2.75	0.0286
	C/E	0.883	1.186	1.023	1.150	-
565keV	Exp.	6.63	8.44	4.89	1.307	-
	Calc.	6.53	9.73	5.77	1.415	0.01610
	C/E	0.986	1.153	1.179	1.083	-
5.0MeV	Exp.	5.97	3.49	1.167	0.1886	-
	Calc.	7.21	4.09	1.324	0.217	0.0419
	C/E	1.208	1.171	1.135	1.152	-
15.2MeV	Exp.	4.33	1.880	0.647	0.0943	-
14.2MeV	Calc.	3.57	1.572	0.437	0.0708	0.0204
	C/E	[0.825]**	[0.836]	[0.675]	[0.751]	-
Average of C/E		0.945	1.097	1.072	1.096	1.280
<sup>252</sup> Cf	Exp.	7.95	7.34	3.47	0.703	-

\* In [count n<sup>-1</sup> cm<sup>2</sup>]

\*\* Bracketed values are ignored in getting average of C/E.

Table Va Adjusted response functions of the multi-sphere moderated He-3 counter. (100 group)

Grp.	R=116mm	R=76mm	R=56mm	R=41mm	Bare
1	4.5245E+00	2.1440E+00	8.8366E-01	1.6325E-01	1.5943E-02
2	4.6276E+00	2.2597E+00	8.8575E-01	1.5970E-01	1.7375E-02
3	4.7292E+00	2.3562E+00	8.8806E-01	1.5180E-01	1.8843E-02
4	4.8967E+00	2.4556E+00	8.9309E-01	1.4425E-01	2.0409E-02
5	5.1082E+00	2.6048E+00	9.1064E-01	1.4239E-01	2.2100E-02
6	5.2285E+00	2.7233E+00	9.3830E-01	1.4785E-01	2.3627E-02
7	5.3564E+00	2.8523E+00	9.7690E-01	1.5512E-01	2.5354E-02
8	5.5233E+00	2.9942E+00	1.0300E+00	1.6225E-01	2.6997E-02
9	5.6969E+00	3.1811E+00	1.0829E+00	1.7245E-01	2.8748E-02
10	5.8776E+00	3.3200E+00	1.1425E+00	1.8761E-01	3.0391E-02
11	6.1034E+00	3.5564E+00	1.2375E+00	2.0417E-01	3.2033E-02
12	6.2171E+00	3.7136E+00	1.3332E+00	2.1985E-01	3.3625E-02
13	6.3344E+00	3.9529E+00	1.4255E+00	2.3628E-01	3.5168E-02
14	6.2892E+00	4.1543E+00	1.5543E+00	2.5558E-01	3.6639E-02
15	6.2050E+00	4.3116E+00	1.6422E+00	2.7674E-01	3.8065E-02
16	7.1013E+00	4.5619E+00	1.7922E+00	3.0173E-01	3.9469E-02
17	7.5256E+00	4.7686E+00	1.8834E+00	3.3362E-01	4.0720E-02
18	7.9170E+00	5.0125E+00	2.0430E+00	3.6884E-01	4.1758E-02
19	8.1686E+00	5.2694E+00	2.1882E+00	4.1071E-01	4.2575E-02
20	8.2686E+00	5.5056E+00	2.3147E+00	4.5765E-01	4.3240E-02
21	8.4230E+00	5.7887E+00	2.5126E+00	5.0695E-01	4.3839E-02
22	8.5250E+00	6.0470E+00	2.6754E+00	5.5512E-01	4.3954E-02
23	8.5186E+00	6.2757E+00	2.8491E+00	6.1742E-01	4.3571E-02
24	8.5402E+00	6.4396E+00	3.0574E+00	6.4864E-01	4.2568E-02
25	8.4853E+00	6.6893E+00	3.1931E+00	7.0290E-01	4.1529E-02
26	8.3169E+00	6.9027E+00	3.4240E+00	7.6323E-01	4.0627E-02
27	8.1507E+00	7.1226E+00	3.6020E+00	8.3024E-01	1.2017E-02
28	7.9378E+00	7.3978E+00	3.7890E+00	8.9608E-01	1.2131E-02
29	7.6833E+00	7.5379E+00	4.0119E+00	9.7326E-01	1.2252E-02
30	7.4376E+00	7.8310E+00	4.2477E+00	1.0434E+00	1.2325E-02
31	7.2475E+00	7.9803E+00	4.4683E+00	1.1181E+00	1.2399E-02
32	7.0187E+00	8.1866E+00	4.6698E+00	1.1820E+00	1.2469E-02
33	6.6643E+00	8.2890E+00	4.9446E+00	1.2668E+00	1.2556E-02
34	6.2854E+00	8.3917E+00	5.1355E+00	1.3583E+00	1.2639E-02
35	5.9669E+00	8.4964E+00	5.3578E+00	1.4378E+00	1.2847E-02
36	5.7021E+00	8.6038E+00	5.6018E+00	1.5221E+00	1.3178E-02
37	5.5195E+00	8.6001E+00	5.7443E+00	1.6217E+00	1.3661E-02
38	5.2389E+00	8.7626E+00	6.0042E+00	1.6833E+00	1.4298E-02
39	5.0701E+00	8.7572E+00	6.1955E+00	1.7701E+00	1.4766E-02
40	4.9384E+00	8.8088E+00	6.3934E+00	1.8614E+00	1.5325E-02
41	4.7180E+00	8.7470E+00	6.5132E+00	1.9449E+00	1.6021E-02
42	4.5957E+00	8.7424E+00	6.7654E+00	2.0324E+00	1.6758E-02
43	4.4195E+00	8.7385E+00	6.8488E+00	2.1103E+00	1.7527E-02
44	4.2503E+00	8.6788E+00	7.0238E+00	2.1913E+00	1.8466E-02
45	4.1141E+00	8.6199E+00	7.2034E+00	2.2609E+00	1.9713E-02
46	3.9824E+00	8.3433E+00	7.2933E+00	2.3479E+00	2.1004E-02
47	3.9051E+00	8.2338E+00	7.3846E+00	2.4071E+00	2.2336E-02
48	3.7802E+00	8.1785E+00	7.5256E+00	2.4520E+00	2.3800E-02
49	3.6830E+00	8.0715E+00	7.6204E+00	2.5142E+00	2.5360E-02
50	3.4966E+00	8.0159E+00	7.6149E+00	2.6096E+00	2.8158E-02

Table Va (Continued)

Grp.	R=116mm	R=76mm	R=56mm	R=41mm	Bare
51	3.2752E+00	7.8036E+00	7.8036E+00	2.7772E+00	3.2026E-02
52	3.1078E+00	7.5977E+00	7.7440E+00	2.9183E+00	3.6911E-02
53	2.9501E+00	7.3998E+00	7.8883E+00	3.0877E+00	4.2591E-02
54	2.8195E+00	7.2563E+00	7.9876E+00	3.2472E+00	4.9193E-02
55	2.6945E+00	7.1152E+00	7.9837E+00	3.3932E+00	5.6832E-02
56	2.5749E+00	6.9765E+00	8.0312E+00	3.5458E+00	6.5602E-02
57	2.4285E+00	6.8834E+00	8.1295E+00	3.7769E+00	7.5677E-02
58	2.3653E+00	6.7906E+00	8.1753E+00	3.8702E+00	8.7366E-02
59	2.2889E+00	6.6992E+00	8.2215E+00	3.9913E+00	1.0081E-01
60	2.2441E+00	6.6526E+00	8.3225E+00	4.1704E+00	1.1615E-01
61	2.1864E+00	6.5229E+00	8.3722E+00	4.3586E+00	1.3376E-01
62	2.1301E+00	6.3955E+00	8.5313E+00	4.5258E+00	1.5401E-01
63	2.1022E+00	6.4347E+00	8.5270E+00	4.6994E+00	1.7723E-01
64	2.0482E+00	6.3503E+00	8.5782E+00	4.8801E+00	2.0425E-01
65	1.9953E+00	6.3476E+00	8.7407E+00	5.0020E+00	2.3581E-01
66	1.9712E+00	6.3111E+00	8.8588E+00	5.2332E+00	2.6894E-01
67	1.9090E+00	6.2317E+00	8.9760E+00	5.3696E+00	3.0457E-01
68	1.8208E+00	6.0248E+00	8.8509E+00	5.4332E+00	3.4438E-01
69	1.8049E+00	6.1248E+00	9.0509E+00	5.6592E+00	3.8943E-01
70	1.7548E+00	5.9933E+00	9.0865E+00	5.7888E+00	4.4059E-01
71	1.7286E+00	5.9788E+00	9.1800E+00	5.9983E+00	4.9825E-01
72	1.5123E+00	5.4107E+00	8.3679E+00	5.6103E+00	5.6322E-01
73	1.6435E+00	5.8690E+00	9.3620E+00	6.4332E+00	6.3645E-01
74	1.5372E+00	5.5994E+00	9.0486E+00	6.3769E+00	7.1992E-01
75	1.5452E+00	5.7361E+00	9.3882E+00	6.8770E+00	8.1448E-01
76	1.4721E+00	5.5723E+00	9.2972E+00	6.8943E+00	9.1996E-01
77	1.2963E+00	4.9122E+00	8.4662E+00	6.5196E+00	1.0379E+00
78	1.1483E+00	4.4115E+00	7.8024E+00	6.1187E+00	1.1703E+00
79	1.3323E+00	5.2080E+00	9.2644E+00	7.5088E+00	1.3186E+00
80	1.2142E+00	4.7504E+00	8.5613E+00	7.2533E+00	1.4848E+00
81	1.3161E+00	5.2417E+00	9.6895E+00	8.4315E+00	1.6704E+00
82	1.2638E+00	5.1318E+00	9.6093E+00	8.6341E+00	1.8776E+00
83	1.1408E+00	4.6974E+00	8.8554E+00	8.2101E+00	2.1080E+00
84	1.1851E+00	4.9064E+00	9.5490E+00	9.0302E+00	2.3640E+00
85	1.1622E+00	4.7802E+00	9.5458E+00	9.2027E+00	2.6475E+00
86	1.1322E+00	4.6568E+00	9.4199E+00	9.3773E+00	2.9608E+00
87	1.0957E+00	4.5357E+00	9.2938E+00	9.6153E+00	3.3055E+00
88	1.0602E+00	4.3887E+00	9.1090E+00	9.7947E+00	3.6833E+00
89	1.0190E+00	4.2453E+00	8.9256E+00	9.9108E+00	4.0959E+00
90	9.7886E-01	4.0784E+00	8.7420E+00	1.0024E+01	4.5440E+00
91	9.3342E-01	3.9144E+00	8.4449E+00	1.0064E+01	5.0281E+00
92	8.8286E-01	3.7026E+00	8.0920E+00	1.0023E+01	5.5483E+00
93	8.3217E-01	3.5359E+00	7.7785E+00	9.9495E+00	6.1031E+00
94	7.7920E-01	3.3118E+00	7.3342E+00	9.6882E+00	6.6903E+00
95	7.1025E-01	3.0204E+00	6.9115E+00	9.1887E+00	7.3061E+00
96	6.2834E-01	2.6751E+00	6.1271E+00	8.5234E+00	7.9463E+00
97	5.1031E-01	2.1770E+00	5.0939E+00	7.3222E+00	8.6047E+00
98	3.4843E-01	1.4821E+00	3.5714E+00	5.3786E+00	9.2738E+00
99	1.6084E-01	6.6598E-01	1.6256E+00	2.5220E+00	9.9444E+00
100	1.4019E-05	4.5704E-05	1.0326E-04	1.7458E-04	1.4690E+01

Table Vb Adjusted response functions of the multi-sphere moderated He-3 counter. Collapsed into 21 groups with fission and 1/E spectrum.

Grp.	R=116mm	R=76mm	R=56mm	R=41mm	Bare
1	5.0461E+00	2.5617E+00	9.0601E-01	1.4332E-01	2.1585E-02
2	5.7529E+00	3.2132E+00	1.1023E+00	1.7842E-01	2.9209E-02
3	6.2454E+00	4.0929E+00	1.5210E+00	2.5311E-01	3.6304E-02
4	7.9089E+00	5.1140E+00	2.0955E+00	3.8923E-01	4.1908E-02
5	8.5004E+00	6.2703E+00	2.8751E+00	6.1114E-01	4.3037E-02
6	7.9200E+00	7.3436E+00	3.8013E+00	8.9662E-01	1.8172E-02
7	6.6898E+00	8.2488E+00	4.8790E+00	1.2594E+00	1.2565E-02
8	5.3377E+00	8.6937E+00	5.9430E+00	1.6736E+00	1.4127E-02
9	4.4553E+00	8.7122E+00	6.8331E+00	2.0897E+00	1.7491E-02
10	3.7039E+00	8.1313E+00	7.5192E+00	2.5007E+00	2.5099E-02
11	2.9694E+00	7.4345E+00	7.8815E+00	3.0847E+00	4.3511E-02
12	2.3804E+00	6.8005E+00	8.1760E+00	3.8709E+00	8.9121E-02
13	2.0924E+00	6.4102E+00	8.5499E+00	4.6932E+00	1.8101E-01
14	1.8521E+00	6.1371E+00	8.9646E+00	5.4968E+00	3.4958E-01
15	1.5934E+00	5.7188E+00	9.0693E+00	6.2591E+00	6.4646E-01
16	1.2927E+00	4.9709E+00	8.6783E+00	6.8589E+00	1.1863E+00
17	1.2136E+00	4.9515E+00	9.4498E+00	8.7017E+00	2.1335E+00
18	1.0572E+00	4.3810E+00	9.0981E+00	9.7444E+00	3.7178E+00
19	8.2758E-01	3.4970E+00	7.7122E+00	9.7826E+00	6.1351E+00
20	4.1198E-01	1.7501E+00	4.1045E+00	5.9366E+00	8.9422E+00
21	1.4019E-05	4.5704E-05	1.0326E-04	1.7458E-04	1.4690E+01

Table VI

## 測定値と実験値の比較

体系	検出器	位置	測定値 (cpm/watt)	計算値 (cpm/watt)	C/E	相対
V-A	4.2R	3a	1.910 E+04	2.926 E+04	1.532	1.45
		3b	2.622 E+03			
	5.6R	3a	2.186 E+04	3.194 E+04	1.461	1.38
		3b	3.241 E+03			
	7.6R	3a	1.438 E+04	1.974 E+04	1.373	1.30
		3b	2.135 E+03			
	11.6R	3a	4.599 E+03	4.853 E+03	1.055	1.
		3b	7.146 E+02			
V-D	4.2R	3a	1.031 E+03	1.896 E+03	1.839	1.72
		3b	3.711 E+02			
	5.6R	3a	1.107 E+03	1.826 E+03	1.650	1.54
		3b	3.827 E+02			
	7.6R	3a	7.369 E+02	1.033 E+03	1.401	1.31
		3b	2.431 E+02			
	11.6R	3a	2.208 E+02	2.368 E+02	1.072	1.
		3b	7.133 E+01			
V-G	4.2R	3a	3.892 E+01	6.381 E+01	1.640	1.36
		3b	1.527 E+01			
	5.6R	3a	5.456 E+01	9.152 E+01	1.677	1.38
		3b	2.163 E+01			
	7.6R	3a	4.475 E+01	7.091 E+01	1.585	1.32
		3b	1.711 E+01			
	11.6R	3a	1.816 E+01	2.187 E+01	1.204	1.
		3b	6.815 E+00			
V-J	4.2R	3a	1.148 E+01	1.453 E+01	1.266	1.21
		3b	4.351 E+00			
	5.6R	3a	1.683 E+01	2.229 E+01	1.324	1.26
		3b	7.013 E+00			
	7.6R	3a	1.510 E+01	1.860 E+01	1.232	1.17
		3b	6.140 E+00			
	11.6R	3a	6.065 E+00	6.368 E+00	1.050	1.
		3b	2.422 E+00			

Table VII

測定値と実験値の比較 (実験値に合わせた応答関数で計算)

体系	検出器	位置	測定値 (cpm/watt)	計算値 (cpm/watt)	C/E	相対
V-A	4.2R	3a	1.910 E+04	2.240 E+04	1.173	1.04
		3b	2.622 E+03			
	5.6R	3a	2.186 E+04	2.789 E+04	1.276	1.13
		3b	3.241 E+03			
	7.6R	3a	1.438 E+04	1.719 E+04	1.195	1.06
		3b	2.135 E+03			
	11.6R	3a	4.599 E+03	5.179 E+03	1.126	1.
		3b	7.146 E+02			
V-D	4.2R	3a	1.031 E+03	1.447 E+03	1.403	1.22
		3b	3.711 E+02			
	5.6R	3a	1.107 E+03	1.592 E+03	1.438	1.25
		3b	3.827 E+02			
	7.6R	3a	7.369 E+02	9.030 E+02	1.225	1.07
		3b	2.431 E+02			
	11.6R	3a	2.208 E+02	2.532 E+02	1.147	1.
		3b	7.133 E+01			
V-G	4.2R	3a	3.892 E+01	4.999 E+01	1.284	1.00
		3b	1.527 E+01			
	5.6R	3a	5.456 E+01	8.140 E+01	1.492	1.16
		3b	2.163 E+01			
	7.6R	3a	4.475 E+01	6.198 E+01	1.385	1.08
		3b	1.711 E+01			
	11.6R	3a	1.816 E+01	2.327 E+01	1.281	1.
		3b	6.815 E+00			
V-J	4.2R	3a	1.148 E+01	1.148 E+01	1.000	0.90
		3b	4.351 E+00			
	5.6R	3a	1.683 E+01	1.996 E+01	1.186	1.07
		3b	7.013 E+00			
	7.6R	3a	1.510 E+01	1.630 E+01	1.079	0.97
		3b	6.140 E+00			
	11.6R	3a	6.065 E+00	6.727 E+00	1.109	1.
		3b	2.422 E+00			