

高等学校教学用书



中子

H. A. 伏拉索夫 著

高等教育出版社

53.8332

213

高等学校教学用书



中 子

H. A. 伏拉索夫著

周 沛 平 譯



高等教育出版社

本書系根據蘇聯技術理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的伏拉索夫 (Н. А. Власов) 著“中子” (Нейтронны) 1955 年版譯出的。原書曾經陸基爾斯基 (П. И. Лукирский) 院士校閱過。

本書廣泛地探討了下列問題：中子的獲得和記錄，中子的各種性質，以及各種不同能量的中子與物質的相互作用等等。

本書可供高等學校物理系高年級學生和研究物質構造的科學工作者們參考。

中 子

Н. А. 伏拉索夫著

周沛平譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內福壽寺 7 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 051 號)

京華印書局印裝 新華書店發行

統一書號 15010·708 開本 850×1165¹/₃₂ 印張 14

字數 337,000 印數 0001—5,000 定價 (6) 洋 1.80

1959 年 12 月第 1 版 1959 年 12 月北京第 1 次印刷

序 言

此書包括著者在列宁格勒大学从 1946 年到 1952 年講課的主要內容。此書原稿在 1953 年初便准备付印。但是出版被耽擱了，到 1954 年的中期，又在原稿內补充了那时发表的新材料。这些补充不仅包含許多实验数据的确定和增添，而且对快中子与原子核相互作用的概念也有极重要的改变。

最近，巴夏耳和他的同事們发现中子总截面数值的系統起伏与中子的能量和原子核的原子量有联系。为了解釋这种現象，外斯考和他的同事們建議放弃这样一个根深蒂固的概念，即不要再把原子核看作和黑体一样会把投射到核的几何截面範圍內的所有快中子都吸收掉。他們建議代之以这种原子核概念，把核看成对快中子是非常透明的物体，对中子波的吸收系数很小。根据这个概念来計算，快中子散射截面和微分截面便可以滿意地和实验数据符合。但須注意到，中子物理学这个領域尚远不够完善，每个月都有新材料出現。比方說，外斯考和他的同事們的概念和計算的詳細敘述就是在 1954 年底才发表的。

書中所敘述的关于快中子相互作用的旧概念并不丧失它的价值和意义。那些概念仍然是有用的，这不仅是由于它的簡單性和明显性，而且也可以在進行快中子相互作用的定量研究时作为第一級近似。

此書沒有以很多和很重要的章节来敘述中子物理学中关于重核裂变以及与它有关的鏈式反应。此問題在最近出版的原子核和中子物理学的書中有单独的章节可以找到。但在这些書中只詳細分析鏈式反应問題，而对于裂变的物理学則只有簡短的注釋。出版一些对裂变物理学和鏈式反应基本問題更完全更深刻的专書是极端需要的，著者非常希望有任何这方面的專門家写出这类問題的書籍。

И. А. 伏拉索夫

目 录

序言	vi
緒論	i
第一章 中子的基本性質	4
§ 1. 中子的发现	4
§ 2. 中子的質量	9
§ 3. 中子的放射性	14
§ 4. 中子的自旋	21
§ 5. 中子的磁矩	25
第二章 中子源	33
§ 6. 中子在原子核內的結合能	33
§ 7. 中子源的一般性質	36
1. 中子的产額	36
2. 中子的能量	41
3. 中子的角分布	45
§ 8. (α, n)反应	49
1. Ra+Be 源	50
2. Rn+Be 源	57
3. Po+Be 源	57
§ 9. (d, n)反应	61
1. D(d, n)Ho ³ 反应	62
2. Be ⁹ (d, n)B ¹⁰ 反应	68
3. Li ⁷ (d, n)2Ho ⁴ 和 Li ⁷ (d, n)Be ⁹ 反应	74
4. T(d, n)He ⁴ 反应	75
5. 其他的(d, n)反应	81
§ 10. 高能氘核的破裂	86
§ 11. (p, n)反应	93
1. Li ⁷ (p, n)Be ⁷ 反应	94
2. T(p, n)He ³ 反应	100
3. 其他的(p, n)反应	105
§ 12. 高能質子的(p, n)反应过程	109
§ 13. (γ, n)反应	112

02010

§ 14. 用原子核反应堆作中子源	184
第三章 中子的观察方法	144
§ 15. 记录中子最重要的方法	144
§ 16. 反冲核法	145
§ 17. 借助核分裂来记录中子	158
1. 硼探测器的一般特性	159
2. 锂探测器	165
§ 18. 借助核裂变来记录中子	166
§ 19. 放射指示剂	170
第四章 中子与物质的相互作用	183
§ 20. 作用在中子上的力	183
§ 21. 相互作用过程简述	193
§ 22. 弹性散射	196
§ 23. 中子的俘获	214
§ 24. 研究快中子与原子核相互作用的实验	233
1. 总截面	233
2. 微分散射截面	243
3. 俘获截面	257
§ 25. 特快核子的相互作用	257
§ 26. 非弹性散射	282
第五章 中子的减速	293
§ 27. 当中子能量大于1电子伏时的减速	293
§ 28. 当中子能量等于或低于1电子伏数量级时的减速	314
§ 29. 中子的空间分布和扩散	324
1. 表面密度为 q 的无限平面源	332
2. 在无限介质中的点源	334
3. 半径为 R 的球面源	336
4. 在反应堆内中子的分布	338
§ 30. 在表面附近中子的分布	340
§ 31. 反照率	344
第六章 慢中子的吸收和散射	347
§ 32. 相互作用过程概述	347
§ 33. 研究慢中子与物质相互作用的实验	353
§ 34. 机械选速器	354
§ 35. 直接调制回旋加速器的选速装置	369

§ 36. 晶体单色器	371
§ 37. 研究共振吸收的间接方法	378
§ 38. 热中子截面的测量	379
§ 39. 共振散射的实验	385
§ 40. 中子的磁性相互作用和极化	387
第七章 中子的波性	397
§ 41. 波性概述	397
§ 42. 在分子上的散射	401
§ 43. 在晶体内的散射	404
§ 44. 中子的反射和折射	420
参考文献	430

緒 論

中子和質子都是原子核的組成部分。在所有穩定的原子核中，只有一種不含中子，那便是普通氫的核，只是一個質子。再有一種 He^4 的核是由僅僅一個中子和兩個質子組成的。其餘的穩定原子核中，中子的數目或者比質子多，或者最低限度也和質子數目一樣。由於物質的質量主要集中在原子核中，那末很明顯，地球、太陽系或者甚至整個宇宙的全部物質大約有一半質量是屬於中子的。宇宙中物質最巨大的運動和轉變過程都與原子核及組成它的質子和中子這些宇宙中能量的主要載體的轉變有關。我們知道，從太陽這類星體發出的最巨大的輻射能流的來源，便是在這些星體內部所發生的核轉變。

使得近代技術有可能利用原子核能量的原子核物理學的成就為核轉變在最近的將來工業動力方面的主導地位提供了現實的前提。地球上核內能量的儲藏量可以說是用之不竭的，在任何情況下，都遠超過所有其他能源的儲藏量，核“燃料”的發熱量比煤和其他一般燃料的發熱量要超過幾百萬倍。廣泛地採用核燃料於實際需要，除了要研究相應的動力裝置的技術問題以外，還需要更進一步地研究核轉變。因為所有的核轉變除了質子外，中子也參與這一轉變，所以中子性質的研究顯然是原子核物理學中最重要問題之一。

原子核的性質及其轉變的特點決定於中子與質子的相互作用力。假若這個力知道得象電子和原子核之間的電磁力那樣清楚，那末，原子核的性質便可以預知得象用量子力學預測原子的性質那樣成功了。

中子與質子之間相互作用的主要力是所謂非電磁性質的核力。我們知道，核力只明顯地表現在極小的距離上，這距離的數量級為 10^{-13} 厘米；在這距離內，核力超過了質子間的庫倫斥力，所以主要由核力決

定原子核的性質。同時我們知道，核力不是有心力，所以不能象庫侖力或重力那樣把核力寫成距離的簡單函數。但這些關於核力的知識，要用來計算任何原子核的性質則還遠不夠用。所以近代原子核物理學得到的所有關於原子核性質的知識（質量、激發能級、機械矩和磁矩等等）不過是一套實驗數據，只在某些情況下靠理論分析才大致有些系統。另一方面，為了建立完整的核力理論，需要更豐富的實驗數據。我們必須詳細地和系統地研究質子和中子與原子核相互作用以及它們之間的相互作用，全面地闡明核力的特性。

研究這種相互作用最好的對象是中子。雖然帶電粒子（質子、 α 粒子）之間也有核力，但庫侖斥力使原子核的相互作用複雜化，有時甚至完全排除了研究原子核間相互作用的可能性。中子毫無電荷，沒有靜電作用，所以中子與其他粒子以及與原子核間的相互作用表現得簡單些，因此，研究起來有不少方便（特別是慢中子，可以毫無阻礙地靠近原子核，直到 10^{-13} 厘米數量級的距離。在這個距離已經有核力表現出來，帶電粒子想達到這樣近的距離只有在速度非常快的情況下才有可能）。因此，中子性質的研究對解決原子核物理學上的主要問題——建立原子核相互作用的規律，是極端重要的。

沒有電荷，因而也就沒有庫侖斥力，這使中子成為對原子核發生作用的最有力的工具。研究中子與原子核相互作用的有效截面和能量的關係可以確定核的能級圖，這也是核的主要特性之一。

近代所知道的大部分原子核轉變是從許多物質經中子照射發現的。經過一個很長的時期直到本世紀四十年代，原子核物理學尚未獲得速度快得足能使重核分裂的帶電粒子。中子就成了唯一的適于使重核轉變的工具。大部分人造放射元素過去都是用中子照射的方法獲得的。在近代，大部分人造放射元素，不管是大量還是小量製備，也同樣是用中子照射物質的方法獲得的。

人們對用中子照射法獲得的人造放射性進行研究，結果在 1939 年

发现了重核的裂变，这种裂变同时放出大量能量。在裂变时所产生的次级中子的发射，显露实现裂变的链式过程和大規模利用裂变能量的可能性。所以在原子核反应堆中，中子起着决定性的作用，从这个观点来看，中子性质的研究也同样是非常重要的。

各种原子核反应堆的制造和使用，开辟了广泛采用强中子流于实用目的的可能性。例如，最近在化学、生物学和医学上，已极广泛地采用了原子核反应堆所制出的各种人造放射性同位素。此外，中子束可以用于各种物质的结构分析，并且在这方面，中子比别种射线，譬如比起 X 射线来，往往是更有效的工具。

因此，中子的研究是紧密地与以下重要的科学和实际问题有关：

1. 研究基本粒子的原子核相互作用和核力的特性；
2. 研究核转变和各种核的能量状态；
3. 各种材料的定量分析和结构分析；
4. 工业规模核能的获得；
5. 人造放射性同位素的获得；
6. 中子对有机体的生物学作用。

由于中子在科学和技术上应用的广阔发展，关于中子性质的研究有大量原始材料发表在各种不同的期刊上。在这方面作品的数量，现在已经足够建立一个物理学的独立部门，即中子物理学，这本书便是企图将近代材料加以系统的叙述。

第一章 中子的基本性質

§ 1. 中子的發現

在 1919 年，卢瑟福首先用 α 粒子实现了氮核的人为蜕变。此后，人們便开始大力地进行人为核转变的研究。直到 1931 年，还没有一个加速器能使粒子加速到足以使核蜕变的能量，我們知道的唯一的蜕变过程是 (α, p) 反应，这种反应是用天然放射元素的 α 粒子实现的。我們已經确知，大多数輕元素当用 α 粒子轟击时发射質子。所有各种核，凡是它的电荷不太大，因而庫侖斥力不至于阻碍 α 粒子跟它靠近者，它的 (α, p) 反应差不多都已观察到。所有的輕元素，一直到鉀，除了少数的例外，全都可以用 α 粒子轟击的方法使它們蜕变。但这些例外都是特別輕的元素，例如 Be 和 Li。当用 α 粒子轟击这些元素时，不会放出質子来。但在 1930 年，玻特和貝开尔[1]指出，这些元素以及許多其他元素被 α 粒子轟击时发射出一种鉛也不容易吸收的輻射，这种輻射对盖革、弥勒計数器有作用。此类輻射具有强大貫穿本領，过去都認為是 γ 射綫。有人曾企图根据此种 γ 射綫在鉛中的吸收系数測定它的能量，但此吸收系数太小了，只等于 0.22/厘米[2]。我們知道，能量为 3—4 兆电子伏的 γ 射綫在鉛中具有最小吸收系数，但亦不低于 0.46/厘米。随着鈹的此种輻射的研究，出現越来越多的事实，这些事实都与把此种輻射看成 γ 輻射的假定相矛盾。

居里和約里奧[3]用电离室証明上述的这种輻射从石蜡中打出質子，这些質子在空气中的射程达 26 厘米，这相当于 4.3 兆电子伏的能量。有反冲質子形成，可以用观察它在威耳孙云室中徑迹的方法直接証实。假若我們認為这些反冲質子是由于与 γ 量子碰撞的結果而产生的，

就象在电子上的康普頓效应一样，那末便可以計算 γ 量子所必需的能
量。从已知的德拜、康普頓公式

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{Mc}(1 - \cos \theta)$$

(式中 λ 和 λ' 是入射量子 and 散射量子的波长； θ 是散射角)，再用能量
守恒定律

$$h\nu = h\nu' + E$$

(式中， ν 和 ν' 是入射量子 and 散射量子的频率； E 是反冲粒子的动能)，
很容易得出在对正碰撞时($\theta = 180^\circ$) E 和 $h\nu$ 间的关系，这时反冲能量
 E 是最大的。关系式如下：

$$E = \frac{2h\nu}{1 + \frac{Mc^2}{h\nu}}$$

式中， M 是質子質量。

将 $E = 4.3$ 兆电子伏和質子靜能量
 $Mc^2 = 931$ 兆电子伏代入此公式，得到
 $h\nu = 47$ 兆电子伏。

居里和約里奧根据这种計算断定，
假若所观察的反冲質子是由于 γ 量子在
質子上散射而成的，那末，此 γ 量子的能量必須約为50兆电子伏。在
那时已經可以得出結論說，用这种假設，能量的平衡不符合能量守恒定
律。同时也已証明，反冲質子的数量，比起从克莱因、仁科公式得出的
数量大好几千倍，但用克莱因、仁科公式来确定康普頓效应几率，经过
許多实验証明它是可靠的。

查威克[4]用带有直綫性放大器 and 示波器的脉冲电离室(图1)証明，
用 α 粒子轟击铍时所产生的輻射不仅能引起反冲質子，而且也能产生
其他的反冲核——鋰、鈹、硼、碳和氮的核。这些反冲核的能量可以
根据电离室内脉冲的大小或它的射程来測定(图2)。查威克进行了这

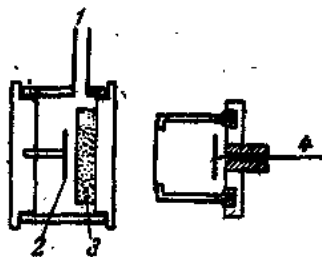


图 1. 查威克用来发现中子
的装置的示意图。
1—接抽气机；2—Po源；3—Be；
4—接放大器和示波器。

种测量和其他测量后，确定氮的反冲核能量为 1.2 兆电子伏。按康普顿效应形成此种反冲核， γ 量子必须有更大的能量，约 70 兆电子伏。

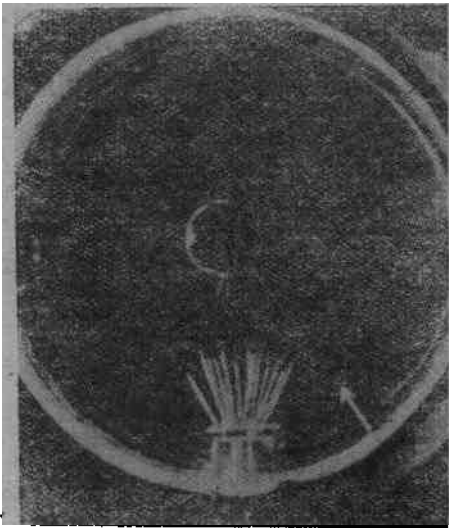


图2. 喇塞提最早观察到的反冲质子径迹中的一条(在威耳孙云室中)。

查威克分析了实验结果后，得结论说，玻特和贝开尔所发现的辐射并不是由 γ 量子组成的，而是由具有一定静质量的粒子组成的。此假说和所有的实验结果都非常符合。因为所发现的这种粒子具有很大的贯穿本领，同时在威耳孙云室中不产生直接的电离，它的电荷必定非常小或者就等于零，所以我们把它叫做中子。

笛氏在查威克实验之后进行了专门的实验，他的实验结果使中子电荷数值上限有了定量的估计[5]。笛氏观察中子穿过威耳孙云室内的气体，证明中子在每通过 3 米长的路径上所产生的离子对的数目不会多于一。这就是说，中子与电子的相互作用是非常微弱的，所以中子的电荷是非常小的。用他所求出的电离密度的上限(每 1 厘米不到 10^{-3} 对离子)与具有若干兆电子伏能量的质子的电离密度(数量级每 1 厘米达 10^3 对离子)相比较；同时考虑到电离的几率与电离剂粒子电荷的平方成正比，我们便不难看出，中子的电荷最大也不过只有质子的千分之一。因为电荷在数量上不能小于质子(或电子)的电荷，那末，十分自然地可以认为中子的电荷等于零。

根据查威克的测量结果可以决定中子的质量。现在只研讨一下具有最大转换能量反冲核的正碰，动量和能量守恒定律可以写成：

$$mv = mv' + MV; \quad mv^2 = mv'^2 + MV^2,$$

式中, m 是中子的質量, v 和 v' 是中子在碰撞前和碰撞后的速度, M 和 V 是反冲核的質量和速度。

消去 v' , 得到

$$V = \frac{2m}{M+m}v.$$

为了測定中子質量 m , 必須測量两个不同原子核的最大反冲能量 $E_1 = \frac{M_1 V_1^2}{2}$ 和 $E_2 = \frac{M_2 V_2^2}{2}$, 同时必須知道 M_1 和 M_2 。将上面得出的 V 的式子写成比例关系, 得到

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{M_2 + m}{M_1 + m}.$$

查威克从实验得出氫和氮的反冲核速度各为 3.3×10^9 厘米/秒和 4.7×10^8 厘米/秒, 把这二值代入上式, 得到

$$m = 1.15 \text{ 原子質量单位} \textcircled{1},$$

同时, 得出結論, 中子的質量在实际应用上与質子的質量是一样的。所以当用 α 粒子轟击鈹时, 鈹的轉变伴随着中子的发射。

更进一步的实验很好地証实了查威克的結論。由于中子性質的研究, 許多非常有趣的数据丰富了原子核物理学, 也摆脱了当时有关此問題的假說的极严重的困难, 那时的假說把原子核看成是由質子和电子組成的[6]。

中子的发现引起原子核物理学研究工作的飞速发展。这些研究工作的开始阶段在許多書中都講到[7, 8, 9]。关于中子性質研究最重要的結果是由費密、阿馬耳狄与他們的同事們在意大利求得的。他們发现, 当物質被中子照射时有放射性发生, 并且指出不仅輕元素能被激活, 重元素也能被激活。比方說, 早在 1934 年的实验便已发现, 当鈾被

① 此处和以后, 原子和原子核的質量均用所谓物理質量单位来表示, 即設氧的同位素 O^{16} 的質量精确地等于 16 单位; 此質量单位称为原子質量单位。

中子照射时，就有某些放射性同位素生成。我們知道，在世界上許多實驗室都更进一步地进行此问题的研究，后来，汉恩和史脱喇斯曼发现了重核的裂变。同时费密第一个推出用氘来减速中子的理論，并用实验加以証明。

费密发现的用中子激发来产生放射性提供了研究中子性質的有效方法。和费密同时，許多其他實驗室，尤其是苏联的，都进行此种研究。在列宁格勒物理技术研究所，以И. В. 庫尔查托夫为首的一批物理学家进行了中子与物質相互作用的研究，同时用中子照射物質的方法获得了許多放射性同位素。我們知道，在这些实验过程中，庫尔查托夫兄弟、卢辛諾夫和梅薩夫斯基[10]发现了人造放射性同位素具有原子核同質异能現象，也詳細地研究了慢中子的选择吸收現象。在阿尔齐莫維奇、庫尔查托夫、梅薩夫斯基和帕利宾的作品[11]中，指出此种吸收带有共振特性。事实上，后来的实验証实了选择吸收的共振特性，因而根本修改了大家都知道的玻尔关于中子与原子核相互作用特性的那些認識[12]。

在列宁格勒大学，陸基尔斯基和察雷娃进行过中子减速过程的研究。和其他實驗室同时，他們指出在石蜡中有热中子存在，并且証明了中子和石蜡間的热平衡現象[13]。同时在他們的实验中，証明了鉛对中子的减速作用，此現象被解釋为非彈性原子核散射的結果[7]。

在哈尔科夫物理技术研究所，雷彭斯基和他的同事們曾多方面地研究单色光激中子以及慢中子与物質的相互作用。他們查明，与原子核相互作用的共振特性并非慢中子所特有，快中子也有，因为光激中子与原子核的相互作用截面随着核不同而变化很大，这点与具有連續譜的快中子的实验結果不同，后者的截面与核的大小的关系曲線比較平滑[14]。

在发现重核裂变的时期，苏联关于中子物理学的研究在很多物理實驗室中都有广泛的开展。在这些研究过程中，在苏联，除了阐明裂变

过程的各种不同特点以外，还找到裂变过程的許多在原則上重要的特征。例如，彼得热克和伏辽罗夫[15]发现鈾的自发裂变，此现象具有极大的科学和实用价值。有可能实现鏈式反应的裂变过程的最重要特点就是发射次級中子的数量 ν 大于 1。在卢辛諾夫和伏辽罗夫的实验中曾进行了上述情况的証明和 ν 值的測定[16]。这些工作結果(后来又經大量研究所証明)給建立裂变的鏈式反应問題以及其实际应用的可能性打下了实验基础。

在捷耳道維奇和哈里頓的著作中曾經对裂变的鏈式反应的基本特点加以分析[17]。他們叙述了可能产生鏈式反应的条件，并且闡明了为了真正产生鏈式反应，那些系統是可以的，那些不可以，尤其是，捷耳道維奇[18]首先闡明緩发中子在調节鏈式反应过程中的作用。苏联在战前，在中子物理学方面工作的主要結果都在 1939 年和 1940 年召开的原子核物理学會議中报告和討論过。

从 1941 年 6 月起，在反希特勒德国的战争中，苏联所有的資源都处于极端困难的境地，有好几年实际上停止了原子核物理学的研究。物理实验室的主要人員都被召去解决刻不容緩的国防問題，年青的物理学家中的基本干部都被征加入陆軍直接参加战斗。許多实验室由于被敌人占領停止了工作(如哈尔科夫)，其他的由于封鎖的严重情况也停止了工作(如列宁格勒)。这就減低了苏联在原子核物理学研究上的速度，造成在战争年代在原子核物理学方面苏联暂时落后于美国发展的水平，那时在美国，不仅可以保持他們的研究进度，而且實質上是加强了。在战后，这种迫不得已的中断已不复存在。苏联物理学家已提高到現代科学水平，在較短的时间內已走上广泛的科学研究和实际应用的大道。

§ 2. 中子的質量

中子質量的最早測定是由查威克根据他发现中子所进行的实验做

出的。由中子造成的各种反冲核的能量测量可以作为测定中子质量方法中最基本的一种。但这个方法是 inaccurate 的，因为反冲核的能量必须根据它的射程或它在电离室中所造成的总电离来测定。同时，射程和能量之间以及电离和能量之间的经验关系是不够准确的，特别是比 α 粒子重又具有同样小动能的核，这种关系更不准确。所以查威克用反冲核所做的中子质量的最早测定是相当不准确的。

后来关于中子质量的测定，是根据自由中子形成时所发生的各种核反应的能量平衡的分析，或正相反，是根据自由中子被俘获时所进行的各种核反应的能量平衡的分析。这类反应之一，即 $B^{11}(\alpha, n)N^{14}$ 反应，查威克在他发现中子后不久，便采用了。按此反应来测定中子质量必须知道 B^{11} ， α 和 N^{14} 的质量，也必须知道用来轰击的 α 粒子的能量，再测量在反应结果中所呈现的中子能量 E_n 和氮核能量 E_N 。实际上只测量 E_n 便足够了，因为 E_N 不大，并且如果对中子质量取一个近似已知值， E_N 便可以足够精确的计算。中子的能量，查威克是根据向前飞行的反冲质子（也就是由正碰撞的结果所形成的反冲质子）的能量来测定的。因为在此处，质子的能量也是按它的射程来测定，所以这种方法也是不准确的。此外，在这种情况下测定中子的质量，需要知道三个别的原子核的质量，而这些质量本身也是测得不够准确的。

较晚， m 的测定是根据对轻核的 (n, p) ， (p, n) ， (d, n) 和 (γ, n) 反应中能量平衡的研究[19—21]。这些测定大多数都归结于计算中子和氢原子的质量差，所以也就是归结于直接比较中子与测量得最准确的质子的质量。

在 (n, p) 反应中便于研究的是 $N^{14}(n, p)C^{14}$ 反应。因为它是慢中子反应，中子的动能可以忽略不计，在能量平衡时可以不考虑。在此种情况下，能量守恒定律可以写成 $N^{14} + n = C^{14} + H^1 + Q$ ，若 Q 为反应能量，原子和粒子的符号表示它们的静止能量。因此， $n - H^1 = C^{14} - N^{14} + Q$ ，即中子与氢原子的质量差 $m - H^1$ ，若用能量单位来表示，则