

# 超级 $J/\psi$ 工厂里的“子弹”

## ——研究反中子、超子与核相互作用的新方法\*

宋维民<sup>1,2,†</sup> 苑长征<sup>2</sup>

(1 吉林大学物理学院 长春 130012)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

# Using the “bullets” in a future super $J/\psi$ factory to study the interaction of antineutrons and hyperons with nuclei

SONG Wei-Min<sup>1,2,†</sup> YUAN Chang-Zheng<sup>2</sup>

(1 College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2021-09-24收到

† email: weiminsong@jlu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220405

**摘要** 物理学家通过使用微小的亚原子“子弹”轰击研究对象来研究亚原子世界。根据这些“子弹”从目标弹回的方式，人们可以推断出有关目标结构的大量详细信息。不同种类的亚原子“子弹”探测目标的不同方面信息，将原子核内部核子结合在一起的力的某些重要信息只能通过发射反中子和超子来研究，这些粒子通常被认为是很难产生和控制的。然而近期有研究表明，这些稀有的粒子可以通过“超级 $J/\psi$ 工厂”大量产生。通过标记 $J/\psi$ 衰变产生的反中子、超子或反超子，并用其轰击探测器中心附近的靶物质，可以研究从原子核到中子星结构相关的物理过程。这项“黑天鹅技术”为粒子物理、核物理学以及天体物理学和医学物理学开辟了新的研究途径。

**关键词** 超级 $J/\psi$ 工厂，反中子，超子，原子核

**Abstract** Physicists investigate the subatomic world by bombarding their subject of study with a hail of tiny subatomic “bullets”. From the way these “bullets” bounce off their target we can infer a wealth of detailed information about the target’s structure. Different kinds of subatomic “bullets” probe different aspects of the target; certain important aspects of the force holding atomic nuclei together can only be investigated by shooting particles called antineutrons and hyperons, which are believed to be very difficult to produce and control. However these usually rare particles can be produced in copious amounts and easily launched as a spinoff in a “super  $J/\psi$  factory”. This opens fresh research opportunities in particle and nuclear physics, as well as in astrophysics and medical physics, requiring no additional infrastructure.

**Keywords** super  $J/\psi$  factory, antineutron, hyperon, nuclei

\* 国家重点研发计划(批准号: 2020YFA0406300)、国家自然科学基金(批准号: 11961141012, 11835012, 11521505)资助项目, 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

## 1 散射实验历史回顾

“世界是由什么构成的”这一问题是人类探索的永恒主题。随着科学的进步，人们慢慢认识到物质是由原子构成的，原子是由原子核和核外电子构成的，原子核是由质子和中子构成的，质子和中子是由夸克构成的。在这一认识历程中，粒子的散射实验发挥了巨大的作用。

散射实验的核心思想是利用特定的粒子源轰击靶物质，继而通过测量从靶物质“反弹”出来的粒子信息反推靶物质的结构以及粒子源与靶物质相互作用的规律。这可以类比我们用眼睛看东西：通过用眼睛观察光线在物体表面的反射，来反推物体的形状和颜色。1910年前后，卢瑟福领导开展的、后来被称为“卢瑟福散射”的实验，是这个思想在物质结构研究领域应用的典型。在卢瑟福的建议下，盖革和马斯顿用如图1所示的散射实验装置，观测到了 $\alpha$ 粒子的大角度散射事例<sup>[1]</sup>。随后基于上述实验结果，卢瑟福提出了“原子内部包含一个很小的、带电的核”这一思想，揭开了原子内部结构的面纱<sup>[2]</sup>。

粒子源的制备是散射实验的关键之一。粒子加速器技术成熟之后，粒子源的种类和能量便不再受限于天然或人工放射源，几乎所有的长寿命粒子都被做成了粒子源去轰击靶物质，如电子、正电子、正反缪子、正反质子、K介子、 $\pi$ 介子等带电粒子，光子、中子、中微子等中性粒子。上述粒子源都较容易产生，尤其是带电粒子还可以用电磁场加以精确的控制。这些粒子源，往往都是

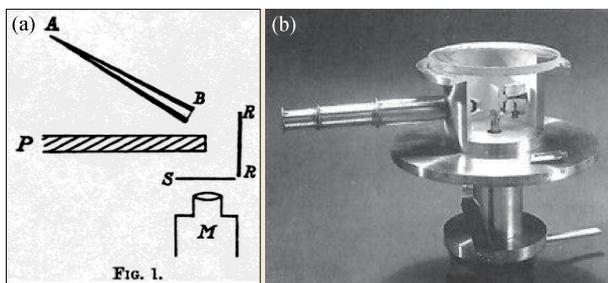


图1 (a)盖革—马斯顿实验装置示意图，其中AB是 $\alpha$ 粒子的发射装置，R是靶，S是闪烁体，M为显微镜，P为屏蔽材料<sup>[1]</sup>；(b)原装置的复制品

各个大型科研中心的“重器”，例如欧洲核子中心的质子源、中子源，德国同步辐射中心的介子源，美国费米实验室的中微子源，中国东莞的散裂中子源等。利用各种粒子源进行的实验彼此互补，从不同的视角窥探物质性质，在物理学、材料科学、生命科学、化学的研究中取得了一系列的开创性成果。然而，也有一些粒子源，虽然有巨大的研究潜力和应用前景，却由于各种限制很难大量制备，如反中子源、超子源以及含重夸克的粲粒子源和底粒子源等。

## 2 反中子源和超子源的困境

中子的反粒子——反中子，因其不存在于普通物质的原子核中，且不带电荷，十分难以制备。尽管反中子在研究量子色动力学的非微扰特性、核子结构等重要问题上有巨大的优势，例如相比于用反质子源研究核子的结构，用反中子源探测核子结构时不需要考虑复杂的库仑相互作用，但是迄今为止基于反中子源的实验装置十分有限，主要有美国布鲁克海文国家实验室的E-767实验<sup>[3]</sup>和欧洲核子中心的OBELIX实验<sup>[4]</sup>。这两个实验都是通过质子—反质子交换电荷产生中子—反中子这一反应过程获得反中子源。尽管两个实验反中子的统计量有限且探测器的精度不是很高，人们利用这两个实验，开展了关于反中子—质子散射、反中子与不同原子核的相互作用、湮灭末态中的OZI规则破坏效应、强子谱和奇特强子态，以及末态中含有K介子的过程等一系列世界上的首次研究，极大地加深了人们对于核子结构、强相互作用等重要物理前沿问题的理解<sup>[5]</sup>。然而受限于产生机制，上述两个实验的反中子的动量都低于500 MeV，而且作为源的反中子的动量和角度等都很难精确控制。虽然后来人们提出了用更高流强的反质子束流产生更多的反中子，但是事例率、动量、角度分辨等问题仍旧难以取得显著的突破。

超子，因其与质子、中子性质接近但质量较重而得名。因为基态超子中的奇异夸克通过弱相互作用衰变，它们的寿命一般较长，原则上也可

以被制作成粒子源，例如  $\Lambda$  超子，其寿命为 263 ps，虽然不如反中子寿命长，但其寿命乘以光速也接近 8 cm，在一般粒子物理实验中也被看作是长寿命粒子，研究超子与物质的相互作用有助于人们理解诸如超核以及中子星

内部超子的贡献等问题<sup>[6]</sup>。但是历史上人们通过 K 介子打靶实验获得的  $\Lambda$  超子源的强度十分有限，仅仅观测到了几百个  $\Lambda$  超子与物质相互作用的事例。日本大强度质子加速器设施(J-PARC)强子实验大厅扩展项目将增加一个靶站和四条新的束线进行包括  $\Lambda$ 、 $\Sigma$ 、 $\Xi$ 、 $\Omega$  等超子相关的研究<sup>[7]</sup>，但由于产生机制的限制，很难使粒子产额有量级上的提高。

### 3 粒子源制备的新思路

2021 年，一篇题为“Cornucopia of antineutrons and hyperons from a super  $J/\psi$  factory for next-generation nuclear and particle physics high-precision experiments”的文章在《物理评论快报》上发表<sup>[8]</sup>，并被编辑推荐。文章提出了一种新的产生优质反中子、超子等以前难以制备的粒子源的方法，即通过正负电子对撞产生的海量粲偶素衰变产物中的反中子、超子作为粒子源，继而打在安放于探测器中心附近的靶物质上，进行散射实验。

这种新方法的核心思想如图 2 所示，正负电子的能量调整至粲偶素  $J/\psi$  的质量为 3.097 GeV 时， $J/\psi$  这个由丁肇中先生 1974 年发现的粒子便会大量产生，因为它是不稳定粒子，产生之后立即衰变为其他粒子。 $J/\psi$  的衰变道中有一些含有反中子或超子等我们需要的粒子，这些粒子在飞行的过程中，会与安放在束流管外的靶物质发生散射反应，散射产生的粒子，如图 2 中的  $\pi$  介子、光子、质子等会被探测器记录下来，通过分析就可以得到反中子或超子与物质相互作用的信息。

图 2(a)显示的是在  $J/\psi$  衰变为  $p\pi\bar{n}$  过程中，

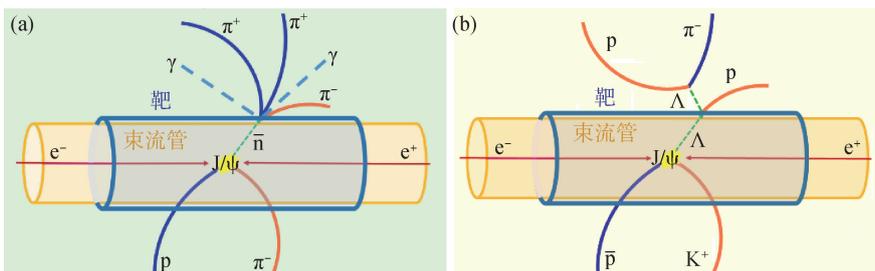


图 2 粲偶素衰变产生反中子(a)和  $\Lambda$  超子(b)并与靶物质散射示意图

反中子  $\bar{n}$  与靶物质中的质子散射产生  $\pi^+\pi^+\pi^-\gamma\gamma$  的过程。通过选择  $p$  和  $\pi^-$ ，可以精确确定出反中子  $\bar{n}$  的动量和发射方向，从而可以测量一定动量的反中子与静止的原子核(图中为氢原子核即质子)散射的截面。图 2(b)显示的则是在  $J/\psi$  衰变为  $p\bar{K}^+\Lambda$  过程中， $\Lambda$  超子与靶物质中的质子弹性散射并且  $\Lambda$  超子衰变为  $p\pi^-$  的过程。通过选择  $p$  和  $\pi^-$ ，可以精确确定出  $\Lambda$  超子的动量和发射方向，从而可以测量一定动量的  $\Lambda$  超子与静止原子核的散射截面。因为这两个过程中的反中子和  $\Lambda$  超子的动量是连续的，因此可以在一个实验中同时测量这些相互作用随入射粒子动量的变化，极大地降低了实验的投入。

利用类似的过程，也可以大量产生其他的长寿命超子，如含一个奇异夸克的  $\Sigma^+$  和  $\Sigma^-$ 、含两个奇异夸克的  $\Xi^0$  和  $\Xi^-$ 。含有三个奇异夸克的  $\Omega$  超子质量较高，在  $J/\psi$  衰变中无法产生，但在  $J/\psi$  的激发态  $\psi(2S)$  的衰变中产生，因此可以在正负电子对撞中产生  $\psi(2S)$  后再进一步研究  $\Omega$  超子与物质的散射。值得指出的是，这些超子的反粒子，在  $J/\psi$  或  $\psi(2S)$  衰变中跟相应超子的产额相同，所有超子跟靶物质的散射研究都可以推广到反超子跟靶物质的研究，而这种研究在之前是从来没被考虑过的，如果不更改实验方法该研究在未来也几乎是不可能实现的，因为在其他可能的实验方法中反超子的产额要远小于超子的产额。

与以往的实验相比，这种新方法可以说“物美价廉”。所谓“物美”，即反中子和超子的产额和品质都很高；所谓“价廉”，即可以在一个实验设施中同时研究多种粒子源与靶物质的散射，不需要像通常的实验一样对每种粒子源都建造新的

设备和设施。

这种方法的可行性可以用运行在北京正负电子对撞机(BEPC II)上的北京谱仪(BES III)实验<sup>[9]</sup>为例来具体说明。虽然BES III实验在设计和建造中没有考虑将它作为粒子源研究与靶物质的散射,但其采集的数据样本已经可以提供相当数量的源粒子,内层探测器中的物质层已经充当了靶物质,并且已经有大量的散射事例被记录下来了。为了研究轻强子谱寻找胶球等奇特强子态,BES III已经积累了100亿J/ψ事例,其中大约千分之二衰变为图2(a)中举例的过程,北京谱仪探测器观测到反中子伴随产生的质子和π介子的效率约为40%,用上述数字做乘法可以得出大约有800万的反中子会打到主要由铍做成的1.4 mm厚的束流管和由碳纤维做成的漂移室内1.2 mm厚的内筒上,这些数据就包含了前所未有的反中子与铍原子核和碳原子核散射的信息。北京谱仪优秀的探测器性能,保证了对于反中子动量的测量精度可以到6—7 MeV,方向的测量达到毫弧度精度,显著优于上节提到的OBELIX实验;J/ψ衰变出来的反中子的动量可以远超过500 MeV达到1174 MeV,突破了以往实验的最高值。对于超子和反超子的情形,文献[8]也给出了估计。北京正负电子对撞机和北京谱仪已经建成,100亿J/ψ事

例已经获取完毕,新方法只是复用已经存在的数据,不需要任何额外的投入。当然,北京谱仪实验的研究瓶颈也是显然的:没有专门设计的靶物质,束流管半径较大导致大量超子在到达靶物质前衰变,J/ψ事例数较少等。

为克服以上缺点,并最大可能地优化反中子、超子、反超子相关的物理研究,我们可以建造一个基于正负电子对撞的“超级J/ψ工厂”:加速器亮度优化在3.097 GeV,并适当考虑可以运行在ψ(2S)能量3.686 GeV,亮度比BEPC II高100倍达到10<sup>35</sup> cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>或更高,同时减小束流管的尺寸以便将靶物质放在离对撞点尽可能近的地方以提高散射超子的比例,为不同靶物质留出安放空间并设计可替换的靶物质等。在这样的实验上,每年可以获取10<sup>12</sup>或更多J/ψ事例,表1给出了对应于10<sup>12</sup> J/ψ事例,利用所列的衰变道,在束流管半径为1 cm和2 cm两种假设下,可以打到束流管后面靶物质上的反中子和超子的数目(Ω粒子产额根据10<sup>12</sup> ψ(2S)事例计算)。可以看到,每种源粒子的数目都在10<sup>7</sup>—10<sup>8</sup>量级,这会使得目前很多无能为力测量成为精确测量,向我们揭示反中子、超子和反超子与原子核相互作用的机制。如果正在讨论的加速器单能对撞模式能够实现<sup>[10]</sup>,每年可以获取的J/ψ事例将会进一步提高10

倍,在超级J/ψ工厂的大约10年运行寿命中将会积累10<sup>14</sup>甚至更多的J/ψ事例,我们对相关物理探测的精度将可以达到难以置信的高灵敏度。

无独有偶,近年也有基于完全不同的物理目标提出的建造“超级J/ψ工厂”的需求,即利用J/ψ衰变为超子对末态粒子的量子关联寻找超出标准模型CP破坏的来源<sup>[11]</sup>和精确测量对撞电子的纵向极化从而高精度抽取电弱相互作用混合角<sup>[12]</sup>。结合本文提出的对反中子与原子核和(反)超子与原子核相互作用的高精度测量,这三个独特的目标可以成为建造“超级J/ψ工厂”最重要的

表1 10<sup>12</sup> J/ψ事例中的反中子及超子源粒子数(Ω粒子产额根据10<sup>12</sup> ψ(2S)事例计算),所列粒子的反粒子的产额与它们的产额相等\*

重子	cτ/cm	衰变模式	B <sub>tag</sub> /%	ε <sub>tag</sub> /%	f <sub>1cm</sub> <sup>r</sup> /%	f <sub>2cm</sub> <sup>r</sup> /%	N <sub>1cm</sub> <sup>r</sup> /(×10 <sup>6</sup> )	N <sub>2cm</sub> <sup>r</sup> /(×10 <sup>6</sup> )
$\bar{n}$	2.6×10 <sup>13</sup>	J/ψ → pπ <sup>+</sup> $\bar{n}$	100	50	100	100	850	850
Λ	7.89	J/ψ → $\bar{\Lambda}$ Λ	64	40	76	65	370	310
		J/ψ → pK <sup>+</sup> Λ	100		70	55	240	190
Σ <sup>-</sup>	2.40	J/ψ → $\bar{\Sigma}^+$ Σ <sup>-</sup>	52	40	49	27	150	84
		J/ψ → $\bar{\Lambda}$ π <sup>+</sup> Σ <sup>-</sup>	64		38	17	81	36
Σ <sup>-</sup>	4.43	J/ψ → $\bar{\Lambda}$ π <sup>+</sup> Σ <sup>-</sup>	64	40	56	35	—	—
Ξ <sup>0</sup>	8.71	J/ψ → $\bar{\Xi}^+$ Ξ <sup>0</sup>	64	20	72	57	110	85
		J/ψ → $\bar{\Xi}^+$ π <sup>+</sup> Ξ <sup>0</sup>	64		66	49	—	—
Ξ <sup>-</sup>	4.91	J/ψ → $\bar{\Xi}^+$ Ξ <sup>-</sup>	64	20	60	40	74	50
		J/ψ → $\bar{\Xi}^0$ π <sup>+</sup> Ξ <sup>-</sup>	64		52	30	—	—
Ω	2.46	ψ(2S) → $\bar{\Omega}^+$ Ω <sup>-</sup>	44	20	31	11	1.4	0.5
		ψ(2S) → $\bar{\Xi}^0$ K <sup>+</sup> Ω <sup>-</sup>	64		18	4	—	—

\* 其中, cτ表征了粒子的飞行距离, B<sub>tag</sub>为标记过程的分支比, ε<sub>tag</sub>为典型的探测效率, f<sub>n cm</sub><sup>r</sup>为靶物质在离对撞点n cm处时源粒子剩余的比例, N<sub>n cm</sub><sup>r</sup>为靶物质在离对撞点n cm处源粒子的数目

物理动机。

近些年来,人们提出了与“超级 $J/\psi$ 工厂”类似的正负电子对撞机项目,即中国的超级陶粲工厂<sup>[13]</sup>和俄罗斯的超级粲陶工厂<sup>[14]</sup>。这两个项目设计的对撞机质心系能量为2—7 GeV,都包含了 $J/\psi$ 和 $\psi(2S)$ 粒子的产生能区,并包含了其他的物理目标。通过适当修改对撞区的设计,它们也可以用来进行上面提到的利用反中子、超子和反超子源进行的研究。

## 4 总结

通过实验思想上的创新,即通过粲偶素衰变产生的反中子、超子以及它们的反粒子作为源粒子,能够高精度地开展反中子、超子、反超子与原子核的散射实验,这为粒子物理、核物理学、天体物理学和医学物理学研究开辟了新的研究途径。建造一台加速器亮度、探测器性能都优化在该类物理过程上的“超级 $J/\psi$ 工厂”,我们将以超出想象的高灵敏度探究小至原子核内部大至中子星结构相关的物理,加深对物质世界的认识。利用目前北京正负电子对撞机上的北京谱仪实验的数据,我们已经能够“物美价廉”地开展反中子、超子、反超子与原子核相关的散射实验,虽然研究的过程和测量的精度会受到多方面的限

制,但已经可以提供一些前所未有而又迫切需要的实验信息。

让“超级 $J/\psi$ 工厂”生产的子弹飞一会儿,看它最后打到了谁?

## 参考文献

- [1] Geiger H, Marsden E. Proceedings of the Royal Society of London A. 1909,82(557):495
- [2] Rutherford E. Philosophical Magazine, Series 6, 1911, 21 (125): 669
- [3] Armstrong T *et al.* Phys. Rev. D, 1987, 36: 659
- [4] Agnello M, Botta E, Bressani T *et al.* Nucl. Instrum. Meth. A, 1997, 399: 11
- [5] Bressani T, Filippi A. Phys. Rept., 2003, 383: 213
- [6] Gal A, Hungerford E V, Millener D J. Rev. Mod. Phys., 2016, 88: 035004
- [7] Nagae T. Few-Body Syst., 2021, 62: 70
- [8] Yuan C Z, Karliner M. Phys. Rev. Lett., 2021, 127: 012003
- [9] Ablikim M *et al.* (BESIII Collaboration). Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 2010, 614: 345
- [10] Telnov V I. 2008, arXiv: 2008.13668
- [11] Kupsc A, Li H B, Olsen S L. Physics Potential of a High-luminosity  $J/\psi$  Factory. <https://www.snowmass21.org/docs/files/summaries/RF/SNOWMASS21-RF2-003.pdf>
- [12] Bondar A *et al.* JHEP, 2020, 03: 076
- [13] Zhao Z G. High Intense Electron Positron Accelerator. International Workshop on Physics at Future High Intensity Collider 2-7 GeV in China, Hefei, China, 2015
- [14] Levichev E. A Project of Super Charm-tau Factory in Novosibirsk. The 9th International Workshop on Charm Physics, Novosibirsk, Russia, 2018

读者和编者

## 订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅2年《物理》杂志,将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

### (1) 邮局汇款

收款人地址:北京市中关村南三街8号中科院物理所,100190

收款人姓名:《物理》编辑部

### (2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行

户名:中国科学院物理研究所

帐号:11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话:010-82649029; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn