

中国基于加速器的粒子物理发展战略研究

第一章：中国基于加速器的粒子物理领域的科学意义和战略价值

（整体要求：一是本领域能够解决的我国经济社会发展及国家安全领域中的关键科学问题和关键技术问题，尤其是对该领域能够解决的制约我国产业结构升级的关键技术问题、制约我国提高国际竞争力的卡脖子技术问题等所起到的作用进行具体、深入论证。二是本领域对于国家科学事业本身的意义和价值。重点回答该领域对于带动相关科学技术领域发展的贡献等问题。）

一、中国基于加速器的粒子物理领域的科学意义（分高能量前沿和高亮度前沿阐述）

二、中国基于加速器的粒子物理领域的战略价值（分高能量前沿和高亮度前沿阐述）

第二章：中国基于加速器的粒子物理领域的现状及其形成

（整体要求：一是对该前沿领域的形成进行回溯，从该前沿领域发展历程出发，回答是哪些内生性的动力和外在性的需求促成了该前沿领域的出现？由哪些关键科学发现、科学问题、技术问题或者哪些人物推动了该前沿领域的出现、使该领域成为前沿研究领域？二是对本前沿领域的研究现状进行综合回顾，从主要研究成果、专利、期刊著述、研究学会、研究人员的学科背景、人才培养、研究组织形式、经费与投入、资助管理模式等方面，来形成关于本领域发展现状的综合

性认识。三是立足国际,对于本前沿领域在国际上的位置和竞争力进行综合评估,包括本前沿领域在国际上的发展状况、本领域在国际上的地位和发展态势等。)

一、中国基于加速器的粒子物理领域的形成(分高能量前沿和高亮度前沿阐述)

二、中国基于加速器的粒子物理领域的现状(分高能量前沿和高亮度前沿阐述)

第三章：中国基于加速器的粒子物理领域的关键科学问题，关键技术问题与发展方向

(整体要求：一是从前沿领域发展态势、国家战略需求以及如何应对国际竞争的角度，前瞻未来15年、特别是未来5年领域的发展趋势，提出未来5~15年前沿领域的关键科学问题和关键技术问题、发展思路、发展目标、优先发展领域或重要研究方向。二是结合上述角度，对以上优先发展领域的战略重要性进行研判并排序，并对其理由进行充分阐述。)

一、高能量前沿

1) 物理综述 (长 document)

自然界存在四种基本相互作用：强，弱，电磁和引力相互作用。粒子物理标准模型描述自然界中基本粒子及其之间的相互作用。2012年7月4日，ATLAS和CMS实验组同时宣布在大型强子对撞机(LHC)上发现了Higgs粒子[1, 2]，因此，不仅标准模型中的所有基本粒子都已经被各种实验完全证实，而且标准模型被目前所有实验确认是正确的低能有效理论。众所周知，标准模型是二十世纪物理学最伟大的成就之一，但它不是粒子物理的终极理论。粒子物理目前最重要的前沿研究依然是进一步了解标准模型，特别是寻找超出标准模型的新物理。现阶段，我们有超出标准模型新物理的一些比较令人信服的证据[3]：暗能量、暗物质、中微子质量与混合、重子不对称性(Baryon Asymmetry)和暴胀等。同时标准模型理论自身有两类问题：精细调节问题和理论优美性的问题。精细调节问题包括：(1)宇宙学常数问题；(2)规范等级问题；(3)强CP问题；(4)标准模

型费米子质量等级问题。理论优美性的问题包括：(1) 规范相互作用不统一；(2) 费米子的不统一；(3) $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 规范耦合常数在高能标不统一；(4) 电荷量子化。另外，Higgs 粒子的四次耦合项系数在高能标约 10^{10} GeV 变负，故电弱真空不稳定，即真空稳定性问题 [4]。

标准模型的理论优美性问题原则上可以在大统一理论 [5] 中解决，除规范耦合常数统一问题。同时真空稳定性问题在新物理模型中很容易解决。因此，我们首先研究标准模型的主要问题是精细调节问题和规范耦合常数统一问题，然后研究大统一模型和超弦模型及其检验。在精细调节问题中，宇宙学常数问题目前可能的解释是弦景观 (String Landscape) [6, 7]，因为它同时能解决规范等级问题，所以其在粒子物理方向的预言是超对称破缺能标可以很高，即普适性的高能标超对称破缺 [8]，故在低能我们可能只观察到非超对称标准模型。因此，我们将研究非超对称标准模型的构造和唯象。

规范等级问题是研究超出标准模型新物理的主要动机，其最佳解决方案是超对称 [9]。超对称是费米子和玻色子之间的对称性，在超对称变换下，费米子变成玻色子，反之亦然。在超对称模型中，费米子和玻色子对 Higgs 粒子质量平方的量子修正互相抵消，故自然解决了规范等级问题。特别在没有破缺的整体超对称理论中，宇宙学常数自动为零，故其部分解决了宇宙学常数问题。在具有 Z_2 R 宇称的超对称标准模型中，我们可以得到规范耦合常数的统一，最轻的超对称粒子 (LSP) 如 Neutralino, Sneutrino, Axino, 或 Gravitino 等可以是暗物质粒子的候选者，以及电弱对称性可以通过辐射修正破缺等。因为规范耦合常数统一强烈地暗示了大统一模型，所以超对称是联系低能粒子物理与高能大统一模型和超弦模型的桥梁。但是目前大型强子对撞机 ATLAS 实验和 CMS 实验没有观测到超对称信号，故给超对称参数空间较强的限制。因此，如何构造自然的超对称标准模型和如何探测超对称是目前面临的两大主要问题。

基于四种基本相互作用具有共同起源的猜想，物理学家们一直在探索描述自然界最基本规律的大统一理论。大统一模型中不包含引力，而引力量子化是物理学中另一重大问题。目前超弦理论是最好的量子引力理论的候选者 [10, 11]。故将四种基本相互作用统一在一起的模型可能是超弦模型。特别是超弦大统一模型能自然解决四维大统一模型遇到的主要问题。大统一理论大致分为超对称和非超对称

大统一理论。两种大统一理论都预言了量纲为六的交换超重规范玻色子的质子衰变，同时超对称大统一理论预言了量纲为五的交换 Colored Higgsino 的质子衰变。未来的 Hyper-Kamiokande 实验和 DUNE 实验将测量量纲为六和五的质子衰变。但是超对称大统一模型预言的质子寿命比 Hyper-Kamiokande 和 DUNE 实验预计测量到的质子寿命下限要长。遗憾的是这两个实验由于资金问题，不能达到以前预设的科学目标。在非超对称大统一模型中，我们可以在 TeV 能标引入新的粒子来得到规范耦合常数统一。这些新粒子可以在将来的对撞机实验中检验。特别是大统一能标能够降低，故质子衰变有望在将来的 Hyper-Kamiokande 和 DUNE 实验中被检验。同时我们还可以构造低能大统一理论 [12]，它们也可以在将来的对撞机实验中被检验。

总之，我们将主要围绕 LHC 和以后可能的 CEPC, FCC_{ee}, FCC_{hh}, ILC, HL-LHC, HE-LHC, 和 SppC 对撞机实验来探索超出标准模型的新物理，同时结合 B 物理实验，Muon 反常磁矩实验，质子衰变实验，暗物质实验，宇宙学实验，Axion 实验，中微子实验，和引力波实验等一起全方位寻找超出标准模型的新物理。

参考文献:

- [1] S. Chatrchyan [CMS Collaboration], “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, Phys. Lett. B716, 30 (2012).
- [2] G. Aad [ATLAS Collaboration], “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, Phys. Lett. B716, 1 (2012).
- [3] H. Davoudiasl, R. Kitano, T. Li and H. Murayama, “The New minimal standard model”, Phys. Lett. B 609, 117 (2005).
- [4] G. Degrandi, S. Di Vita, J. Elias-Miro, J. R. Espinosa, G. F. Giudice, G. Isidori and A. Strumia, “Higgs mass and vacuum stability in the Standard Model at NNLO”, JHEP 1208, 098 (2012).
- [5] P. Langacker, “Grand Unified Theories and Proton Decay”, Phys. Rept. 72, 185 (1981).

- [6] L. Susskind, “The anthropic landscape of string theory”, arXiv:hep-th/0302219.
- [7] M. R. Douglas and S. Kachru, “Flux compactification”, Rev. Mod. Phys. 79, 733 (2007).
- [8] V. Barger, C.-W. Chiang, J. Jiang and T. Li, “Axion models with high-scale supersymmetry breaking”, Nucl. Phys. B705, 71 (2005).
- [9] J. Wess and J. Bagger, “Supersymmetry and Supergravity”, (Princeton Univ. Press, 1992).
- [10] M. B. Green, J. H. Schwarz, and E. Witten, “Superstring Theory”, Volumes 1 and 2 (Cambridge University Press, Cambridge, 1987).
- [11] J. Polchinski, “String Theory”, Volumes 1 and 2 (Cambridge University Press, Cambridge, 1998).
- [12] S. Chakdar, T. Li, S. Nandi and S. K. Rai, “Unity of elementary particles and forces for the third family”, Phys. Lett. B718, 121 (2012).

自然超对称模型

超对称自然地解释了标准模型中的规范等级问题。特别是在具有 Z_2 R 宇称的超对称标准模型中，我们能得到规范耦合常数统一和暗物质粒子候选者，同时通过辐射修正自然破缺电弱对称性等。但是目前大型强子对撞机 (LHC) 的实验没有观测到超对称的信号，故给超对称参数空间较大的限制（如 Gluino 和前两代 Squark 质量大于 2 TeV 左右等）。因此，一般认为超对称标准模型在电弱能标存在精细调节问题。为了满足 LHC 实验的限制，人们构造了各种自然超对称模型，如 Natural Supersymmetry, Compressed Supersymmetry, Stealth Supersymmetry, Supersoft Supersymmetry, Radiative Natural Supersymmetry, Super-Natural Supersymmetry 等。为了定量研究超对称标准模型的电弱精细调节问题，我们需要定义精细调节测度。一般来说有两类定义：高能标定义和低能标定义。高能标精细调节测度 $\Delta_{\text{EENZ-BG}}$ 是由 Ellis, Enquist, Nanopoulos 和 Zwiner, 以及 Barbieri 和 Giudice 给出；低能标精细调节测度有两种：一种是由 Kitano 和 Normura 给出的 Δ_{KN} ；另外一种是由 Baer, Barger, Huang, Michelson, Mustafayer 和 Tata 给出的 Δ_{BBHMT} ，这两种低能标定义 Δ_{KN} 和 Δ_{BBHMT} 对参数空间给出的限制大致差不多，并不很强，但是高能标定义 $\Delta_{\text{EENZ-BG}}$ 的确对参数空间给出了极强的限制。

Kitano 和 Normura 的低能标精细调节测度要求自然超对称标准模型具有比较轻的 Higgsino, 其质量小于 400 GeV, 同时轻的 Stop 质量小于 1.2 TeV, Gluino 质量小于 1.5 TeV. Baer, Barger, Huang, Michelson, Mustafayer 和 Tata 低能标精细调节测度也要求自然超对称标准模型具有比较轻的 Higgsino, 但是轻的 Stop 和 Gluino 可以比较重. 故低能标精细调节测度对自然超对称标准模型的一致预言是比较轻的 Higgsino, 同时希望 Gluino 和 Light Stop 比较轻。

因为超对称是联系低能标准模型与高能大统一模型和超弦模型的桥梁, 故我们需要解决高能标精细调节测度定义 $\Delta_{\text{EENZ-BG}}$ 导致的精细调节问题。目前自然的解决方案是 Super-Natural Supersymmetry。其要点是在超对称标准模型中, 所有的质量参数在大统一能标下来源于同一个超对称破缺参数, 如 No-Scale Supergravity 中的 Gaugino Mass $M_{1/2}$ 等。我们通过解析和数值计算分别论证了它的高能精细调节测度 $\Delta_{\text{EENZ-BG}}$ 在此情况下自动为 1, 故从根本上解决了超对称电弱精细调节问题。同时我们可将 Super-Natural Supersymmetry 推广到 Effective Super-Natural Supersymmetry, 其要点是所有具有大的精细调节测度的质量参数在高能标均有一个共同起源。这类模型一般预言了比较轻的 Bino, sleptons, 和 sneutrinos, 其中 Bino 是 LSP neutralino 的最主要组成部分。

因此, 对于以后 CEPC 的超对称研究可以重点研究 Higgsino, Bino, sleptons 和 sneutrinos 等。

短 document: 标准模型中基于 $SU(2)_W \times U(1)_Y$ 对称性的电弱统一模型尽管取得了巨大成功, 但仍有很多不足, 例如强作用和弱电作用不能统一, 不能自然解释 Higgs 粒子质量的二次发散问题, 不能解释宇宙中占 23% 的暗物质, 不能解释中微子质量等问题而不被认为是一个终极理论, 我们需要一个更基本的粒子物理理论。在众多新物理理论模型中, 超对称理论 SUSY 被普遍认为是这个更为基本的粒子物理理论的候选者之一, 并可能对宇宙中 23% 的暗物质做出自然解释。另外还有 composite higgs (复合希格斯), 额外维空间, W' , Z' 等, 实验上寻找其预言的新粒子或新物理现象是对其检验的最直接手段, 这也是处于对撞机能量最前沿的 LHC 实验和未来强子对撞机最主要物理目标之一。

超对称是费米子和玻色子之间的对称性，在超对称变换下，费米子变成玻色子，反之亦然。故标准模型中每一个粒子都有其相应的自旋相差 $1/2$ 的超对称粒子。在超对称标准模型中，费米子和玻色子对 Higgs 粒子质量平方的量子修正互相抵消，故自然解决了规范等级问题。在具有 $Z_2 R$ 宇称的超对称标准模型中，我们可以得到规范耦合常数的统一，最轻的超对称粒子（LSP）如 Neutralino, Sneutrino, Axino, 或 Gravitino 等可以是暗物质粒子的候选者，以及电弱对称性可以通过辐射修正破缺等。因为规范耦合常数统一强烈地暗示了大统一模型，所以超对称是联系低能粒子物理与高能大统一模型和超弦模型的桥梁。但是目前大型强子对撞机 ATLAS 实验和 CMS 实验没有观测到超对称信号，故给超对称参数空间较强的限制。因此，如何构造自然的超对称标准模型和如何探测超对称是目前面临的两大主要问题。目前低能标定义的精细调节测度对自然超对称标准模型的一致预言是比较轻的 Higgsino, 并希望 Gluino 和 Light Stop 比较轻。同时在 Super-Natural Supersymmetry 中，其高能标定义的精细调节测度自动为 1, 故从根本上解决了超对称电弱精细调节问题。这类模型一般预言了比较轻的 Bino, 带电 sleptons, 和 sneutrinos, 其中 Bino 是 LSP neutralino 的最主要组成部分。

因此，对于以后 CEPC 的超对称研究可以重点研究 Higgsino, Bino, 带电 sleptons 和 sneutrinos 等，或说 Neutralinos, Charginos, 和 sleptons 等。

2) LHC, Tevatron 目前结果的介绍, HL-LHC 的未来规划

LHC 自 2010 年 10 月开始获取实验数据以来，ATLAS 探测器运行良好，已获取了积分亮度为 5 fb^{-1} (21 fb^{-1}) 左右的 7 (8) TeV 的 Run-1 数据，2015 年 LHC 在 Run-2 阶段已实现了质子-质子质心系能量 13 TeV 的对撞，2015—2018 年已获取了 140 fb^{-1} 左右的 Run-2 数据。在超对称粒子寻找方面，LHC 实验取得了良好进展，大幅度扩展了 Tevatron 实验所涉及过的超对称质量参数空间。除了从产生截面最大的多喷注加上大的横向丢失能量来寻找超对称信号外，也全面开展了从弱电作用超对称粒子的产生和衰变以及第三代超夸克和超轻子的产生及衰变来寻找超对称粒子。目前基于 2015–2017 (–2018) 年获取的 80 (140) fb^{-1} 的数据，利用超对称简化模型，约 2 TeV 以下的 gluino 粒子^{[1][2][3][4]}， ~ 1 TeV 以下的 stop 粒子^{[5][6][7][8]}， $\sim 700\text{--}1000\text{GeV}$ 以下的 electroweakino 粒子^{[9][10][11][12]}，和 $\sim 400\text{--}700 \text{ GeV}$ 以下的 slepton^{[13][14][15]} 粒子基本已被排除。在一些质量参数空间发现了 $\sim 2\sigma$ 的超出，需要更高统计量的数据去证实或排除。随着积分亮度的增加，为超对称粒子和其它新物理的发现提供了前所未有的机遇，我们应牢牢抓住

该机遇。如果人类能够发现标准模型里没有的粒子，那将是粒子物理领域的最重大突破。

LHC 经过几个阶段的升级，最终 2035-2038 年将获得 $14\text{TeV } 3\text{ ab}^{-1}$ 的对撞数据，是目前数据的 20 倍左右，也叫高亮度 LHC，即 HL-LHC。如果 HL-LHC 发现了新物理的迹象，很有可能升级到 HE-LHC，即质心能量为 27 TeV ，采集数据为 15ab^{-1} 的质子质子对撞机。预期研究表明，HL-LHC（HE-LHC）可排除约 3（6） TeV 以下的 gluino 和 squark 粒子，排除 1-1.7（1.8-3.6） TeV 以下的 stop 粒子，1.1（2.3） TeV 以下的 gaugino 粒子，300（600） GeV 以下的 higgsino 粒子和 730 GeV 以下的 stau 粒子^[16]。一般来说，HE-LHC 的发现和排除潜力约为 HL-LHC 的两倍。

参考文献：

- [1] ATLAS Collaboration, search for squarks and gluinos in final states with jets and missing transverse momentum using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ pp collisions data with the ATLAS detector, Phys. Rev. D 97 (2018) 112001
- [2] ATLAS Collaboration, Search for squarks and gluinos in events with an isolated lepton, jets and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with ATLAS detector, Phys. Rev. D 96 (2017) 112010
- [3] CMS Collaboration, Search for supersymmetry in proton-proton collisions at 13 TeV in final states with jets and missing transverse momentum, JHEP 10 (2019) 244
- [4] ATLAS Collaboration, search for supersymmetry in final states with missing transverse momentum and multiple b-jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector, JHEP06(2018)107
- [5] ATLAS Collaboration, search for a scalar partner of the top quark in the all-hadronic $t\bar{t}$ plus missing transverse momentum final state at $\sqrt{s}=13\text{ TeV}$ with the ATLAS detector, arXiv:2004.14060
- [6] ATLAS Collaboration, search for top-squark pair production in final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum using 36 fb^{-1} of $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$ pp collision data with the ATLAS detector, JHEP06(2018)108
- [7] CMS Collaboration, Search for direct top squark pair production in events with one lepton, jets, and missing transverse momentum at 13 TeV with the CMS experiment, JHEP 05(2020)032
- [8] ATLAS Collaboration, search for bottom-squark pair production with the ATLAS

detector in final states containing Higgs bosons, b-jets and missing transverse momentum, JHEP 12 (2019) 060

- [9] ATLAS Collaboration, search for direct electro-weakino and slepton production in events with at least two hadronic taus and missing transverse momentum at $\sqrt{s} = 13$ TeV, Eur. Phys. J. C 78(2018)154
- [10] ATLAS Collaboration, search for chargino-neutralino production with mass splittings near the electroweak scale in three-lepton final states in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector, Phys. Rev. D 101 (2017) 072001
- [11] ATLAS Collaboration, search for electroweak production of supersymmetric particles in the two and three lepton final state at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector, Phys. Rev. D 101 (2020) 072001
- [12] ATLAS Collaboration, search for supersymmetry in events with four or more leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using 13.3 fb⁻¹ of ATLAS data, PRD98(2018)032009
- [13] ATLAS Collaboration, search for electroweak production of charginos and sleptons decaying into final states with two leptons and missing transverse momentum in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions using the ATLAS detector, Eur. Phys. J. C 80 (2020) 123
- [14] ATLAS Collaboration, search for direct stau production in events with two hadronic τ -leptons in $\sqrt{s} = 13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector, Phys. Rev. D 101 (2020) 032009
- [15] CMS Collaboration, search for direct pair production of supersymmetric partners to the τ lepton in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV, Eur. Phys. J. C 80 (2020) 189
- [16] Beyond the Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC, arXiv:1812.07831

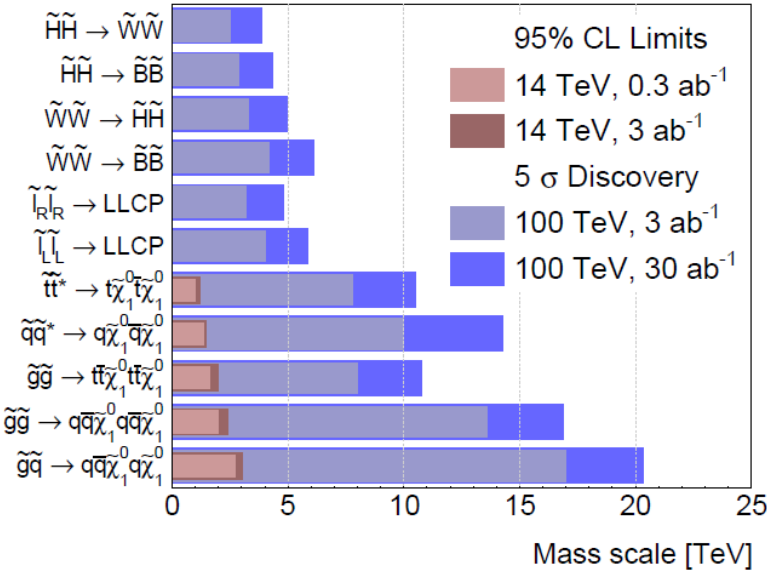
3) FCC, ILC, CLICK 等主要未来加速器的物理预期目标

世界各国提出的未来强子对撞机主要为欧洲提出的FCC_hh 和 中国提出的SppC。主要轻子对撞机有欧洲提出的FCC_ee，中国提出的CEPC，日本提出的ILC，还有欧洲提出的CLICK等。

一般而言，我们可以将 FCChh 和 SppC 统称为 100 TeV 质子质子对撞机。考虑 $3ab^{-1}$ 的积分亮度或说数据，对于 Gluino 的寻找，其被发现的质量上限约为 11 TeV。对于 Light Stop 的寻找，其质量的排除限和发现限分别为 7 TeV 和 6 TeV。如果 Gluino 和前两代 Squark 质量大致相等，假定 LSP Neutralino 质量可以忽略不计，它们质量的排除限和发现限分别为 16 TeV 和 15.5 TeV。如果积分亮度为 $3ab^{-1}$ ，它们质量发现限可能提高至 20 TeV。

考虑 Mild-Split SUSY，如果 Gluino 质量小于 4 TeV，对于 Gluino-LSP 质量近似简并和非简并的情况，前两代 Squark 的质量的发现限分别为 37 TeV 和 32 TeV。依赖于 Squark 质量和衰变动力学，Wino 和 Bino 的质量发现上限分别为 3.5-6 TeV 和 1.7 TeV。

FCChh 和 SppC 上的超对称寻找的结果总结如下：



关于轻子对撞机，中国将来可能建造 CEPC，欧洲将来可能建造 FCCee，日本将来可能建造 ILC。这些对撞机质心能量不高。故它们只能寻找超对称标准模型中可能很轻的超对称粒子如 Neutralinos, Charginos 和 Sleptons 等。一般而言，此类粒子能探测到的质量上限约为质心能量的一半。同时 Bino LSP 可以通过 Mono-Photon 方法寻找。同时可以考虑的超对称 Scenarios 包括 Compressed Scenarios 和 R-Parity Violation Scenarios 等。

欧洲高能物理发展战略总结了各未来加速器的物理预期目标，具体参考 <https://arxiv.org/pdf/1910.11775.pdf>。

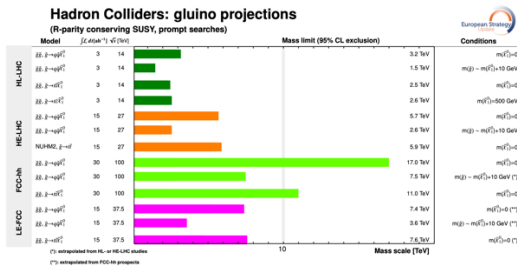


Fig. 8.6: Gluino exclusion reach of different hadron colliders: HL- and HE-LHC [443], and FCC-hh [139, 448]. Results for low-energy FCC-hh are obtained with a simple extrapolation.

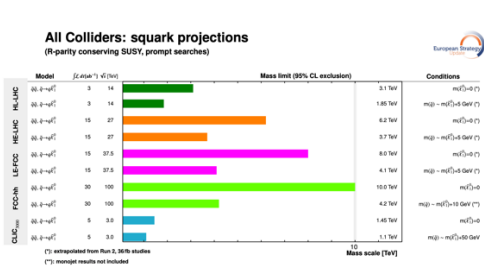
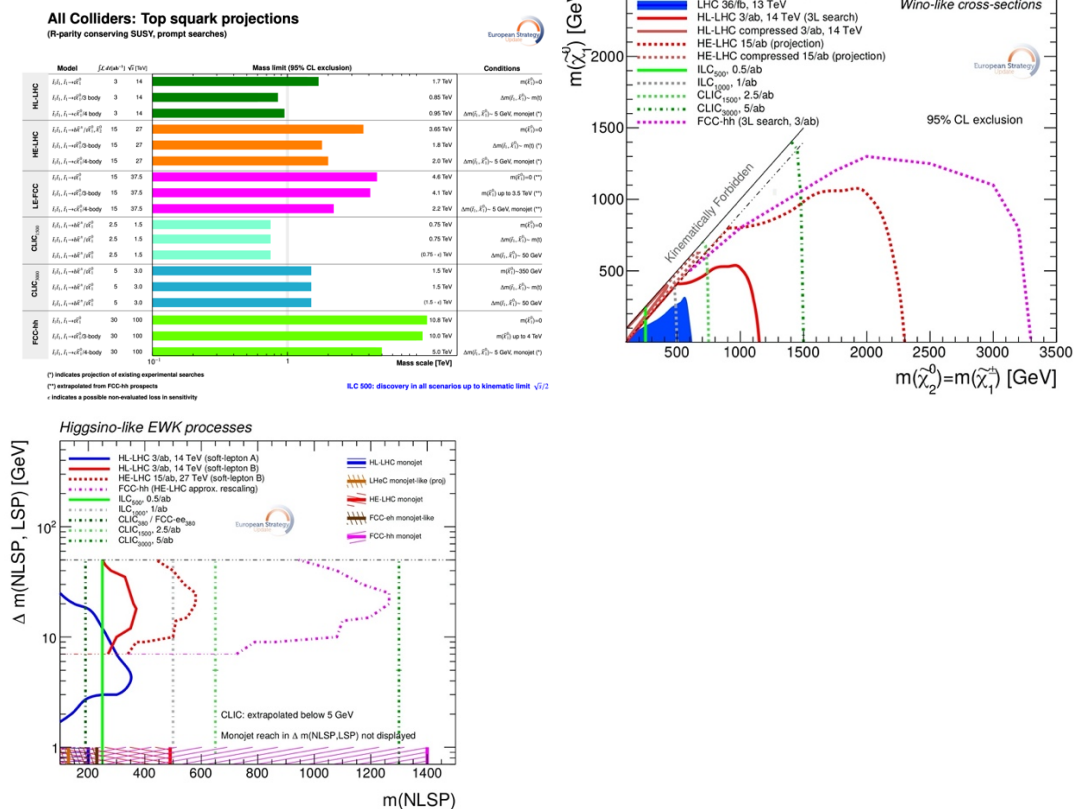


Fig. 8.7: Exclusion reach of different hadron and lepton colliders for first- and second-generation squarks.



4) CEPC, SPPC 的计划和前景，与 FCC, ILC 的比较

SPPC 对 SUSY 和其他 BSM 粒子的研究基本和上面描述的 FCC_hh 的预期结果类似。CEPC 将进一步扩展 LEP 实验的探索空间（LEP 实验排除了 $\sim 90\text{--}100 \text{ GeV}$ 以下的 slepton, gaugino 和 higgsino 粒子）。下面主要介绍 CEPC BSM 的研究。只挑选几个重要的典型的 scenario 介绍。

a) Stau 和 smuon 粒子的寻找

第三代轻子 τ (tau) 的超对称伴子 stau 理论上比第一代和第二代轻子的超对称伴子 selectron, smuon 要轻，其中轻 stau 粒子 SUSY 理论模型给出的暗物质残遗密度与宇宙观测值是一致的；质量较轻的超轻子在 neutralino-stau coannihilation 中还扮演重要角色。而质量较轻的 smuon 可自然解释实验上观测到的 muon g-2 的超出现象。故 stau 和 slepton 粒子在 CEPC 上的寻找非常的重要，是 CEPC BSM 研究中非常重要的课题。

由于强子对撞机对低动量的 tau 粒子和 muon 粒子的重建非常困难，而且由于 trigger 的原因，很难探测低横动量的 tau 和 muon 粒子，这使得低质量尤其是紧致的 stau 和 smuon 粒子的寻找在 LHC 实验变的非常困难。然而低质量的 stau (smuon) 粒子对暗物质 (muon g-2 超出) 非常重要。预计 CEPC 可发现或排除 120 GeV 以下的 stau 粒子和 smuon 粒子。

b) Gaugino 和 higgsino 粒子的寻找

Gaugino 粒子和 higgsino 粒子的产生截面在 CEPC 实验相对其他过程较高，是 CEPC 的重点研究过程之一。其中 nature SUSY 要求 higgsino 比较轻，然而强子对撞机由于本底非常大，轻的 higgsino 的 object 的横动量一般较小，由于强子对撞机的 object 的鉴别的精度比轻子对撞机要差，再加上 trigger 的原因，很难重建特别低动量的 object，所以在强子对撞机对 higgsino 的寻找变的比较困难。然而轻子对撞机的本底非常小，而且没有 trigger，可以探测质量小于 120 GeV 的 higgsino 粒子。

c) Long-lived particle 粒子的寻找

在规范传导的超对称破缺的模型中，Gravitino 是最轻的超对称粒子 LSP.

并且次最轻的超对称粒子 NLSP 的候选者包括 Bino, Higgsino, 和 Light

Stau 等。因为这些 NLSP 衰变时间较长，故我们将有 Long-Lived Bino,

Higgsino, 和 Light Stau，并需要对这些粒子的寻找分别做相应的研究。

在引力传导的超对称破缺的模型中，Bino 一般是最轻的超对称粒子 LSP.如

果没有一些特殊机制，如 Bino 和 Light Stau 共湮灭等，Bino 的剩余丰度

将太大，并可能 Over Close the Universe. 其解决方案是引入轴子 Axion 的

超对称粒子 Axino, 并且 Bino 可以衰变为 Axino 和 光子。因为

Bino-Axino-Photon 耦合系数很小，所以 Bino 也将成为 Long-Lived Particle.

d) R 宇辰破缺模型 (RPV) SUSY 粒子的寻找

引入 R 宇辰破缺的算子，我们可能可以降低 LHC 超对称寻找的限制。同时

超对称粒子的寻找方法可能完全不一样。举例而言，如果我们引入 $Q_i L_j D_k^c$

算子，带电 sleptons 和 sneutrinos 都将衰变到两个夸克，并且没有 Missing

Energy. 如果我们引入 $L_i L_j E_k^c$ 算子，我们将在 CEPC 上有

Sneutrino S resonance, 同时 Sneutrino 可以衰变到两个带电轻子, 如正负电子等。

e) Mono-photon 末态 SUSY, 暗物质, 额外维空间的寻找

在额外维空间理论中, 考虑 KK Parity, 最轻的光子的 KK mode 可以是暗物质后选者。总之, 超对称标准模型中的暗物质如 LSP neutralino, 额外维空间理论中的暗物质如最轻的光子的 KK mode, 以及其它的相关暗物质模型, 都可以通过 Mono-photon 末态来寻找。

二、高亮度前沿

第四章：围绕中国基于加速器的粒子物理领域发展的相关政策建议

一、中国基于加速器的粒子物理领域发展的政策建议

(针对关键科学问题、关键技术问题和优先发展领域的表述, 提出前沿领域发展的资助策略等政策建议。)

二、中国基于加速器的粒子物理领域资助战略实现的配套措施

(从能力建设、队伍建设、制度建设、法规建设、环境建设、国际合作政策、组织保障等方面出发, 提出有利于前沿领域资助战略实现的配套措施。)

第五章：中国基于加速器的粒子物理领域发展路线图

(总结前面四章内容,对我国基于加速器的粒子物理领域发展给出一个明晰的路线图。)