

フォトンサイエンス国際卓越大学院プログラム (XPS)
光科学特別実習 報告書

氏 名	平尾 魁梧
所属部局	理学系研究科 物理学専攻
研究機関・企業名	(School) Kavli Asian Winter School
日程	西暦 2022 年 1 月 10 日 ~ 西暦 2022 年 1 月 23 日

私は 2022 年 1 月 10 日から 23 日に開かれた Kavli Asian Winter School (KAWS) に参加した。8 トピックについてのそれぞれ 3 コマのセッションの内、以下の 4 つへの出席に関して報告を行う。主に自身の研究分野に近いセッション 8 の暗黒物質に関する内容をまとめ、他については概略を記す。オンライン講義の内容は録画され下記リンクで公開されている。
(<https://www.icts.res.in/program/kaws2022/talks>)

5. Machine Learning (Yang-Hui He)

このセッションでは機械学習の弦理論や代数幾何学的対象への適用が扱われた。弦理論の Calabi-Yau 多様体でのコンパクト化と深層学習の丁寧な導入から具体的な適用例が紹介された。

6. Holography, CFT, entanglement (Tom Hartman)

このセッションのテーマは QFT や量子重力でのエンタングルメントである。ユークリッド経路積分でのエントロピーやエンタングルメントエントロピーの定義と計算法から始まり、量子重力エントロピーと AdS/CFT 対応、そしてブラックホール情報パラドックスが説明された。

7. Tensionless AdS/CFT (Matthias Gaberdiel)

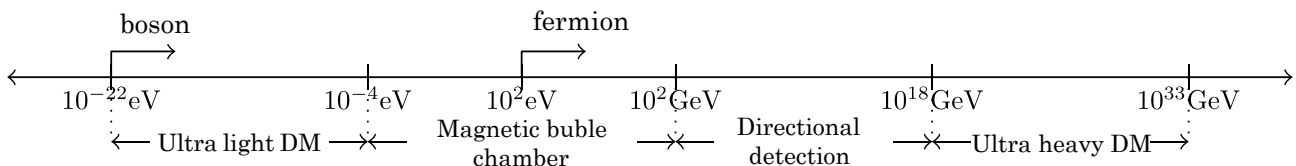
Tensionless AdS/CFT とは AdS/CFT 対応のパラメータ空間で弦長 l_s が長い領域、すなわち弦理論の結合定数 g_s と CFT 側のトホーフト結合定数が共に小さい領域を指す。弦理論側では弦の張力が 0 の極限であり stringy な効果が強くなって対称性が高まるという特徴がある。このセッションでは AdS3/CFT2 対応を用いた Tensionless AdS/CFT の最近の進展が説明された。

8. Dark matter, search for new physics (Surjeet Rajendran)

暗黒物質と重力波の探査実験について、現在の状況やこれからの進展が述べられた。これらを検出、測定することで新物理についての情報を得られると期待されている。講義 1、2 では暗黒物質検出実験、講義 3 では重力波実験が扱われた。

- ・暗黒物質検出実験

図: DM Mass Landscape



暗黒物質とは天文学的な観測により宇宙に存在することは分かっている正体不明の粒子である。光やバリオンなどとの相互作用が非常に弱いいため検出の難しい暗黒物質は、その質量をはじめどのような相互作用を持つかも分かっていない。一方で近年磁場測定器 SQUIDs や原子、光学干渉計による加速度測定の精度は日々進歩しておりより感度の高い検出実験が可能になっている。そのため広範なパラメータ空間全域において暗黒物質の検出を目指すのが現在の最善策と考えられる。本講義ではそれぞれの領域に適した様々な方法の系統的な紹介がなされた。

図に暗黒物質の質量範囲とその区分を示す。質量の最大値は観測されている重力レンズ効果の大きさから制限されている。一方で最小値は粒子が銀河に収まりきらない制限からきている。暗黒物質のエネルギー密度は分かっているためその数密度は質量に反比例して大きくなる。フェルミオンの場合はパウリ排他律から制限され、ボソンはドブロイ波長が銀河のサイズで抑えられる。

超軽量暗黒物質(10⁻²²eV-10⁻⁴eV)

超軽量のボソンは光子と同様に古典的な振動子ソースとして観測される。

$$a(t) \sim a_0 \cos(m_a t)$$

現在の宇宙では暗黒物質は空間にランダムに存在していると考えられる。静止した観測者を一信号が通過するのに要する時間(コヒーレンス時間)は相関長(1/mv)を速度で割った

$$\xi/v = 1/(mv^2) \sim 1s(\text{MHz}/m)$$

と見積もられこの質量領域では観測に適したスケールである。

表:超軽量暗黒物質の標準模型セクターとの相互作用

	Spin 0	Spin 1
Spin	$f_a^{-1} \partial_\mu a \bar{N} \gamma^\mu \gamma_5 N$	$f_a^{-1} F'_{\mu\nu} \bar{N} \sigma^{\mu\nu} \gamma_5 N$
EM	$f_a^{-1} a F \tilde{F}$	EM $\epsilon F' F$
Higgs	$g\phi H^2$	Current $gA'_\mu J_{B-L}^\mu$

標準模型セクターとの相互作用として理論的な観点から自然なものを表に示す。暗黒物質のスピンが0の場合は核子のスピン、電磁場、ヒッグズ場との相互作用が考えられる。一方スピン1では核子のスピン、電磁場の他にアノマリーフリーなB-Lカレントとの結合がある。暗黒物質の背景の下でスピンや電磁場との相互作用は磁場の振動を生む。またヒッグズ場との結合は電子の質量などの基本定数を変える効果があり、カレントとの結合は核子や電子などに新たな力を及ぼす。これらの振動はSQUIDSや加速度測定器で調べられる。

CASPEr

CASPEr(Cosmic Axion Spin Precession Experiment)は暗黒物質の背景下で個体物質が放つ磁場振動の測定を行う暗黒物質検出実験である。核子のスピンと暗黒物質の結合は磁場のスピンを振動させる。またQCD axionは核子に振動する電気双極子モーメントを与える。LXeやPbTiO3などの多種類の物質が用いられBoston大学などで行われている。

フォトン型(dark photon)暗黒物質の検出実験

スピン1の暗黒物質はQEDカレントやB-Lカレントとの結合を通して標準模型粒子に力を与える。これにより標準模型相互作用を排除した状況で何らかの振動信号を検出できる可能性がある。電磁場へのシールド内にLC共振回路を設置し信号を測定する実験が行われている。またTi原子とBe原子をかけた天秤のねじれの角度を測定する実験や原子干渉計を用いてRubidium 85とRubidium 87の自由落下の加速度の違いを測定する実験が進行中である。

また天文学的手法として、宇宙に存在するパルサーの定常的な振動を利用した検出実験、パルサータイミングアレイ(PTA)についても言及がなされた。PTAはパルサーと地球の間を通る重力波の検出のために注目されたが暗黒物質の背景もまたパルサー本体の振動、または地球で観測に用いる原子時計での基本定数の振動を引き起こしPTAで検出可能な信号を与える可能性がある。

Directional Detention(10²GeV~10¹⁸GeV)

質量スケール10²GeV~10¹⁸GeVの暗黒物質は、標的物質内の核子とのエネルギー蓄積(deposit energy)10~100keVの散乱を通して調べられる。WIMP(Weakly Interacting Massive Particle)は標準模型スケール(~10²GeV)の暗黒物質で40年程前から自然な領域として実験の対象とされてきた。測定精度が向上すると共に太陽ニュートリノによる散乱と暗黒物質信号との区別が着かないという問題が浮上する。これは暗黒物質の衝突方向を特定すれば解決できるが、トンスケールの検出器の中で一年に一回程度の稀な、それもナノスケールの信号を見つけ出すことは容易ではない。

Ron WalsworthらによりMaryland大学で建設中の実験はダイヤモンド内の窒素空室にある自由電子のエネルギー準位遷移を利用した光学的な観測により方向の特定を可能にする。暗黒物質衝突は結晶の歪みは自由電子の遷移スペクトルを変え、その跡をレーザー照射で調べられる。窒素空室は30nm³に一個の割合で存在するのでナノスケールの歪みの捕捉に適している。

Magnetic bubble chamber ($10^{-4}\text{eV}\sim\text{GeV}$)

$10^{-4}\text{eV}\sim\text{GeV}$ という質量領域は超軽量暗黒物質と同じ方法で検出するにはコヒーレンス時間が短すぎ、WIMP の様に散乱過程で検出するには蓄積エネルギーが小さい。散乱を検出するには何らかの仕組みで $\text{meV}\sim\text{keV}$ の蓄積エネルギーを増幅してやる必要がある。さらに暗黒物質の衝突は稀なので大きな検出器で時間的に安定した増幅が求められる。

Rupak Mohapatra らによって Texas A&M 大学で建設中の Magnetic Bubble Chamber 実験では有機金属錯体を用いて以下のように蓄積エネルギーの増幅を実現する。有機金属錯体では格子状にスピンの並び隣同士のスピン-スピン相互作用が小さいという条件を満たす。まず一様磁場をかけスピンの揃った検出器のある点に衝突が起こるとそこに熱が付与され、スピンのフリップする。熱が拡散される過程でスピン励起状態の寿命が十分長ければ巨視的なスピンフリップを起こせ、これを観測する。

超重量暗黒物質 ($10^{18}\text{GeV}\sim 10^{33}\text{GeV}$)

暗黒物質の強い自己相互作用により宇宙の発展過程で複雑な構造が形成され超重量の複合粒子となった可能性がある。ここでは手がかりの少ない自己相互作用の詳細は追わず超重量暗黒物質の生む観測効果が議論された。この領域の暗黒物質シグナルは非常に稀だが通常より大きな痕跡を残す。パラメータとして質量 M のほかに自己相互作用や構成粒子の質量スケール Λ がある。また標準模型との相互作用が近距離的 (short range) か遠距離的 (long range) かで観測効果も変わる。

近距離相互作用を持つ暗黒物質に対する現在の制限は磁気双極子モーメントの探査が目的の MACRO 実験からついでている。他には CDMS や Xenon などの WIMP 検出実験でも想定より大きなサイズのシグナルを与えるので制限がつく。また 20m^2 程のより大きなサイズの場合には潜水艦探知に用いられるハイドロフォンを使うアイデアが紹介された。

暗黒物質が遠距離相互作用を持つ場合には地球上に離れた標的に一度に影響を及ぼす。これを利用して超軽量暗黒物質の検出器を複数合わせることでシグナルを特定できる。一方で非常に重い質量 ($\sim 10^{33}\text{GeV}$) で近距離相互作用のシグナルを探査する場合、惑星サイズの検出器を用意するのは難しい。Paleo detection と呼ばれる考古学的な探索でオーストラリアの広大な太古の地質で暗黒物質の痕跡を探る試みが紹介された。最後にこれほどの質量の暗黒物質の通過は原子ブラックホールと同様に白色矮星の Ia 型スーパーノヴァを引き起こすことから天文学的な観測からも制限を与える可能性が示唆された。